UNIVERSIDAD NACIONAL DE SALTA

FACULTAD DE CIENCIAS EXACTAS

DOCTORADO EN CIENCIAS–ÁREA ENERGÍAS RENOVABLES

Tema de Tesis:

SOLUCIONES TECNOLOGICAS A LA PROBLEMÁTICA DEL ELEVADO CONSUMO ENERGÉTICO DE CLIMATIZACIÓN EN LA VIVIENDA SOCIAL, UTILIZANDO ESTRATEGIAS CONSTRUCTIVAS BIOCLIMÁTICAS Y ENERGÍA SOLAR

Doctorando: Licenciado Andrés Emanuel Díaz

Salta, 2023

AGRADECIMIENTOS

Primero que nada, a Él, luego al CONICET por permitirme realizar este sueño y encima pagarme. A mi director Alejo que confió desde el primer día en mí, a mi amada Universidad Nacional de Salta que me dio el Box y los compañeros que son mis amigos ahora. No me alcanzan las palabras para describir lo que siento al redactar esto. Con esta tesis se cumple un gran sueño que he tenido desde que empecé la secundaria y tantas personas me ayudaron en el camino…mi hermano ángel Exequiel, mi hermano ángel negrito, mi ángel abuelita Ubenza, las empanadas que tanto me dieron…a mi abuelita Rosa que tanto me presume, a la más hermosa y única Karen, a Martin, a Pocho, al Man, , a Melisa, a mis amigos del café y del futbol de los jueves, a Carlos Cadena, Fernando Tilca, Carlos Fernández que son maestros diarios para mí, a Lucas B., Oscar R. de ingeniería…a mis hermanos (son 8 jaja) Jorge, Nazareno, Iván, Linda, Lujan, Enzo, Román y Morena…a mis queridos tíos, para vos viejita Cecilia Alejandra que tanto te amo, a Roberto y la mecha y toda la hermosa familia Tognini.

Agradecer particularmente a Pablito Dellicompagni que estuvo al principio y al final de mi tesis doctoral…y en el medio apareció mágicamente Nicolas Di Lalla, sin ellos no hubiera podido realizar esto….muchas gracias a todos…los amo y seguiré dando lo mejor de mi para llegar a ser un investigador que ayude al prójimo…porque para eso estamos. Gracias.

Índice

Resumen 11
Abstrac 13
Capítulo 1 15
Introducción 15
1.1 Problemática 15
1.1.1 Consumo Energético Mundial 15
1.1.2 Consumo de energía del sector de la construcción 16
1.1.3 Consumo energético Nacional 20
1.1.4 Problemática en la construcción y los desechos plásticos 23
1.1.5 Desechos de neumáticos 24
1.2 Hacia la sustentabilidad 26
1.3 Objetivos 31
1.3.1 General 31
1.3.2 Específicos 31
1.4 Originalidad del Tema 32
Capítulo 2 34
Generación del Año Meteorológico Típico de la ciudad de Salta 34
2.1 Introducción 34
2.2 Zonas bioambientales 34
2.3 TMY en nuestro país 36
2.4 Características climáticas de la ciudad de salta 37
2.5 TRY, TMY, TMY2, TMY3 y IWEC 38
2.6 TMYs en el mundo 40
2.7 Factores de ponderación 42
2.8 Procedimientos de selección del mes meteorológico típico TMM 44
2.7 Año meteorológico típico de salta (TMYPLUS) 47
2.7.1 Descripción de los datos 48
2.7.2 Meses meteorológicos típicos 48
2.8 Comparaciones de los desarrolladores TMY 56
2.9 CONCLUSIONES DEL CAPITULO 60
Capítulo 3 62
HD20: Aparato de placa caliente con guarda para la medición de las propiedades de transferencia de calor por conducción en hormigones 62

3.1 Introducción 62
3.2 Antecedentes 63
3.3 Propiedades de transferencia de calor 67
3.3.1 Conducción 68
3.3.1.1 Ecuación para la conducción de calor 70
3.3.2. Conductividad térmica 71
3.3.3 Resistividad térmica 73
3.3.4 Resistencia térmica 73
3.3.5 Transmitancia térmica 74
3.4 Densidad 75
3.5 La caja caliente HD20 75
3.5.1 Principio de funcionamiento del aparato HD20 76
3.5.2 Unidad calefactora. 77
3.5.2.1 Alimentación eléctrica de la unidad calefactora 78
3.2.3 Unidad de enfriamiento 78
3.2.4. Aislación térmica lateral y pérdida de calor 80
3.2.5. Sistema control electrónico. 81
3.3 Probetas de ensayo 83
3.4 Calibración del aparato HD20 84
3.5 Detalles generales del funcionamiento 84
3.6. Errores de Medición 85
3.6.1 Introducción 85
3.6.2 Propagación de incertidumbres 87
3.7 Conclusiones del capitulo 89
Capítulo 4 91
REVESTIMIENTOS MODULARES AISLANTES PARA CERRAMIENTOS OPACOS 91
4.1 Concreto u Hormigón, Cemento, Agua y Agregados. 91
4.1.1 Algo de Historia 91
4.1.2. Hormigón o concreto 92
4.1.3. Cemento 92
4.1.4 Los agregados 96
4.1.5 Agua 97
4.2. Propiedades del Hormigón 98
4.2.1 Resistencia a la compresión 98

4.2.2 Durabilidad 98
4.2.3 Fluidez o consistencia 98
4.2.4 Trabajabilidad 98
4.2.5. Requisitos de la mezcla de Hormigón 98
4.3 LWC 99
4.4 Plásticos 101
4.5 Desechos de neumáticos 102
4.5.1 Reciclaje de neumáticos 104
4.6 Desechos plásticos. 107
4.6.1 Reciclaje de los plásticos 109
4.6.1.1 Vertido de desechos plásticos 111
4.6.1.2 Incineración de desechos plásticos. 111
4.6.1.3 Reciclado de residuos plásticos 112
4.7 Desechos EPS 115
4.7.1 Reciclado de EPS 116
4.8 Finos de perlita 119
4.8.1 Perlita de San Antonio de Los Cobres 121
4.8.2 Propiedades físicas de la Perlita 122
4.8.3 Composición Química de la perlita 123
4.8.4 Obtención de la perlita, extracción de perlita cruda y transformación a expandida 124
4.9 Metodología 126
4.10 Materiales y Dosificaciones 133
4.10.1. Materiales reciclados en empresas 133
4.10.2 Caracterización de los materiales componentes 133
4.10.3 Cemento Pórtland 133
4.10.4 Adiciones minerales 133
4.10.5 Aditivos 134
4.10.6 Agua 134
4.10.7 Agregado grueso 134
4.10.8 Agregado fino 135
4.10.9 Absorción, granulometría y densidad de los ARLINC 137
4.10.10 Agregado de plásticos reciclados 138
4.10.11 Agregado de EPS reciclados 138

4.10.12 Agregado de Neumáticos usados triturados. 139
4.10.12 Superligante para los ARLINC 139
4.11 Dosificaciones 140
4.11.1 Elección del asentamiento 141
4.11.2 Elección del tamaño máximo nominal 142
4.11.3 Estimación de la cantidad de agua 142
4.11.4 Estimación de la relación agua cemento (a/c) 143
4.11.5 Aditivos 143
4.11.6 Etapas 145
4.11.7 Determinación de la cantidad de agregado (fino y grueso) por diferencia a 1000 de los volúmenes de agua, cemento y aire estimado. Ese volumen se integra con los agregados en las proporciones establecidas en el paso IV. 146
4.11.8 Dosificaciones para hormigón estructural, mampostería, hormigón celular y baldosas 148
4.11.8.1 Dosificaciones Serie Estructural 150
4.11.8.2 Dosificaciones Serie Mampostería 152
4.11.8.3 Dosificaciones Serie Hormigón Celular 153
4.11.8.4 Dosificaciones Serie Baldosa 154
4.12 Métodos y resultados de ensayos 155
4.12.1. Elaboración de pastones para la serie estructural 155
4.12.2. Elaboración de pastones para la Serie Mampostería 156
4.12.3. Elaboración de pastones para la Serie Hormigón Celular 158
4.12.4. Elaboración de pastones para la Serie de Baldosas. 160
4.13 Ensayos sobre hormigón en estado fresco 162
4.13.1 Serie Estructural 162
4.13.2 Serie Mampostería 165
4.13.3 Serie Hormigón Celular 166
4.13.4 Serie Baldosa 166
4.14 Ensayos sobre hormigón en estado endurecido 167
4.14.1 Ensayo estado endurecido de Serie Estructural 167
4.14.2 Ensayo estado endurecido de Serie Mampostería. 172
4.14.3 Ensayo en estado endurecido de la serie hormigón celular. 177
4.14.4 Ensayo en estado endurecido de la Serie de Baldosas. 179
4.15 Ladrillo Puma Punku 183

4.15.1 Ladrillo Punku 185
4.15.2 Resistencia Termica 186
4.15.3 Calor Especifico del ladrillo PumaPunku 189
4.17 Conclusiones del capitulo 192
Capítulo 5 195
COLECTOR SOLAR CALENTADOR DE AIRE CON MATRIZ POROSA CON TRATAMIENTO SELECTIVO ADAPTABLE A LA VIVIENDA DE INTERÉS SOCIAL TANTO ARQUITECTÓNICA COMO ECONÓMICAMENTE. 195
5.1 La Energía Renovable para Calefacción 195
5.2 Evaluación analítica de los parámetros de mayor influencia sobre la eficiencia de colección a fin de optimizar su diseño. 196
5.3 Estilo de arte de los Colectores de Aire 203
5.3.1 Definiciones de ángulos 203
5.3.2. Cociente entre la irradiancia solar directa sobre una superficie inclinada y sobre una superficie horizontal 206
5.3.3 Irradiancia solar sobre una superficie inclinada 207
5.3.4 Transmisión de la radiación a través de cubiertas 208
5.3.5 Propiedades ópticas de un sistema de cubiertas 212
5.3.6. Transmitancia para la radiación difusa 213
5.3.7. Producto transmitancia-absortancia 215
5.3.8. Producto transmitancia-absortancia efectiva 215
5.3.9. Irradiancia absorbida por la placa S (W/m^2) 216
5.3.10. Cálculo del coeficiente global de pérdida de calor, U_L 216
5.3.10.1 Cálculo del coeficiente U_t 218
5.3.10.2 Coeficiente global de pérdidas por detrás del absorbedor U_b 221
5.3.10.3 Coeficiente global de pérdidas por los laterales del colector U_e 223
5.3.11. Cálculo del Factor de Remoción de Calor F_R 223
5.3.12. Cálculo de la energía útil generada por el colector 224
5.3.13. Eficiencia instantánea de colección solar 224
5.3.14. Clasificación de colectores solares calentadores de aire 225
5.3.14.1. Según el número de cubiertas 225
5.3.14.2. Según la configuración del flujo 226
5.3.14.3. Según la configuración del material absorbedor 227
5.3.14.4 Otros diseños 228
5.4 Descripción del prototipo de colector 228

5.4.1. Descripción del prototipo construido 229
5.4.1.1 Caja de soporte 230
5.4.1.2. Matriz Porosa 230
5.4.1.3. Placa absorbedora 231
5.4.1.4 Cubierta transparente 232
5.4.1.6 Ventilador axial 235
5.4.1.7 Resistencia variador de velocidad del motor del ventilador 236
5.4.1.8 Aire de entrada 236
5.4.1.9 Ubicación de las termocuplas en el cuerpo del colector 237
5.5 Metodología de evaluación del desempeño termo-energético 238
5.5.1 Periodo de ensayo del colector 241
5.5.2 Criterios para evaluar la eficiencia del colector 242
5.6 Descripción y manejo del equipo de monitoreo 244
5.7 Determinación de la porosidad de la matriz porosa 246
5.8 Resultados de las mediciones 248
5.8.1 Datos obtenidos durante el ensayo 249
5.8.2. Medición de las variables meteorológicas 250
5.8.3 Medición de la temperatura en entrada y salida del colector 253
5.8.4 Obtención de la energía útil generada por el colector 256
5.8.5 Rendimiento diario del colector de matriz porosa 261
5.8.6 Clasificación del sistema de calentamiento 263
5.8.7 Evolución de la temperatura en un día nublado 264
5.8.8 Variación de la temperatura del aire a lo largo del colector 265
5.9 Determinación de la curva de eficiencia instantánea 266
5.9.1 Curva de eficiencia obtenida 268
5.10 Conclusiones del capitulo 270
Capítulo 6 273
SIMULACION DEL COMPORTAMIENTO TERMO-ENERGÉTICO DE UNA VIVIENDA SOCIAL 273
6.1 La influencia del ambiente sobre la vivienda y el hombre: confort térmico 273
6.1.1 Producción de energía del ser humano 273
6.1.2 Vestimenta 276
6.1.3 Diagramas de confort 277
6.1.3.1 Diagramas bioclimático de Givoni-Milne 278
6.1.4 Temperatura radiante 280

6.1.5 Temperatura operativa 280
6.1.6 Temperatura efectiva 281
6.1.7 Clima 282
6.1.7.1 Temperatura del aire 283
6.1.7.2 Amplitud térmica 284
6.1.7.3 Radiación solar 284
6.1.7.4 Carta solar 287
6.1.7.5 GEOSOL 287
6.1.7.6 Humedad relativa 288
6.1.7.7 Viento 289
6.1.7.8 Precipitaciones 290
6.1.8 Grados día 291
6.1.9 Días de diseño 292
6.1.10 Calculo de la transmitancia de un elemento constructivo 293
6.1.10.1 Aislantes térmicos 294
6.1.10.2 Intercambio térmico del interior al exterior a través de superficies sólidas 296
6.2 Sistema de almacenamiento térmico 301
6.2.1 Materiales de Cambio de Fase 304
6.2.2 Medición del calor especifico y determinación del calor latente 306
6.2.3 Simulación numérica en SIMUSOL 310
6.2.3.1 Modelo para SIMUSOL 312
6.2.3.2 Tablas y cuadros: programación en Día 313
6.3 Simulación del comportamiento térmico de la vivienda usando SIMEDIF 316
6.3.1 Descripción de la vivienda Caso IPV 317
6.3.2 Caso IPV: Pautas para la simulación 319
6.3.2.1 Definición del sitio, los datos meteorológicos y el período de simulación. 321
6.3.2.2 División de la vivienda en zonas térmicas. 322
6.3.2.2.1 Ingreso de Setpoint del termostato 322
6.3.2.2.2 Ganancias internas 323
6.3.2.2.3 Renovaciones de aire 323
6.3.2.3 Conexión de las "zonas térmicas" con los elementos 324
6.4 Caso Estratégico: pautas para la simulación 325
6.4.1 Pautas para la simulación 326
6.5 Resultados de la simulación: otoño-invierno del Caso IPV 327

6.5.1 Temperaturas interiores periodo otoño-invierno Caso IPV 327
6.5.2 Carga de calefacción del Caso IPV periodo otoño-invierno. 333
6.5.3 Grados día del periodo otoño-invierno Caso IPV 339
6.6 Resultados de la simulación: otoño-invierno del Caso Estratégico 340
6.6.1 Temperaturas interiores periodo otoño-invierno Caso Estratégico 340
6.6.2 Carga de calefacción del Caso Estratégico periodo otoño-invierno. 347
6.7 Resultados de la simulación: primavera-verano del Caso IPV 354
6.7.1 Temperaturas interiores periodo primavera-verano Caso IPV 354
6.7.2 Carga de enfriamiento del Caso IPV periodo primavera-verano. 361
6.8 Resultados de la simulación: primavera-verano del Caso Estratégico 367
6.8.1 Temperaturas interiores periodo primavera-verano Caso Estratégico 367
6.8.2 Carga de enfriamiento del Caso Estratégico periodo primavera-verano. 374
6.9 Resultados de las simulaciones en SIMUSOL de los PCM 382
6.9.1 Caracterización energética de los materiales de cambio de fase 382
6.9.2 Evolución de las temperaturas del recinto: periodo invierno 383
6.9.3 Evolución de las temperaturas del recinto: periodo verano. 387
6.10 Diagrama de Givoni para la Ciudad de Salta Capital 392
6.11 Conclusiones del capitulo 394
Capítulo 7 400
Conclusiones 400
ANEXO: Lista de Figuras 406
ANEXO: Lista de Tablas 421
ANEXO: Publicaciones 426
ANEXO: Bibliografía 428

Resumen

Este trabajo de tesis está enfocado en reducir el alto consumo energético de calefacción y de enfriamiento de una vivienda social. Se estudio la posibilidad de incorporar desechos de plásticos a la vivienda social, con esto contribuimos a la disminución de la generación plásticos y de gases de efecto invernadero (GEI) y sus impactos sobre el medio ambiente.

Para tener los datos meteorológicos de la ciudad de Salta, se desarrolló un año meteorológico típico llamado TMYPlus, el mismo cuenta con las variables meteorológicas necesarias para las simulaciones. El TMYPlus brinda información precisa para las simulaciones de sistemas térmicos y eléctricos que requieran resultados realistas para sus proyectos.

Ante la falta de un aparato para la medición de las propiedades térmicas de los materiales, que se fueron obteniendo en esta tesis, se fabricó un aparato de placa caliente con guarda llamado HD20. Este aparato proporciona la conductividad térmica de los materiales utilizados en la construcción de una vivienda social.

El hormigón armado es usado frecuentemente en la construcción de la vivienda social, por ello es que en esta tesis se desarrolló tal hormigón con desechos de polietileno de alta y baja densidad. Para las baldosas se proponen baldosas aislantes estudiadas y fabricadas en esta tesis. Para la mampostería se desarrolló un ladrillo llamado PumaPunku, el cual tiene una alta resistencia térmica y resistencia a la compresión, lo que lo hace apto para viviendas de dos plantas. Todas estas propiedades aportan a la reducción del consumo energético de calefacción y de enfriamiento que tiene una vivienda a lo largo del año.

En épocas invernales contar con un sistema de calefacción no convencional es de gran ayuda, tanto para el sistema eléctrico como para el ambiente. Por ello en esta tesis se estudió y fabricó un colector de aire de alta eficiencia, el cual se lo propone para la implementación en la vivienda social. Este sistema de calefacción aporta de gran manera a la reducción del consumo energético de calefacción.

Mediante la incorporación de PCM en la vivienda social, se logra una reducción de las temperaturas máximas interiores y un aumento de las mínimas, gracias a su capacidad de almacenar energía térmica. Se analizaron dos diferentes parafinas para su implementación. El PCM fue introducido en el ladrillo PumaPunku con gran éxito.

Todas las propuestas antes mencionadas fueron simuladas en dos programas: SIMEDIF y Simusol. Los resultados arrojaron reducciones en el consumo energético de hasta el 40%, lo que es una propuesta estratégica para que el IPV comience a implementar estas tecnologías en la construcción de sus viviendas.

Abstract

This thesis work is focused on reducing the high energy consumption of heating and cooling in social housing. The possibility of incorporating plastic waste into social housing was studied. We contribute to reducing the generation of plastics and greenhouse gases (GHG) environmental impacordernment.

To have the meteorological data of the city of Salta, a typical meteorological year called TMYPlus necessary developed. TMYPlus provides accurate information for simulations of thermal and electrical systems that require realistic results for their projects.

Due to the lack of an apparatus for the measurement of the thermal properties of the materials, which were obtained in this thesis, a hot plate apparatus with a guard called HD20 was manufactured. This device provides the thermal conductivity of the materials used in social housing construction.

Reinforced concrete is frequently used in social housing construction, so in this thesis, such concrete was developed with high and low-density polyethylene waste. Insulating tiles studied and manufactured in this thesis are proposed for the tiles. For the masonry, a brick called PumaPunku was developed, which has a high thermal resistance and compression resistance, making it suitable for two-story houses. All these properties contribute to reducing energy consumption for heating and cooling that a home has throughout the year.

In winter, having an unconventional heating system is of great help, both for the electrical system and the environment. Therefore, in this thesis, a high-efficiency air collector was studied and manufactured, which is proposed for implementation in social housing. This heating system contributes significantly to the reduction of heating energy consumption.

By incorporating PCM in social housing, maximum interior temperatures and an increase in minimum temperatures are reduced, thanks to its ability to store

thermal energy. Six different paraffins were analyzed for their implementation. The PCM was introduced in the PumaPunku brick with great success.

All the proposals mentioned above were simulated in two programs: SIMEDIF and Simusol. The results showed reductions in energy consumption of up to 40%, which is a strategic proposal for the IPV to start implementing these technologies in constructing their homes.

Capítulo 1

Introducción

1.1 Problemática

1.1.1 Consumo Energético Mundial

La tendencia global del consumo energético mundial en los últimos años ha estado basada en el consumo de hidrocarburos principalmente. Aunque pareciera asentada la conciencia social sobre el cambio climático, el empuje de los países emergentes, ha hecho que la incorporación de las tecnologías renovables haya sido mucho menor de lo esperado en favor del uso de energías convencionales.

En la actualidad, hay 37 países miembros de la OCDE (Organización para la Cooperación y el Desarrollo Económico) de los cuales 20 son fundadores y el resto se han incorporado sucesivamente empezando con Japón (1964), Finlandia (1969), Australia (1971), Nueva Zelanda (1973), México (1994), República Checa (1995), Corea, Hungría y Polonia (1996), República Eslovaca (2000), Chile, Estonia, Eslovenia e Israel (2010), Letonia (2016), Lituania y Colombia (2018). La UE tiene el estatus de observador en el Consejo con voz, pero sin voto. Además de los Estados miembros de la OCDE, 11 países no miembros han firmado la implementación de las Directrices de la OCDE: Argentina, Brasil, Costa Rica, Egipto, Jordania, Marruecos, Perú, Rumanía y Túnez. Además, la OCDE mantiene una relación más estrecha y privilegiada con los denominados Key Partners (Brasil, China, India, Indonesia y Sudáfrica) que participan incluso en las Reuniones Ministeriales.

De acuerdo al informe de la Administración de información de Energía de los Estados Unidos (EIA por sus siglas en ingles) el consumo mundial de energía aumentara casi un 50 % entre 2018 y 2050 (Figura 1.1). Casi todo el aumento se produce en países no pertenecientes a la OCDE. La mayoría de los aumentos en el consumo de energía provienen de países que no pertenecen a la OCDE, donde el fuerte crecimiento económico, el mayor acceso a la energía comercializada y el rápido crecimiento de la población conducen a un aumento del consumo de energía.

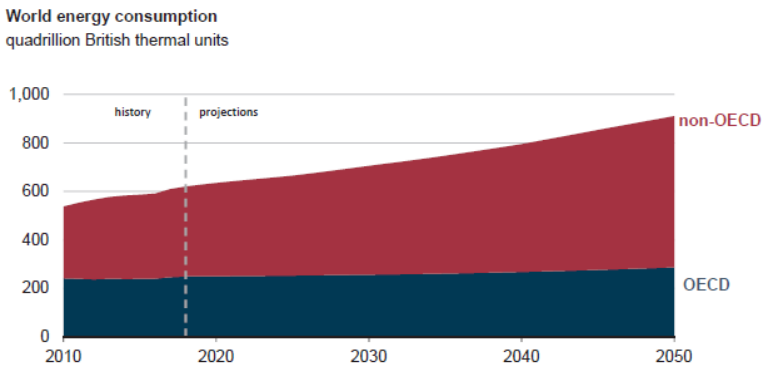


Fig. 1.1: Consumo mundial de energía primaria por región (BTU).

En los países de la OCDE, el crecimiento del consumo de energía es más lento como resultado de un crecimiento demográfico y económico relativamente más lento, mejoras en la eficiencia energética y un menor crecimiento en las industrias intensivas en energía. El consumo de energía en los países no miembros de la OCDE aumenta casi un 70 % entre 2018 y 2050, en contraste con un aumento del 15 % en los países de la OCDE.

1.1.2 Consumo de energía del sector de la construcción

La energía consumida en el sector edilicio, que incluye estructuras residenciales y comerciales, aumenta un 1,3 % por año, una tasa de crecimiento mayor que la de la población anual mundial, de 91 cuatrillones a 139 cuatrillones de unidades térmicas británicas (BTU) de 2018 a 2050 (Figura 1.2). La participación del sector de los edificios en el consumo mundial de energía suministrada aumenta alrededor del 20 % en 2018 al 22 % en 2050 (EIA, 2019).

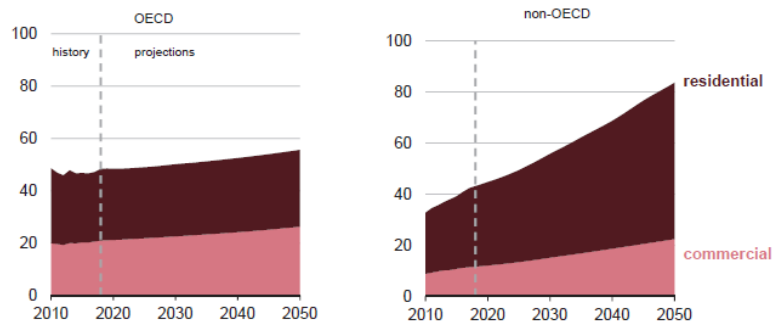


Fig. 1.2: Consumo de energía del sector de la construcción (cuatrillones BTU).

La mayor parte del aumento en el uso de energía proviene de países que no forman parte de la Organización para la Cooperación y el Desarrollo Económicos (OCDE). Estos países están experimentando un aumento de en los ingresos, la urbanización y un mayor acceso a la electricidad, lo que conduce a una mayor demanda de energía. El consumo de energía de la construcción en los países que no pertenecen a la OCDE aumenta aproximadamente un 2% por año, unas cinco veces más rápido que en los países de la OCDE, y el consumo de energía edilicia que no pertenecen a la OCDE superara el de los países de la OCDE para 2025.

En los países de la OCDE, se prevé que el consumo de energía de los edificios aumente a una media del 0,4 % anual entre 2018 y 2050, lo que refleja un crecimiento lento de los ingresos personales y ganancias en la eficiencia energética como resultado de la mejora de la estructura, los electrodomésticos y los equipos de los edificios.

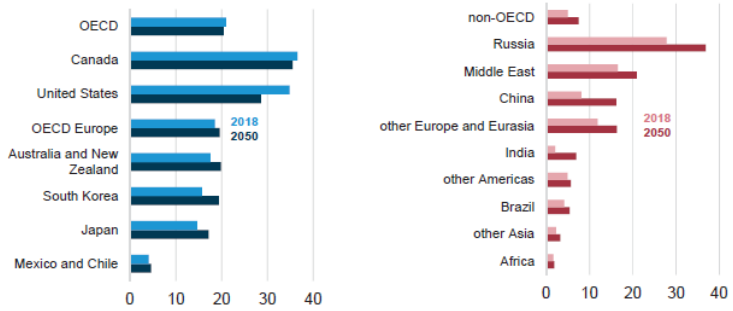


Fig. 1.3: Consumo de energía residencial por persona (millones de BTU).

El consumo de energía residencial mundial por persona (intensidad energética) aumenta un 0,6 % por año desde 2018 hasta 2050 (Figura 1.3), ya que el consumo de energía residencial (1,4 % por año) crece más rápido que el crecimiento de la población mundial (0,7 % por año). EIA no considera las fuentes de energía no comercializadas, como la madera y los desechos en sus análisis IEO.

En los países de la OCDE, la intensidad energética residencial disminuye en un promedio de 0,1 % por año entre 2018 y 2050, en comparación con un aumento

promedio de 1,3 % por año en los países no pertenecientes a la OCDE durante el mismo período.

India experimenta el crecimiento relativo más rápido en el uso residencial de energía por persona debido al mayor acceso a las fuentes de energía y al mayor uso de electrodomésticos y otros equipos que consumen energía. Sin embargo, en 2050, el uso residencial por persona de la India es solo alrededor del 24% del de los Estados Unidos.

Aunque la intensidad energética residencial en África crece alrededor de un 16 % entre 2018 y 2050, sigue siendo la región menos intensiva en energía.

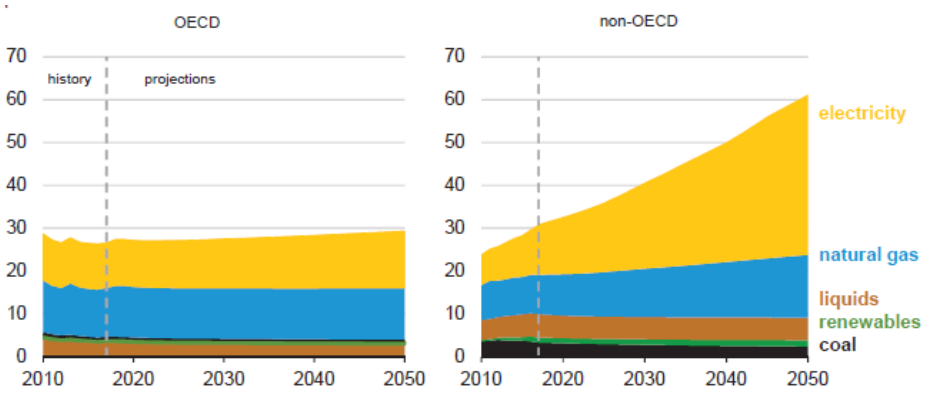


Fig. 1.4: Consumo de energía del sector residencial por combustible (cuatrillones BTU).

La electricidad sigue siendo la principal fuente de consumo de energía comercializada en el sector residencial, y su uso crece un 2,5 % anual en todo el mundo a medida que aumenta la población y el nivel de vida en los países no miembros de la OCDE y aumenta la demanda de electrodomésticos y equipos personales (Figura 1.5). El consumo residencial de gas natural aumenta un 0,7% anual durante el período de proyección, influenciado por el aumento del uso de gas natural para calefacción. El consumo de carbón, utilizado principalmente para calentar espacios, agua y cocinar, continúa disminuyendo en el sector residencial.

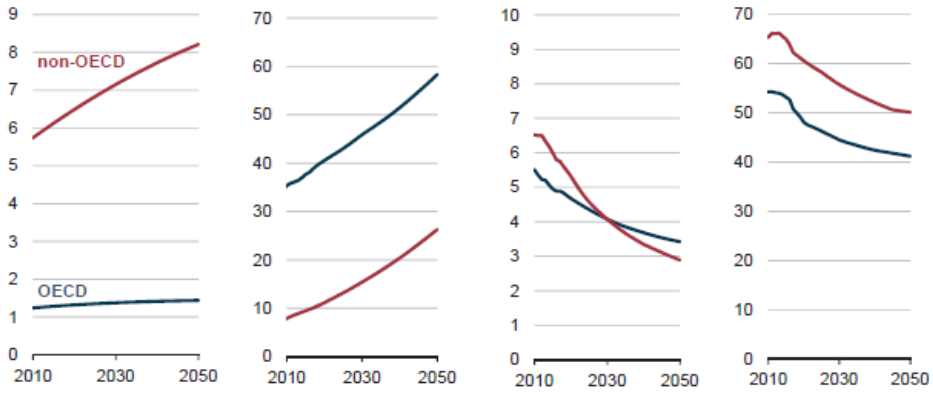


Fig. 1.5: Población (millones), PBI (miles de dólares), Intensidad de la Energía (BTU) e Intensidad de Carbono (toneladas métricas de CO_2 por billones BTU).

En todo el mundo, la cantidad de energía utilizada por unidad de producción económica (intensidad energética) ha disminuido constantemente durante muchos años. La cantidad de emisiones de dióxido de carbono (CO_2) por unidad de consumo de energía (intensidad de carbono) disminuyó en los países de la OCDE desde 2008 y en los países no pertenecientes a la OCDE desde 2014. La intensidad energética continúa disminuyendo tanto en los países de la OCDE como en los que no pertenecen a la OCDE debido a las ganancias de eficiencia y los aumentos del producto interno bruto (PIB) generados por los servicios de bajo consumo energético (Figura 1.6).

La intensidad de carbono continúa disminuyendo en gran medida como resultado de que China y otros países se están alejando del carbón; sumado al crecimiento mundial en el uso de fuentes de energía que no emiten CO_2, como la eólica y la solar; y mejoras en la eficiencia de los procesos.

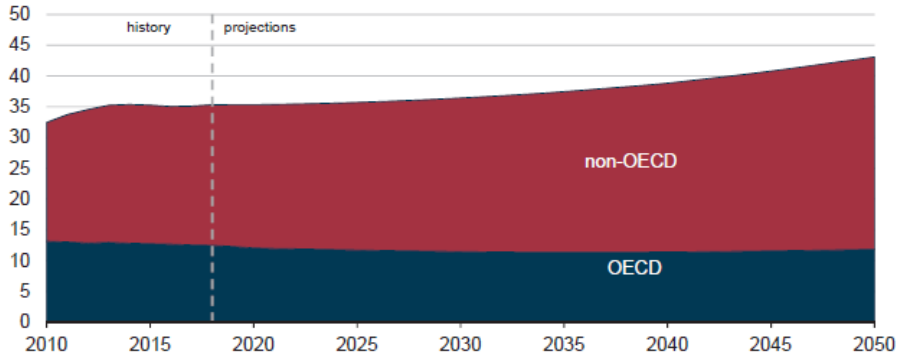


Fig. 1.6: Emisiones de dióxido de carbono relacionadas con la energía (mil millones de toneladas métricas).

Las emisiones mundiales de CO_2 relacionadas con la energía crecen a una tasa promedio del 0,6 % anual entre 2018 y 2050, en comparación con la tasa de crecimiento promedio del 1,8 % anual entre 1990 y 2018 (Figura 1.6).

A corto plazo, el crecimiento de las emisiones de CO_2 relacionadas con la energía se ve frenado por aumentos en la eficiencia energética y un cambio gradual del carbón hacia el gas natural y las fuentes de energía renovables. A más largo plazo, el amplio crecimiento demográfico y económico conduce a un aumento de las emisiones.

En los países de la OCDE, las emisiones de CO_2 relacionadas con la energía proyectadas disminuyen ligeramente (-0,2 % anual) hasta 2050 y son un 14 % más bajas que sus niveles de 2005 en 2050, incluso a medida que sus economías se expanden gradualmente. Las emisiones de CO_2 relacionadas con la energía de los países que no pertenecen a la OCDE crecen a una tasa de alrededor del 1 % por año entre 2018 y 2050, más lento que el crecimiento relacionado en el consumo de energía (1,6 % por año).

1.1.3 Consumo energético Nacional

El sector edilicio residencial, comercial y público representa el 33 % de la demanda energética global del país (Figura 1.7). Este se refiere al utilizado para operar los edificios (calefacción, enfriamiento, cocción, calentamiento de agua, funcionamiento de artefactos) una vez. que el mismo ya está construido. Si

consideramos también la energía necesaria para construir el edificio, es decir para la fabricación de materiales (porcentaje que se ubica dentro del sector industrial) y su transporte (porcentaje considerado dentro del sector de transporte) sumaria entre el 45-50%.

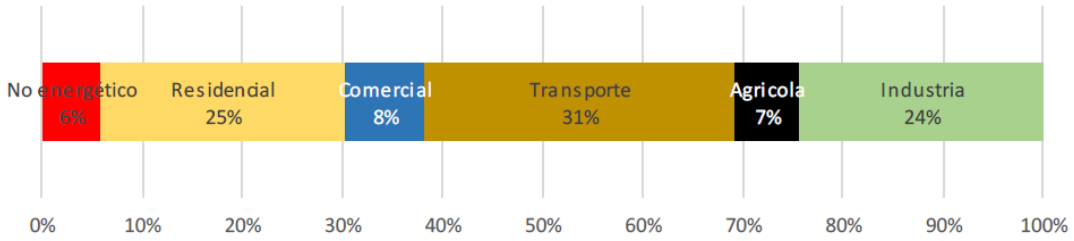


Fig. 1.7: Consumo Final de Energía por Sector (55.687 kTep).

A causa de este consumo, genera el 14 % del total de sus emisiones de CO_2. En nuestro país el total de energía primaria consumida en el 2019, fue de 55687 miles de Toneladas Equivalentes de Petróleo (TEP). A nivel mundial, existe un crecimiento vinculado al aumento de la cantidad de población. Sumado a que el consumo especifico por habitante ha aumentado aproximado el 50%.

El gran consumo energético conlleva a la contaminación ambiental, debido a que la gran mayoría de las fuentes energéticas son de fuentes fósiles. A nivel mundial está por el orden de los 92% y en nuestro país cerca de los 90%. Se entiende la gran responsabilidad que posee el proyectista considerando que la vida útil del edificio es de 80 a 200 años (dependiendo de los materiales, la praxis constructiva y el mantenimiento realizado). Aunque muchas veces se demuele un edificio por considerarlo obsolescente, lo cual, es una práctica no sustentable. Un edificio no energéticamente eficiente, durante toda la vida útil, generará el impacto derivado de su operación, a menos que, reciba un reciclaje energéticamente eficiente (Estévez, 2017). Sin embargo, siendo factible ésta última se debe destacar que el rendimiento alcanzado por los distintos sistemas, serán muy limitados respecto del mismo edificio diseñado desde el Inicio con las estrategias de climatización natural correspondientes.

El estilo de vida también tiene una clara repercusión. En una situación de prosperidad, hay mayor consumo y/o poco cuidado en el uso racional. Con lo cual, aumenta el uso de los recursos, la generación de residuos y finalmente la producción de CO_2. "Los edificios, fundamentales para la vida y el consumo, podrían reducir los efectos ecológicos adversos a través de un mejor proyecto que considere la sostenibilidad" ... "La arquitectura por sí sola no puede resolver los problemas medioambientales del planeta, pero puede contribuir significativamente a la creación de hábitats humanos más sostenibles" (Edwards, 2006).

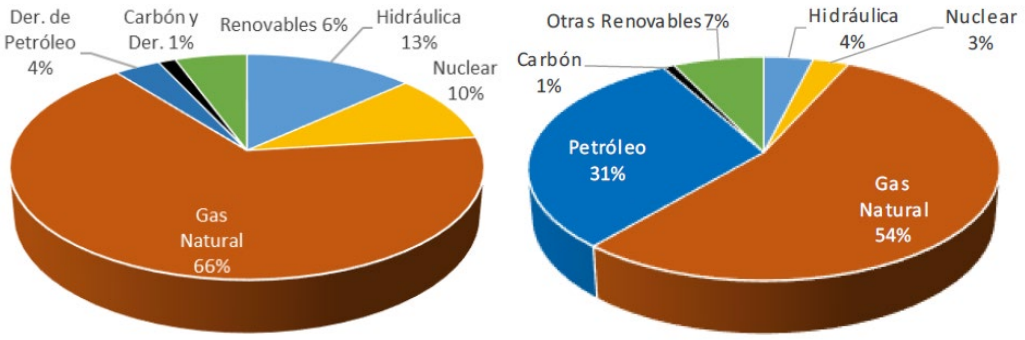


Fig. 1.8: Matriz de Oferta Primaria (kTep) y Matriz de generación eléctrica (kTep)

La matriz de oferta primaria nacional se compone de la producción doméstica más las importaciones menos las pérdidas, variaciones de stock y no aprovechado (Figura 1.9). Para construir la oferta interna total se agrega a la oferta interna primaria el resultado de las importaciones y exportaciones de productos secundarios. La matriz de generación eléctrica (Figura 1.8) se forma con el combustible que ingresa a las centrales para generación, no debe confundirse con la generación efectiva con cada tipo de energía (secretaria de Energía, 2020).

La matriz energética primaria nacional, depende en un 89 % de hidrocarburos con una participación exigua de las energías renovables (menor al 10 %).

1.1.4 Problemática en la construcción y los desechos plásticos

La construcción es una de las actividades que más utiliza recursos naturales. Construir de manera sustentable, más que una tendencia, es hoy en día una necesidad. En un contexto cada vez más global de actuación, la actividad de la construcción, tiene asumido una responsabilidad en busca de soluciones menos agresivas al medio y más sustentables (Sánchez, 2016). El desafío de planificar, proyectar y ejecutar edificaciones sustentables implica necesariamente una amplia relación interdisciplinar y conocimientos científicos y técnicos específicos. Como consecuencia, los beneficios obtenidos, irán más allá de la propia obra, envolviendo aspectos financieros, económicos, sociales y ambientales, en un contexto no sólo regional, sino también global.

En la capital salteña se tiran 58 toneladas diarias de plástico, 71 de papeles y cartón, 29 de vidrio y 9 toneladas de metales. Con el programa Separemos Juntos, que funciona desde 2011 en 14 de los 370 barrios y asentamientos de la ciudad, se recuperan 5 toneladas diarias. Ese volumen representa menos del 3% de las 167 toneladas que se desechan. En el vertedero San Javier, los recuperadores separan otras 10 toneladas en las trincheras (Separemos Juntos, solo cinco toneladas por día (eltribuno.com))

El plástico es un material que forma parte en nuestra vida. Se usa en la industria automovilística, electrónica, edificios, etc. La producción de este material aumentó exponencialmente en los últimos años, lo cual ha llevado a un gran problema ambiental. El desecho de plástico no es un material biodegradable. Reciclar los desechos de plástico para producir nuevos materiales es una de las soluciones para deshacerse de las montañas de basura. Se realizaron varias investigaciones sobre el uso de diversos residuos de plástico como rellenos o agregados en hormigón, como el Tereftalato de polietileno (PET), (Choi, 2005), Poliestireno (PS), (Tang, 2008), Poliestireno Expandido, (Kan, 2009), Cloruro de Polivinilo (PVC), (Kou, 2009), Polietileno de Baja Densidad (LDPE, del inglés Low Density Polythene) (Chaudhary, 2014), Polietileno de Alta Densidad (HDPE, del inglés

Height Density Polythene) (Naik, 1996), en residuos de E-plastic (plástico de alto impacto), en morteros (PET). Las investigaciones indicaron que el plástico reciclado podría reutilizarse como sustitutos parciales de la arena o agregado grueso, (Albano, 2009).



Fig. 1.9: Porcentajes de desechos en nuestro país.

Según la dirección Nacional de Gestión Integral de Residuos el promedio diario de desechos por habitantes es 1,03 kilos, 45000 toneladas diarias (Figura 1.9), una tonelada cada Segundo. Equivalentes a 16,5 millones al año. Se compara con una pirámide de 85 m de base y de altura 6960 m.

1.1.5 Desechos de neumáticos

Según el informe del banco mundial de 2018 ''What a Waste 2.0: A Global Snapshot of Solid Waste Management to 2050" (S. Kaza, L. Yao, 2018), se espera que la generación mundial anual de residuos crezca un 70 % a 3400 millones de toneladas en los próximos 30 años, frente a 2010 millones de toneladas en 2016. A nivel mundial, se ha reconocido que el modelo de fabricar, usar y tirar es insostenible y tiene un impacto perjudicial en los frentes económico, ambiental y de salud pública. Al darse cuenta de esta preocupación, las organizaciones gubernamentales, las partes interesadas privadas y la comunidad científica se han unido para buscar soluciones científicas para el reciclaje de todas las formas de materiales de desecho que puedan respaldar la economía circular de circuito cerrado. Actualmente se están investigando soluciones de reciclaje para diversas formas de materiales de desecho

[2–6] que no solo crearían nuevos negocios y empleo, sino que también ayudarían a minimizar la generación de materiales de desecho.

El reciclaje de los neumáticos al final de su vida útil ELT (del inglés, End of Life Tires) es una de las principales preocupaciones compartidas por la comunidad científica y las organizaciones ambientales debido a su gran volumen de producción y propiedades no biodegradables. Se estima que en todo el mundo se producen anualmente alrededor de mil millones de neumáticos al final de su vida útil. De estos, menos del 50 % se reciclan y el resto forma parte de los vertederos. No solo consumen espacio valioso en los vertederos, sino que también plantean peligros de incendios accidentales, filtración de sustancias tóxicas en el suelo y actúan como caldo de cultivo para los mosquitos. Por lo tanto, los gobiernos de todo el mundo están introduciendo esquemas y regulaciones para fomentar el reciclaje de ELT para mejorar su tasa de utilización. Con una extensa investigación sobre el uso de ELT, se han descubierto varias aplicaciones. Incluyen: recauchutado de ELT; fabricación de productos de caucho moldeado; pirólisis de neumáticos para producir negro de humo y petróleo/gas que puede utilizarse como combustible; uso como combustible alterno en hornos de cemento; en aplicaciones geotécnicas como relleno de subrasante en carreteras y terraplenes; en pavimentos de asfalto modificado con caucho y como reemplazo parcial de agregados en concreto.

Aunque se han publicado algunos artículos de revisión en el pasado que cubren el efecto de algunos métodos de tratamiento del caucho en las propiedades mecánicas y de durabilidad, no cubren todos los métodos de tratamiento y todas las propiedades mecánicas y de durabilidad estudiadas hasta ahora. Por lo tanto, para abordar este vacío en la revisión de la literatura disponible sobre el hormigón de caucho ELT, este documento cubre todos los diversos métodos de tratamiento del caucho y su efecto sobre las propiedades mecánicas del hormigón de caucho desmenuzado estudiado en los últimos 30 años.

1.2 Hacia la sustentabilidad

La mala calidad térmica de las envolventes edilicias (en su gran mayoría no adaptadas a las condiciones climáticas de cada lugar) genera altos consumos energéticos para su climatización interior tanto en verano como en invierno. Alrededor del 50 % de la energía consumida en un edificio corresponde a su calefacción y/o refrigeración (Iannelli y Gil, 2012). Gran parte de este consumo puede ser reducido, durante el invierno, mediante el empleo de colectores solares calentadores de aire ya que el recurso solar resulta ser suficiente en la mayor parte del país. En la región Noroeste de Argentina, que cuenta con la mayor disponibilidad solar a nivel nacional, se puede abastecer del orden del 80 % de la demanda anual de calefacción y en las zonas con disponibilidad solar media se puede llegar al 70%.

Por lo tanto, incluir en la obra pública del sector vivienda una tecnología relativamente barata y de bajo mantenimiento para la calefacción invernal redundaría en una mejora de la calidad de vida y en la disminución de los costos operacionales para el usuario y de importación del gas para el gobierno nacional. Las importaciones de gas en 2019 totalizaron USD 1694 millones y en los primeros once meses del 2020, las compras de gas en estado natural y en estado líquido acumularon USD 1129 millones, con un promedio de 14,8 millones de metros cúbicos diarios de Bolivia por USD 904 millones y USD 225 millones comprados como GNL. La oferta local (124 MMm^3/d) cubre algo más del 85% de la demanda; Bolivia, cerca del 10%; GNL, otro 3% y los líquidos, aproximadamente un 2%. Si no se toman urgentes medidas tendientes al uso racional y eficiente de la energía en el sector vivienda, los volúmenes de gas a importar seguirán creciendo exponencialmente a medida que crezca la población y el parque edilicio en los próximos años a razón del 9% y 15 %, respectivamente, para la presente década (valores extrapolados a partir de los resultados obtenidos en el Censo 2010).

La vivienda social constituye una excelente oportunidad para acceder a un techo digno para los hogares con ingresos medios y bajos. Sin embargo, la demanda supera a la oferta de los planes de vivienda del FO.NA.VI., I.P.V. en Salta, etc. Como estrategia de reducción de esta brecha el gobierno nacional anterior lanzó el

PRO.CRE.AR. (Programa de Crédito Argentino) que consiste en una línea de crédito hipotecario a 20 o 30 años para la construcción de nuevas viviendas o refacción y ampliación de viviendas existentes. También está el programa "Casa Propia", donde el Ministerio de Desarrollo Territorial y Hábitat se propone generar 264 mil soluciones habitacionales para todo el país como así también refacciones.

Sabido es que los planes de vivienda públicos se caracterizan por minimizar los costos constructivos y acelerar los plazos de entrega de las viviendas. Los diseños arquitectónicos optimizan la distribución espacial interior sin atender al tema de la conservación y el uso racional de la energía empleada en su climatización tanto en invierno como en verano. Un mismo prototipo edilicio se construye en regiones de muy distintas condiciones climáticas. Ejemplo de esto es el plan PRO.CRE.AR. que presenta unos pocos diseños fijos de edificios entre los cuales el futuro propietario debe elegir sin importar si su lugar de residencia es Salta, Misiones, Santa Cruz o Catamarca. Si bien existe cierta libertad para la elección de los materiales a emplear en su construcción, el monto del préstamo no permite elegir los materiales más adecuados desde el punto de vista de la conservación de la energía para la construcción de la envolvente edilicia: ladrillos macizos, aislación térmica en cerramientos verticales y techos, ventanas con doble vidrio hermético (DVH), etc. La construcción de la envolvente edilicia con materiales inadecuados conduce inexorablemente a la creación de un monstruo energófago cuyos gastos de funcionamiento en climatización resultan imposibles de cubrir en el presente escenario de energías no subsidiadas instaurado por el actual gobierno nacional.

El acceso a la energía está íntimamente ligado a la calidad de vida de los hogares y al acondicionamiento térmico de las viviendas. En las provincias que disponen de gas por red y electricidad se puede calefaccionar con gas y refrescar con electricidad mientras que en las que sólo hay electricidad se debe utilizar esta fuente energética durante todo el año o bien recurrir al gas licuado a presión (GLP) cuyo precio es muy superior al de red. Por las subas de los servicios de electricidad y el gas, superiores al 1.000 % en algunos casos, el acondicionamiento térmico de

las viviendas insumirá un gran porcentaje de los ingresos familiares, limitando la calidad de vida de las personas y restringiendo sus derechos a la cocción de alimentos y la higiene personal. Esta dura realidad puede revertirse si se aprovechan las fuentes renovables de energía como la solar y la biomasa mediante dispositivos de calefacción de alta eficiencia apropiados a cada región bioclimática del país y se incluye en la obra pública materiales y estrategias constructivas que contribuyan a la conservación de la energía y a la minimización del uso de fuentes de energía convencionales.

El trabajo a desarrollar en esta beca apunta directamente en esa dirección a través del estudio, desarrollo y evaluación experimental de tecnología solar y materiales de construcción termoaislantes innovadores para la vivienda social y de alto valor agregado para la industria nacional.

Los materiales termoaislantes están compuestos de 2 o más materiales de baja conductividad térmica combinados entre sí, finamente dispersados en aire en forma de fibras o escamas, para lograr un sistema de conductividad térmica aún más baja (Incropera y DeWitt, 1990). Estos sistemas están caracterizados por una conductividad térmica efectiva que depende de la conductividad térmica y las propiedades radiactivas del material sólido y de la fracción de huecos incluida en el sistema. Cuando se forman pequeños huecos de aire uniendo o fundiendo porciones de material sólido se obtiene una matriz rígida. Si esos huecos se sellan unos de otros se dice que el sistema aislante es celular (ej. poliestireno expandido conocido como TELGOPOR® o espumas expandidas como el poliuretano). También pueden utilizarse materiales orgánicos naturales para construir sistemas termoaislantes (Asdrubali et al, 2015; Pérez Marín, 2005).

La instalación de estos materiales termoaislantes comerciales en la envolvente de los edificios significa un sobrecosto de obra adicional que puede llegar a ser del orden del 20% del costo total de edificación. Esta es la principal barrera para la concreción de un parque edilicio nuevo que cumpla con estándares mínimos de calidad energética y uso racional de la energía de climatización. En la

obra pública sólo se incluyen aislaciones térmicas en los techos siendo los espesores utilizados insuficientes para lograr un ahorro concreto en el consumo de climatización anual. Es preciso desarrollar sistemas termoaislantes que contribuyan a minimizar los costos iniciales de materiales y mano de obra de instalación para garantizar un período de amortización del sobrecosto inferior a los 10 años. Una alternativa es fabricar revestimientos, bloques y paneles termoaislantes que puedan utilizarse como superficies de acabado exterior y cuya colocación no requiera de mano de obra especializada. En esta tesis se estudiaron distintas configuraciones y combinaciones de materiales de baja conductividad térmica nuevos y/o reciclados para ser combinados en materiales de construcción convencionales formando sistemas termoaislantes de fácil y rápida instalación y que puedan ser incorporados a la obra pública sin generar un sobrecosto importante en la construcción de cada edificio.

Si bien los colectores solares calentadores de aire han llegado a un desarrollo suficiente como para ser transferidos a la industria (Mohamad, 1997; Sopian et al., 1999; Naphon, 2005; Moummi et al., 2004), esta aplicación no está suficientemente difundida en el país y, al presente, no existen empresas nacionales que produzcan y/o comercialicen colectores solares calentadores de aire a escala local ni regional. Esto constituye una excelente oportunidad para la incubación de PyMEs y la generación de nuevos puestos de trabajo genuinos. Actualmente, en nuestro país, para la construcción de los colectores solares calentadores de aire se debe recurrir a la manufactura artesanal (dirigida por algún solarista profesional) lo cual encarece notablemente la inversión inicial necesaria. Y la demanda de esta tecnología ha crecido sostenidamente en los últimos años.

Para aumentar la eficiencia energética de estos prototipos es preciso mejorar la calidad termo-óptica de la cobertura superficial de la placa absorbedora generando lo que se conoce como una “superficie selectiva”. El director de esta tesis ha desarrollado un tratamiento de oxidación alcalina para obtener una superficie selectiva caliente sobre un sustrato de hierro que puede ser aplicado para la

construcción de placas absorbedoras de radiación solar (Quiñonez y Hernández, 2014). En esta tesis se desarrolló un colector solar calentador de aire de alta eficiencia con el absorbedor selectivo caliente obtenido anteriormente, con costos de fabricación adecuados a la vivienda de interés social. Se pretende al final del desarrollo disponer de un producto confiable, de bajo mantenimiento y rápidamente transferible al potencial mercado productor/comercializador interesado en invertir en esta tecnología.

La acumulación de energía en materiales con cambio de fase en el rango de temperaturas registrados en un edificio es una alternativa interesante para controlar la amplitud térmica interior dentro de los 5 °C considerados como aceptables para el confort térmico humano (Tatsidjodoung et al., 2013; De Grazia et al., 2015). En Tesis se estudia la forma de incorporar materiales de cambio de fase en mampuestos que puedan servir de revestimientos para interiores.

Mediante la simulación computacional se pueden comparar las mejoras termo-energéticas logradas en un diseño edilicio al incluir distintas tecnologías constructivas bioclimáticas en forma rápida y sin tener la necesidad de construir modelos a escala para evaluarlos experimentalmente. En esta Tesis se utilizará el simulador SIMEDIF desarrollado en el INENCO (Flores y Lesino, 2001) para analizar comparativamente el desempeño termo-energético de un prototipo de vivienda social convencional y del mismo prototipo con el agregado de los materiales termoaislantes y del colector solar calentador de aire desarrollado en esta Tesis.

Para obtener una base de datos de variables meteorológicas horarias de todo el año, que servirá de insumo para las simulaciones, se realizó un trabajo estadístico con datos medidos durante 11 años en la Universidad Nacional de Salta siguiendo los lineamientos de creación del año meteorológico típico (TMY) (Pissimani et al., 1988). Para el análisis económico del ahorro de combustibles convencionales logrado mediante las estrategias bioclimáticas incorporadas en la vivienda se debe realizar el estudio del consumo energético del edificio durante todo el año y por esta razón se precisa disponer de una base de datos meteorológicos

confiable obtenida mediante el procesamiento estadístico de valores medidos en el lugar de interés.

1.3 Objetivos

1.3.1 General

El objetivo general es el desarrollo y evaluación termo-energética de nuevos materiales de construcción y dispositivos de colección solar a emplear en la construcción de viviendas de interés social con el objeto de reducir el alto consumo de energía primaria de climatización que se registra en el sector, contribuyendo así a disminuir la generación de gases de efecto invernadero (GEI) y sus impactos sobre el medio ambiente.

1.3.2 Específicos

- Generación, a partir de datos meteorológicos medidos en la ciudad de Salta, de una base de datos meteorológica horaria para cada día del año bajo el concepto de Año Meteorológico Típico.
- Diseño, fabricación y evaluación térmica de revestimientos para paredes.
- Diseño, fabricación y evaluación térmica de bloques de construcción termo-aislantes construidos con materiales reciclados.
- Diseño, fabricación y evaluación térmica de revestimientos termo-aislantes para pisos.
- Estudio comparativo de distintas tipologías de colector solar calentador de aire con matriz porosa y evaluación analítica de los parámetros de mayor influencia sobre la eficiencia de colección a fin de optimizar su diseño.
- Diseño, construcción y evaluación termo-energética de un colector solar calentadores de aire con matriz porosa con tratamiento selectivo adaptable a la vivienda de interés social tanto arquitectónica como económicamente.
- Diseño, construcción y evaluación termo-energética de dispositivos de acumulación térmica con materiales de cambio de fase para su inclusión en la construcción de edificios de interés social.

- Evaluación comparativa, mediante simulación computacional, del comportamiento termo-energético de prototipos de vivienda social con y sin los nuevos materiales de construcción desarrollados y los datos de variables meteorológicas correspondientes al Año Meteorológico Típico.

1.4 Originalidad del Tema

Tenemos una amplia gama de soluciones que permiten mejorar la eficiencia térmica de una vivienda, desde aquellas más conocidas que consisten en colocar capas de material aislante en el interior o exterior de los muros, hasta soluciones más novedosas como la incorporación de aislante en el centro de un muro de hormigón, el uso de hormigón celular y los moldes de poliestireno expandido. En nuestro país es muy común en las viviendas sociales la mampostería de ladrillos huecos y bloques de hormigón simple, dentro de sus ventajas se encuentra la de poder mejorar su resistencia térmica mediante el relleno de sus huecos con material aislante suelto.

Sin embargo, todos los ejemplos nombrados con anterioridad, no presentan un único material que reúna las propiedades de aislación térmica, sino un sistema constructivo conformado por varios materiales de diferentes características. Esto lleva a un mayor costo en la ejecución constructiva, con la necesidad de incorporar varios materiales y debiendo tener especial cuidado en las uniones para evitar los puentes térmicos.

La originalidad del tema de tesis se fundamenta en el diseño de nuevos materiales, como el agregado de desechos de polietileno de alta y baja densidad a las dosificaciones de concreto y hormigón, siendo estos tipos de plásticos lo que más se desechan en el país y el mundo. Este tipo de material se comporta como un hormigón estructural y además tenga propiedades térmicas que contribuyan a la eficiencia energética edilicia. Luego para la envolvente de la vivienda se construyó un ladrillo de alta resistencia térmica (el doble que los ladrillos cerámicos huecos y el triple que los bloques de hormigón) y de resistencia a la compresión (apto para la

construcción de viviendas de dos pisos). También se construyeron baldosas resistentes y térmicamente aislantes (comparadas con las convencionales).

El plástico utilizado en esta tesis es el residuo reciclado de los vertederos y los desechos de EPS vienen de fábricas de placas de poliestireno expandido. El caucho es reciclado de los neumáticos.

Para obtener las propiedades de transmisión de calor de los ladrillos y/o bloques se necesitó realizar el diseño y la construcción de una Caja Caliente con Guarda. La misma, por medio de dos probetas mellizas, obtiene la conductividad térmica de dichos materiales. Este artefacto de medida también es novedoso, porque la institución ni la Universidad contaba con estos ensayos.

El colector de aire es novedoso por la geometría de la placa absorbedora y además la matriz porosa utiliza viruta reciclada de las herrerías. El Año Meteorológico Típico realizado de la provincia de Salta también es novedoso, ya que no se contaba con un año típico de nuestra ciudad. Finalmente, el material de cambio de fase estudiado engloba todo para así tener una vivienda social más eficientemente energética.

Se caracterizaron seis diferentes PCM, con diferentes puntos de fusión. Se obtuvieron los calores específicos y latentes. Estos valores fueron introducidos en ecuaciones, para luego simularlos mediante un programa y obtener el comportamiento térmico de la pared con PCM.

Capítulo 2

Generación del Año Meteorológico Típico de la ciudad de Salta

2.1 Introducción

Contar con información meteorológica completa y precisa es crucial para obtener resultados confiables en Simulación Energética de Edificios. Es necesario conocer diversos parámetros meteorológicos como temperatura de bulbo seco, humedad relativa, velocidad y dirección de viento, presión atmosférica, radiación solar, etc., representativos del clima en la localidad donde el edificio está/será construido o mejorado si ya existiera.

De manera más sofisticada, ASHRAE (American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers) usa modelos que permiten reconstruir la variación de los parámetros de interés a lo largo de las 24 horas de un día típico estacional o mensual (ASHRAE, 2009).

La respuesta térmica de un edificio en un día cualquiera depende generalmente de las condiciones meteorológicas del día anterior, efecto que es imposible de captar usando el concepto de día típico mensual o estacional. Para ello es necesario contar con información meteorológica continua a lo largo de todas las estaciones, esto es, a lo largo de un año entero considerado representativo del lugar. Tal información puede organizarse de varias maneras, habiéndose elegido aquí el concepto de Año Típico Meteorológico (del inglés, Typical Meteorological Year, TMY) introducido por (Hall et al., 1978). Un TMY es un conjunto de datos meteorológicos horarios que representan las condiciones meteorológicas consideradas típicas de una localidad dada en un periodo relativamente largo.

2.2 Zonas bioambientales

Las zonas bioambientales se definen de acuerdo con el mapa de la Figura 2.1. Esta clasificación se ha desarrollado teniendo en cuenta los índices de confort de la temperatura efectiva corregida (TEC), correlacionada con el voto medio predecible (VMP) y el índice de Beldin y Hatch (IBH), desarrollados para las zonas

cálidas. La evaluación de las zonas frías no se ha realizado con los índices de confort, sino con los grados días para las necesidades de calefacción.

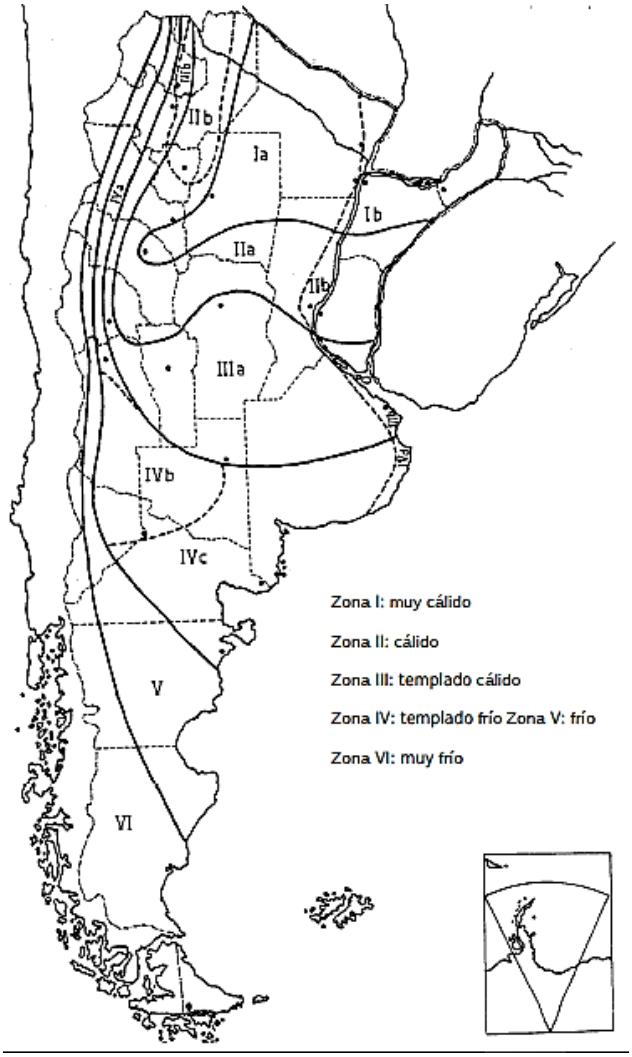


Fig. 2.1: Detalle del mapa bioambiental de la República Argentina (extracto de la norma IRAM 11603, 1996).

Los valores de temperatura efectiva corregida (TEC) fueron utilizados exclusivamente para la realización de la clasificación bioambiental. Estos valores no deben ser utilizados para efectuar balances térmicos tendientes a dimensionar instalaciones de aire acondicionado. A tal efecto, se deben usar los valores de temperatura de bulbo seco y de humedad relativa o temperatura de bulbo húmedo para los días típicos de diseño (IRAM 11603, 1996).

2.3 TMY en nuestro país

En nuestro país, pocas localidades cuentan con su TMY, Bre el al. (2016) describe la generación del año meteorológico típico para 15 localidades a lo largo de la Región Litoral en el noreste de Argentina (Tabla 2.1). El autor obtiene datos meteorológicos disponibles en cada lugar, entre otros, temperaturas de bulbo seco y punto de rocío, velocidad del viento y cobertura total del cielo, medidos cada hora durante el período 1994-2014 por el Servicio Meteorológico Nacional (SMN) de Argentina. Dos de estos lugares tienen solamente la radiación solar cada hora durante algunos años. Estas mediciones de radiación los usaron para calibrar un modelo de radiación solar de Zhang-Huang existente que luego se usó para calcular la radiación solar por hora para toda la base de datos meteorológicos.

Tabla. 2.1: Ciudades del Litoral con TMY

Location	Latitude [S]	Longitude [W]	Altitude [m.a.s.l.]
Ceres	29°52′	61°57′	88
Concordia	31°18′	58°10′	38
Corrientes	27°26′	58°45′	62
Formosa	26°12′	58°13′	60
Gualeguaychú	33°00′	58°37′	21
Iguazú	25°43′	54°28′	270
Monte Caseros	30°16′	57°39′	54
Paraná	31°46′	60°28′	78
Paso de los Libres	29°40′	57°09′	70
Posadas	27°22′	55°58′	125
Pcia. R. Sáenz Peña	26°49′	60°27′	92
Reconquista	29°10′	59°42′	53
Resistencia	27°27′	59°03′	52
Rosario	32°55′	60°46′	25
Sauce Viejo	31°42′	60°49′	18

Para el desarrollo del TMY de la ciudad de Santa Fe Bre et al. (2014), el autor recorre al archivo climático correspondiente a la ciudad brasileña de Uruguaiana (Roris, 2012), la localidad con año típico conocido de condiciones climáticas más próximas a las de la ciudad de Santa Fe. Definió el TMY de la ciudad de Santa Fe en base a los datos proporcionados por el Servicio Meteorológico Nacional (SMN) de Argentina, registrados en el Aeropuerto de Sauce Viejo en el período 2000-2013. Los datos aportados por el SMN no incluyen Radiación Solar Global (RSG), variable de primordial importancia para la definición del TMY. Entonces los autores recurrieron a datos de RSG provistos por el Centro de Informaciones Meteorológicas (CIM) de la

Facultad de Ingeniería y Ciencias Hídricas (FICH) de la Universidad Nacional del Litoral (UNL). Dichos datos fueron registrados en el campus de la Facultad, sito en la Ciudad Universitaria de la UNL, en la ciudad de Santa Fe. Los datos fueron registrados cada 10 a 15 minutos en el período octubre 2008-abril 2014. Desafortunadamente, los datos de RSG de CIM no tienen la completitud necesaria para ser incluidos directamente en un análisis estadístico. Por dicha razón, decidieron calcular la RSG mediante el modelo de (Zhang y Huang, 2002), y utilizar el año más completo de los registrados por (CIM, 2010) para validar el modelo y obtener nuevos parámetros de ajuste. El mismo procedimiento fue aplicado para generar el TMY de la ciudad de La Plata, (Bre, 2017).

Por último, la Ciudad Autónoma de Buenos Aires (CABA) tiene definido su TMY (ASHRAE, 2009b).

2.4 Características climáticas de la ciudad de salta

La ciudad de Salta (1232 msnm), capital de la provincia homónima, se encuentra en la zona bioambiental III, Subzona IIIa (IRAM 11603, 1996). Esta zona es templada cálida limitada por las isolíneas de TEC 24,6 °C y 22,9 °C, esta zona tiene igual distribución que la zona II, con la faja de extensión Este-Oeste centrada alrededor del paralelo 35° y la de extensión Norte-Sur, ubicada en las primeras estribaciones montañosas al Nordeste del país, sobre la Cordillera de los Andes. Los veranos son relativamente calurosos y presentan temperaturas medias comprendidas entre 20 °C y 26 °C, con máximas medias mayores que 30°C, sólo en la faja de extensión Este-Oeste. El invierno no es muy frío y presenta valores medios de temperatura comprendidos entre 8°C y 12°C, y valores mínimos que rara vez son menores que 0 °C. Las presiones parciales de vapor de agua son bajas durante todo el año, con valores máximos en verano que no superan, en promedio, los 1 870 Pa (14 mm Hg). En general, en esta zona se tienen inviernos relativamente benignos, con veranos no muy calurosos. Esta zona se subdivide en dos subzonas: a y b, en función de las amplitudes térmicas.

- Subzona IIIa: amplitudes térmicas mayores que 14 °C.

- Subzona IIIb: amplitudes térmicas menores que 14 °C.

2.5 TRY, TMY, TMY2, TMY3 y IWEC

En la actualidad existen dos tipos comunes de datos meteorológicos típicos adoptados para la construcción de simulaciones energéticas: el Año de Prueba de Referencia (o del inglés Test Year of Reference TRY) y el Año Meteorológico Típico (TMY). En un TRY, la información climática de 8.760 h para un año en particular se selecciona por un procedimiento simple establecido por la Sociedad Americana de Ingenieros de Calefacción, Refrigeración y Aire Acondicionado (ASHRAE) en 1970, (DOES, 1980). En todo el proceso de selección, sólo se adopta un único índice climático, el de la temperatura de bulbo seco. Todos los meses de los años candidatos en el período de estudio se clasifican alternando entre la mitad caliente (noviembre-abril) y la mitad fría (mayo -octubre) del año. Los meses extremos se colocan en el orden de la temperatura promedio mensual de bulbo seco. Se selecciona un TRY eliminando aquellos años candidatos en el período de estudio que contienen meses con temperaturas de bulbo seco extremadamente altas o bajas. El proceso de eliminación se continúa hasta que sólo queda un año que es la TRY seleccionada.

Durante la selección de TRY, los meses candidatos con temperaturas de bulbo seco mensuales extremadamente altas o bajas se eliminan progresivamente, resultando en un año particularmente suave que puede no ser capaz de representar la condición climática típica a largo plazo. La construcción de simulaciones de energía utilizando datos meteorológicos del TRY es obviamente menos fiable en la reproducción de las condiciones históricas promedio, (Hui, 1996). Las cintas TRY de tiempo fueron desarrolladas originalmente por el Centro Nacional de Datos Climáticos de los Estados Unidos para propósitos de investigación. ASHRAE declaró que el TRY no se recomienda para su uso en el estudio de mediano y largo plazo del rendimiento de los edificios, (ASHRAE, 1989).

El servicio climático alemán (DWD) y el holandés tienen múltiples investigaciones respecto a la actualización y mejora del TRY. El DWD tiene TRYs que

no solo cubren más de diez parámetros, sino que también tienen metodologías para calcular TRYs para años extremos.

TMY es otro tipo común de datos meteorológicos que es ampliamente adoptado por varios investigadores. Como se dijo anteriormente, un conjunto de datos de TMY proporciona datos meteorológicos de un año completo que representan las condiciones climáticas en una ciudad específica durante un período de tiempo razonablemente largo. En la selección de un TMY se utilizan los datos de nueve índices climáticos críticos incluyendo las temperaturas máximas diarias, mínimas y medias de bulbo seco y punto de rocío; el máximo diario y la velocidad media del viento y la radiación solar global horizontal total diaria.

Para el procedimiento de selección del TMY, Hall et al. (1978) desarrollaron conjuntos de datos meteorológicos TMY para 26 estaciones de SOLMET en EE.UU. (conocido como el método Sandia), (Hall, 1978). En 1994, la Base Nacional de Datos de Radiación Solar (NSRDB) siguió el método Sandia con factores de ponderación modificados (como se muestra en la Tabla 1) para generar 239 conjuntos de datos TMY para una serie de estaciones meteorológicas en Estados Unidos, (Marion, 1995). Este nuevo conjunto de datos meteorológicos TMY fue etiquetado como TMY2.

Del mismo modo, un conjunto de archivos meteorológicos TMY fue producido por ASHRAE en 1997 mediante el uso de otro conjunto de nuevos factores de ponderación (véase Tabla 2.1] para los índices climáticos utilizados en el método de Sandia, (ASHRAE, 2002). Este conjunto de datos, denominado como los archivos meteorológicos del Clima Internacional Para Cálculos Energéticos (International Weather for Energy Calculation (IWEC)), contiene archivos meteorológicos de TMY por hora para 227 ciudades ubicadas en más de 70 países diferentes. En 2007, un nuevo conjunto de datos meteorológicos TMY (titulado TMY3), fue generado por el National Renewable Energy Laboratory (NREL), (Wilcox, 2008). Estos archivos meteorológicos TMY3 proporcionan datos meteorológicos actualizados con una mayor cobertura en más de 1000 ubicaciones en Estados Unidos.

En esta Tesis se desarrolló un año meteorológico típico con un método que combina los factores de ponderación de los conjuntos generadores de TMY mencionados anteriormente. El método se lo nombro TMYPlus.

Durante el proceso de desarrollo de un TMY, los TMM (Typical Meteorological Months) se seleccionan para representar las propiedades a largo plazo de los datos meteorológicos. Las condiciones meteorológicas extremas causadas por eventos atípicos se filtran para asegurar que el archivo meteorológico TMY puede representar la condición climática a largo plazo (Dobos, 2012). Para el análisis financiero de un proyecto, por ejemplo "solar", estos eventos atípicos pueden representar los peores años que afectan significativamente la decisión financiera del proyecto. Dado que los archivos TMY no incluyen datos meteorológicos de los años potencialmente peores, son más apropiados para estudiar el desempeño a largo plazo de un sistema solar en lugar de para la toma de decisiones financieras.

Para la decisión financiera sobre el proyecto se desarrollaron los datos meteorológicos P50 y P90 que se consideran más adecuados para este propósito, (Dobos, 2012). P50 y P90 representan los datos de un año típico en el que se superan los valores del 50% o 90%, respectivamente, de todos los años estudiados, mientras que los datos meteorológicos TMY son más adecuados para estudiar el rendimiento medio a largo plazo de un sistema térmico.

2.6 TMYs en el mundo

Para modelar y estudiar la dispersión de contaminantes en la atmósfera, generalmente se adoptan datos a largo plazo (conocido como enfoque clásico). En Italia, (Mandurino y Vestrucci, 2009) exploraron la posibilidad de utilizar un TMY generado con un nuevo conjunto de factores de ponderación (10/16 para la velocidad media del viento, 5/16 para la radiación global y 1/16 para la temperatura media) que fue evaluado mediante un método de comparación de parejas, con la participación de un grupo de expertos. El resultado de la simulación utilizando el

nuevo archivo meteorológico de TMY demostró un buen acuerdo con los resultados obtenidos mediante la simulación multianual de datos a 10 años.

Los años meteorológicos típicos para ocho ciudades con diferentes climas en China fueron generados por Jiang, (Jiang, 2010), utilizando los datos meteorológicos disponibles de un período de 1995-2004 y el método de Sandia. Según el juicio de los autores, se asignaron factores de ponderación relativamente grandes de 0,5 (0,25 para la radiación solar global y 0,25 para la radiación solar directa) y 0,25 (para la temperatura del bulbo seco). La razón es que la radiación solar y la temperatura de bulbo seco representan una parte significativa de la carga de enfriamiento del edificio; Y los otros índices climáticos son más o menos dependientes de la cantidad de radiación solar.

En Nigeria, los años meteorológicos típicos para cinco localizaciones diferentes fueron desarrollados por Ohunakin et al. (2013). Los autores asignaron intuitivamente los valores de los factores de ponderación para los principales parámetros meteorológicos. Los factores de ponderación de 5/12 y 2/12 se asignaron a la radiación solar global ya la temperatura media de bulbo seco, respectivamente, mientras que los otros parámetros meteorológicos recibieron iguales factores de ponderación con una suma de hasta 5/12. Estos TMYs se generaron principalmente para su aplicación en sistemas de energía solar. En el estudio de Rahman & Dewsbury et. al. (2007) aplicaron el método de Sandia para seleccionar datos meteorológicos típicos de Subang, Malasia con seis conjuntos de factores de ponderación arbitrariamente asignados para cuatro parámetros meteorológicos. El estudio reveló que los datos meteorológicos típicos seleccionados mediante el uso de factores de ponderación iguales eran adecuados para la construcción de simulaciones de energía, salvo que hubiera razones para utilizar otra combinación de factores de ponderación para seleccionar los datos meteorológicos típicos para su aplicación en otros sistemas energéticos. El autor A.L.S. Chan, (Chan, 2016) desarrolló un nuevo generador de archivos meteorológicos utilizando algoritmos genéticos (AG). Mediante el empleo de este generador de

archivos meteorológicos, se pueden generar conjuntos óptimos de factores de ponderación para desarrollar archivos TMY apropiados para diferentes sistemas energéticos.

Los estudios previos realizados por diversos investigadores concluyen que un conjunto de factores de ponderación correctos desempeña un papel crucial en la generación de archivos meteorológicos TMY apropiados para la simulación computacional de diferentes aplicaciones. Sin embargo, no existe ningún principio fundamental o acuerdo general sobre la asignación de los valores de los factores de ponderación a los factores climáticos en la generación de TMY.

2.7 Factores de ponderación

Los valores de los factores de ponderación de los índices climáticos utilizados en el método de Sandia desempeñan un papel importante en el proceso de generación de TMY. Estos factores de ponderación expresan la importancia relativa del impacto de un determinado índice climático sobre el rendimiento térmico y energético de un edificio o un sistema energético. Existen varios conjuntos de factores de ponderación adoptados por diferentes investigadores. Los utilizados en esta Tesis se detallan en la Tabla 2.2. Los valores de estos factores de ponderación se asignaron principalmente de acuerdo con la experiencia del investigador sobre la influencia de los índices climáticos en el rendimiento térmico.

Tabla 2.2: Conjuntos de factores de ponderación para varios índices climáticos.

Índice climático	TMY1 [Hall]	TMY2 [Marion] TMY3 [Wilcox]	IWEC	AG [Chan]	TMYPlus
Temp. de bulbo seco MAX	1/24	1/20	5/100	0.061	0.0416
Temp. del bulbo seco MIN	1/24	1/20	5/100	0.003	0.0416
Temp. de bulbo seco MED	2/24	2/20	30/100	0.258	0.0833
Temp. del punto de rocío MAX	1/24	1/20	2.5/100	0.106	0.05

Temp. del punto de rocío MIN	1/24	1/20	2.5/100	0.008	0.05
Temp. del punto de rocío MED	2/24	2/20	5/100	0.017	0.1
Velocidad del viento MAX	2/24	1/20	5/100	0.146	0.05
Velocidad del viento MED	2/24	1/20	5/100	0.082	0.05
Radiación horizontal global	12/24	5/20	40/100	0.319	0.319

Para citar algunos trabajos de investigación anteriores llevados a cabo por investigadores sobre este tema, Bre F. y Fachinotti V. (Bre F., 2014) desarrollaron un año meteorológico típico para la región del litoral argentino, utilizando el método de Hall o comúnmente llamado TMY1. Yang y Lu (Yang H. y Lu I., 2011), investigaron el efecto del año meteorológico típico (TMY) y el ejemplo del año meteorológico (EWY) sobre los resultados de simulación de energía de edificios e híbridos solares-eólicos.

De acuerdo a la experiencia previa de los autores y el juicio académico, se asignaron altas ponderaciones a la radiación solar y a la velocidad del viento (11/24 para cada una) para generar un TMY. Se realizó una simulación por computadora para evaluar el rendimiento energético de un sistema híbrido de energía solar-eólica utilizando el archivo meteorológico TMY generado por los autores. El resultado mostró que, para el sistema híbrido de energía solar-eólica, se pudo encontrar una diferencia máxima del 20% en el resultado de la simulación en comparación con la salida simulada utilizando un archivo meteorológico TMY generado con los factores de ponderación originales de Hall, concluyendo que el método EWY no es el apropiado para representar el archivo meteorológico anual.

2.8 Procedimientos de selección del mes meteorológico típico TMM

En este capítulo, el desarrollo del archivo de datos meteorológicos TMY básicamente sigue los procedimientos de selección del método Sandia TMY, TMY2, IWEC, CHAN y TMYPlus. En los cinco métodos, nueve índices climáticos críticos incluyendo las temperaturas máximas diarias, mínimas y medias de bulbo seco y del punto de rocío; máxima diaria y velocidad media del viento; y la radiación solar global horizontal total diaria se evalúan utilizando las estadísticas de Finkelstein-Schafer (FS) para seleccionar 12 TMM. Para cada mes candidato en cada año individual, se determina la función de distribución acumulativa (CDF, del inglés Cumulative Distribution Function) para cada uno de los nueve índices climáticos. La CDF para cada índice climático x se define de la siguiente manera en la ecuación 2.1:

$$S_n(x) = \begin{cases} 0 & si \quad x < x_1 \\ \frac{(k-0,5)}{n} & si \quad x_k \le x < x_{k+1} \\ 1 & si \quad x > x_n \end{cases} \tag{2.1}$$

Donde:

$S_n(x)$ = valor de la CDF en x.
n=número total de datos examinados (en esto caso la cantidad de días del mes examinado).
k=orden de la posición del dato examinado (k=1, 2,..., n-1).

De su definición, $S_n(x)$ es una función escalonada monotónicamente creciente con pasos de tamaño 1/n que ocurre en x_i y está limitado por 0 y 1.

Utilizando la misma ecuación, Ecuación. (2.1), también se evalúan los valores de CDF a largo plazo que cubren todo el período de los años estudiados. La Ecuación. (2.2) que se muestra a continuación se utiliza para calcular la diferencia absoluta (estadística FS) entre el CDF a corto plazo de un mes candidato en un año individual y el CDF a largo plazo para medir el grado de cercanía o semejanza.

$$FS_x(y,m) = \frac{1}{N}\sum_{i=1}^{N}\left|CDF_m(x_i) - CDF_{y,m}(x_i)\right| \tag{2.2}$$

Donde:

FS=estadísticas de Finkelstein-Schafer
y=año (1 al 11 para los años 2006-2016 en este estudio)

m=mes (1 al 12)
N=números de lecturas no repetidas durante el período de largo plazo para un mes candidato

Tabla 2.3: estadísticas de Finkelstein-Schafer de enero a mayo del 2006.

INDICE CLIMATICO	FS ene 06	FS feb 06	FS mar 06	FS abr 06	FS may 06
TBSMAX	0,03676968	0,03510335	0,04715543	0,07025814	0,08838103
TBSMIN	0,03085554	0,12278824	0,04906384	0,02995338	0,02285368
TBSMED	0,03121072	0,0379249	0,06524927	0,0332211	0,08775096
TrMAX	0,04029071	0,11783767	0,096652	0,05252525	0,11549741
TrMIN	0,03383713	0,12902179	0,07697947	0,03212121	0,04912023
TrMED	0,04015339	0,12257885	0,08363636	0,04412121	0,08053237
VV MAX	0,02932551	0,06393865	0,03250244	0,02659933	0,03770423
VV MED	0,0447778	0,05703769	0,0846395	0,05479798	0,04288856
RADIACION	0,20310283	0,02992991	0,03734115	0,04743992	0,10084193

A modo de ejemplo del procedimiento, en la Tabla 2.3 se detallan los índices climatológicos con las estadísticas de Finkelstein-Schafer para cada uno, correspondiente a los meses de enero hasta mayo del año 2006. Los índices climáticos de la primera columna son temperatura de bulbo seco máxima (TBSMAX), temperatura de bulbo seco minima (TBSMIN), temperatura de bulbo seco media (TBSMED), temperatura de rocío máxima (TrMAX), temperatura de rocío minima (TrMIN), temperatura de rocío media (TrMED), velocidad del viento máxima (VV MAX), velocidad del viento media (VV MED) y radiación horizontal global (RADIACION).

Para reflejar la importancia relativa de cada índice climático en la selección del TMM, se aplica un conjunto de factores de ponderación (WF, del inglés Weighting Factors) para calcular una suma ponderada (WS) de las estadísticas del FS, expresadas en la Ecuación (2.3). Un resumen de los factores de ponderación para los

nueve índices climáticos se enumera en la Tabla 2.2. En este desarrollo del TMYPLUS se utilizaron los cuatros conjuntos de factores de ponderación.

$$WS(y,m) = \sum_{j=1}^{9} FS_j(y,m) * WF_j \quad (2.3)$$

Donde:

WS=suma ponderada
WF_j=conjunto de factores de ponderación
FS_j=estadísticas de Finkelstein-Schafer

Tabla 2.4: suma ponderada para cada índice climático de enero 2006.

INDICE CLIMATICO	FS * WF (TMY)	FS * WF (TMY2)	FS * WF (IWEC)	FS * WF (CHAN)	FS * WF (TMYPLUS)
TBSMAX	0,0015	0,0018	0,0018	0,0022	0,0015
TBSMIN	0,0013	0,0015	0,0015	0,0001	0,0013
TBSMED	0,0026	0,0031	0,0094	0,0081	0,0026
TrMAX	0,0017	0,0020	0,0010	0,0043	0,0020
TrMIN	0,0014	0,0017	0,0008	0,0003	0,0017
TrMED	0,0033	0,0040	0,0020	0,0007	0,0040
VV MAX	0,0024	0,0015	0,0015	0,0043	0,0015
VV MED	0,0037	0,0022	0,0022	0,0037	0,0022
RADIACION	0,1016	0,0508	0,0812	0,0648	0,0914
WS	**0,1196**	**0,0687**	**0,1016**	**0,0884**	**0,1082**

En la Tabla 2.4, cada columna es el resultado de la aplicación de la ecuación (2.3), mientras que la última fila es la suma ponderada (WS) de cada desarrollador TMY, todos correspondientes al mes de enero del 2006. Así sucesivamente se realiza el mismo procedimiento para cada mes de cada año de muestra.

Los valores de WS se calculan para cada mes candidato de cada año individual. Entonces todos los meses se clasifican en un orden ascendente según sus

valores de WS. Para cada mes, se seleccionan cinco meses candidatos con los valores WS más bajos para una selección adicional.

En el método de Sandia, se incorpora una estructura de persistencia con el fin de excluir los meses candidatos con el mes más largo (cantidad de días) o el más corto. Los percentiles fijos a largo plazo serán evaluados para la frecuencia y duración de la temperatura media de bulbo seco y radiación solar total diaria, sirviendo como criterio adicional para seleccionar un TMM de los cinco meses candidatos previamente identificados (con los valores de WS más bajos). Sin embargo, IWEC (ASHRAE, 2002) comentó que los cinco meses candidatos con los valores más bajos WS se puede rechazar mediante el criterio de estructura de persistencia en la etapa de selección final implementada por el método Sandia. En el presente estudio se siguió la recomendación del IWEC y no se adoptó la estructura de persistencia. El mes candidato con el valor WS más bajo se identificó como el TMM, ya que la suma ponderada WS me da cuan alejado estoy de la media de largo plazo analizada (en este caso 11 años de datos).

Los valores de la suma ponderada (WS) de las estadísticas del FS para cada mes candidato (Ene-Dic) del período de 11 años (2006-2016) se tabulan en la Tabla 2.3. Como se indica, los valores de WS impresos en negrita y subrayados identifican los TMMs candidatos de cada método.

2.7 Año meteorológico típico de salta (TMYPLUS)

Para el desarrollo del TMYPLUS se realizó el seleccionado del TMM candidato aplicando cinco diferentes métodos para la generación del TMY. El primero método consta del llamado TMY1, (Hall, 1978) cuyos factores de ponderación se muestran en Tabla 1, de manera similar para los demás métodos; TMY2 y TMY3 (Marion, 1995); IWEC (ASHRAE, 2002) y el método generado con el Algoritmo Genérico (AG) por el autor Chan (Chan, 2016). El quinto método es una combinación de los factores de ponderación de los cuatro conjuntos de WF que componen los métodos antes mencionados. Este método como se dijo es el TMYPlus, que finalmente se aplica para seleccionar el TMM de nuestro archivo final meteorológico.

Para tener una comparación cuantitativa entre estos cinco perfiles, se calcularon los valores de error de desviación medio (MBE) y el error cuadrático medio (RMSE) para estos cinco TMYs contra el promedio de 11 años. En base a estos errores se seleccionó el conjunto óptimo de factores de ponderación para sus respectivos índices climáticos que componen el TMYPlus. Las definiciones de MBE y RMSE se expresan en las ecuaciones (2.4) y (2.5) respectivamente.

$$MBE = \frac{\sum_{i=1}^{12}(v_i - w_i)}{12} \tag{2.4}$$

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{12}(v_i - w_i)^2}{12}} \tag{2.5}$$

Donde:
V_i=valor medio mensual para TMY o TMY2 o IWEC o CHAN o TMYPlus.
W_i=valor medio mensual de la media a largo plazo de 11 años, ecuación (2.6)

$$w_i = \frac{\sum_{j=1}^{11} v_i}{11} \tag{2.6}$$

2.7.1 Descripción de los datos

Para caracterizar las condiciones meteorológicas típicas en la ciudad de Salta (Lat. -24.7°, Long. -65.5° y 1232 msnm), partimos de datos proporcionados por el Servicio Meteorológico Nacional (SMN) registrados en el período 2006-2016 por el Aeropuerto Internacional Martin Miguel de Güemes y por el Instituto de Investigaciones de Energía No Convencional (INENCO). Las variables registradas son: Radiación Solar Global Horizontal, Temperaturas de Bulbo Seco, de Punto de Rocío, Bulbo Húmedo, Dirección del Viento, Velocidad del Viento, Presión Atmosférica y Humedad Relativa. Normalmente, el intervalo entre los registros del SMN es de una hora, mientras que los datos de radiación fueron medidos cada 15 minutos y constan de al menos 11 años de datos. La medición de la radiación fue tomada con un piranómetro KIPP ZONEN CM3 por el investigador Ricardo Echazú del INENCO.

2.7.2 Meses meteorológicos típicos

El procedimiento descrito se repite para todos los demás meses del año, produciendo las Tabla 2.5 para el mes de enero, Tabla 2.6 para el mes de febrero,

Tabla 2.7 para el mes de marzo, Tabla 2.8 para el mes de abril, Tabla 2.9 para el mes de mayo, Tabla 2.10 para el mes de junio, Tabla 2.11 para el julio, Tabla 2.12 para el mes de agosto, Tabla 2.13 para el mes de septiembre, Tabla 2.14 para el mes de octubre, Tabla 2.15 para el mes de noviembre y Tabla 2.16 para el mes de diciembre.

Tabla 2.5: Índices WS de todos los eneros correspondientes a los años de muestra para los cinco diferentes tipos de generadores de TMY.

ENERO	TMY	TMY2	IWEC	CHAN	TMYPlus
2006	0,1195	0,0687	0,1015	0,0883	0,1082
2007	0,1633	0,1186	0,1385	0,1177	0,1303
2008	0,1191	0,0844	0,1177	0,1041	0,0917
2009	0,1489	0,1135	0,1336	0,1221	0,1218
2010	0,0878	0,0631	0,0813	0,0844	0,0672
2011	0,0573	0,0441	0,0552	0,0628	0,0443
2012	0,1110	0,0776	0,1060	0,1059	0,0826
2013	0,0521	**0,0414**	**0,0528**	0,0586	**0,0413**
2014	**0,0520**	0,0483	0,0585	**0,0560**	0,0474
2015	0,0617	0,0484	0,0605	0,0646	0,0496
2016	0,0824	0,0635	0,0897	0,0950	0,0652

Tabla 2.6: Índices WS de todos los febreros correspondientes a los años de muestra para los cinco diferentes tipos de generadores de TMY.

FEBRERO	TMY	TMY2	IWEC	CHAN	TMYPlus
2006	0,0552	0,0498	0,0495	0,0514	0,0499
2007	**0,0406**	**0,0340**	**0,0394**	**0,0401**	**0,0344**
2008	0,0774	0,0761	0,0945	0,0860	0,0565
2009	0,0667	0,0565	0,0714	0,0732	0,0787
2010	0,0845	0,0820	0,1011	0,1012	0,0871
2011	0,1109	0,0851	0,1254	0,1263	0,0675
2012	0,0855	0,0666	0,0776	0,0915	0,0723

2013	0,0853	0,0700	0,0749	0,0753	0,0438
2014	0,0581	0,0409	0,0614	0,0618	0,0487
2015	0,0670	0,0439	0,0569	0,0567	0,0991
2016	0,1103	0,1000	0,1228	0,1142	0.0992

Tabla 2.7: Índices WS de todos los marzos correspondientes a los años de muestra para los cinco diferentes tipos de generadores de TMY.

MARZO	**TMY**	**TMY2**	**IWEC**	**CHAN**	**TMYPlus**
2006	0,0520	0,0435	0,0537	0,0557	0,0442
2007	0,0553	0,0508	0,0556	0,0516	0,0511
2008	0,1179	0,0911	0,1284	0,1146	0,0951
2009	0,0893	0,0676	0,0854	0,0837	0,0695
2010	0,0968	0,0896	0,1114	0,1091	0,0887
2011	0,1034	0,0810	0,1147	0,1188	0,0824
2012	**0,0492**	**0,0397**	**0,0464**	**0,0454**	**0,0401**
2013	0,0977	0,0924	0,1107	0,0996	0,0916
2014	0,1113	0,1042	0,1259	0,1134	0,1031
2015	0,0773	0,0681	0,0836	0,0869	0,0675
2016	0,0944	0,0780	0,1113	0,1085	0,0780

Tabla 2.8: Índices WS de todos los abriles correspondientes a los años de muestra para los cinco diferentes tipos de generadores de TMY.

ABRIL	**TMY**	**TMY2**	**IWEC**	**CHAN**	**TMYPlus**
2006	**0,0447**	**0,0329**	**0,0423**	**0,0430**	**0,0346**
2007	0,0489	0,0378	0,0476	0,0460	0,0395
2008	0,0928	0,0831	0,1017	0,0862	0,0834
2009	0,0686	0,0626	0,0785	0,0788	0,0618
2010	0,1136	0,0914	0,1242	0,1104	0,0948
2011	0,0586	0,0452	0,0615	0,0597	0,0472
2012	0,0855	0,0604	0,0799	0,0773	0,0652

2013	0,1161	0,1055	0,1138	0,1081	0,1060
2014	0,0890	0,0565	0,0811	0,0741	0,0641
2015	0,0989	0,0987	0,0789	0,0879	0,0573
2016	0,0687	0,0565	0,0713	0,0721	0.0546

Tabla 2.9: Índices WS de todos los mayos correspondientes a los años de muestra para los cinco diferentes tipos de generadores de TMY.

MAYO	**TMY**	**TMY2**	**IWEC**	**CHAN**	**TMYPlus**
2006	0,0826	0,0598	0,0844	0,0832	0,0644
2007	0,0824	0,0635	0,0897	0,0950	0,0987
2008	0,0720	0,0618	0,0727	0,0605	0,0630
2009	0,1161	0,1055	0,1138	0,1081	0,0898
2010	0,0789	0,0832	0,0844	0,0720	0,0896
2011	**0,0449**	**0,0325**	**0,0443**	**0,0465**	**0,0341**
2012	0,0987	0,0874	0,0832	0,0878	0,1013
2013	0,0671	0,0537	0,0672	0,0637	0,0557
2014	0,1109	0,0851	0,1254	0,1263	0,0991
2015	0,0844	0,0720	0,0987	0,0987	0,0995
2016	0,0832	0,0789	0,0844	0,0720	0,0990

Tabla 2.10: Índices WS de todos los junios correspondientes a los años de muestra para los cinco diferentes tipos de generadores de TMY.

JUNIO	**TMY**	**TMY2**	**IWEC**	**CHAN**	**TMYPlus**
2006	0,1179	0,0911	0,1284	0,1146	0,0945
2007	0,1387	0,0956	0,0989	0,1227	0,1051
2008	0,1110	0,0776	0,1060	0,1059	0,0784
2009	0,0845	0,0820	0,1011	0,1012	0,0978
2010	0,0708	0,0469	0,0989	0,0671	0,0518
2011	**0,0652**	**0,0448**	0,0671	**0,0608**	**0,0488**
2012	0,0689	0,0496	**0,0608**	0,0612	0,0511
2013	0,0897	0,0789	0,0612	0,0789	0,0898

2014	0,1489	0,1135	0,1336	0,1221	0,0945
2015	0,0855	0,0666	0,0776	0,0915	0,0898
2016	0,0968	0,0896	0,1114	0,1091	0,0965

Tabla 2.11: Índices WS de todos los julios correspondientes a los años de muestra para los cinco diferentes tipos de generadores de TMY.

JULIO	TMY	TMY2	IWEC	CHAN	TMYPlus
2006	0,0774	0,0761	0,0945	0,0860	0,0879
2007	0,1179	0,0911	0,1284	0,1146	0,0699
2008	0,1489	0,1135	0,1336	0,1221	0,0987
2009	0,1103	0,1000	0,1228	0,1142	0,0698
2010	0,1191	0,0844	0,1177	0,1041	0,0897
2011	0,0684	0,0499	0,0586	0,0697	0,0518
2012	0,0832	0,0789	0,0844	0,0720	0,0897
2013	0,0774	0,0538	0,0782	0,0701	0,0584
2014	**0,0633**	**0,0440**	**0,0547**	**0,0554**	**0,0475**
2015	0,0875	0,0616	0,0790	0,0745	0,0678
2016	0,0928	0,0831	0,1017	0,0862	0,0897

Tabla 2.12: Índices WS de todos los agostos correspondientes a los años de muestra para los cinco diferentes tipos de generadores de TMY.

AGOSTO	TMY	TMY2	IWEC	CHAN	TMYPlus
2006	0,0881	0,0578	0,0805	0,0786	0,0643
2007	0,12655	0,0987	0,0987	0,0845	0,0897
2008	**0,0776**	**0,0575**	0,0837	0,0792	**0,0607**
2009	0,1633	0,1186	0,1385	0,1177	0,0987
2010	0,11106	0,0776	0,1060	0,1059	0,0789
2011	0,0880	0,0633	0,0773	0,0767	0,0678
2012	0,0890	0,0634	**0,0744**	**0,0762**	0,0691
2013	0,0987	0,0789	0,0790	0,0897	0,0897
2014	0,1109	0,0851	0,1254	0,1263	0,0887

2015	0,1109	0,0789	0,0897	0,0987	0,0787
2016	0,1103	0,1000	0,1228	0,1142	0,0987

Tabla 2.13: Índices WS de todos los setiembres correspondientes a los años de muestra para los cinco diferentes tipos de generadores de TMY.

SETIEMBRE	**TMY**	**TMY2**	**IWEC**	**CHAN**	**TMYPlus**
2006	0,0655	0,0608	0,0602	0,0677	0,0606
2007	**0,0499**	0,0433	**0,0487**	**0,0528**	**0,0434**
2008	0,1110	0,0776	0,1060	0,1059	0,0987
2009	0,0824	0,0635	0,0897	0,0950	0,0980
2010	0,0653	0,0441	0,0581	0,0582	0,0483
2011	0,1179	0,0911	0,1284	0,1146	0.0987
2012	0,0968	0,0896	0,1114	0,1091	0.0889
2013	0,0989	0,0987	0,0789	0,0879	0.0996
2014	0,1103	0,1004	0,1228	0,1142	0.1036
2015	0,1113	0,1042	0,1259	0,1134	0.0997
2016	0,0591	**0,0427**	0,0589	0,0591	0,0443

Tabla 2.14: Índices WS de todos los octubres correspondientes a los años de muestra para los cinco diferentes tipos de generadores de TMY.

OCTUBRE	**TMY**	**TMY2**	**IWEC**	**CHAN**	**TMYPlus**
2006	0,1109	0,0851	0,1254	0,1263	0.0985
2007	0,0824	0,0635	0,0897	0,0950	0.0635
2008	0,1195	0,0687	0,1015	0,0883	0.0678
2009	0,09486	0,0793	0,0756	0,0745	0,0835
2010	0,1161	0,1055	0,1138	0,1081	0.1039
2011	0,0601	0,0489	0,0628	0,0631	0,0503
2012	0,0471	**0,0370**	**0,0550**	0,0537	**0,0378**
2013	0,1387	0,0956	0,0989	0,1227	0.0958
2014	0,1489	0,1135	0,1336	0,1221	0.1102
2015	0,1110	0,0776	0,1060	0,1059	0.0802

2016	**0,0460**	0,0387	0,0595	**0,0532**	0,0382

Tabla 2.15: Índices WS de todos los noviembres correspondientes a los años de muestra para los cinco diferentes tipos de generadores de TMY.

NOVIEMBRE	TMY	TMY2	IWEC	CHAN	TMYPlus
2006	0,0599	0,0419	0,0576	0,0546	0,0453
2007	0,1489	0,1135	0,1336	0,1221	0.1036
2008	**0,0552**	**0,0413**	**0,0517**	**0,0520**	**0,0439**
2009	0,1195	0,0687	0,1015	0,0883	0.0689
2010	0,1633	0,1186	0,1385	0,1177	0.0956
2011	0,1191	0,0844	0,1177	0,1041	0.0896
2012	0,1489	0,1135	0,1336	0,1222	0,0553
2013	0,0620	0,0539	0,0550	0,0552	0.0539
2014	0,0893	0,0676	0,0854	0,0837	0.0669
2015	0,0968	0,0896	0,1114	0,1091	0.0986
2016	0,1034	0,0810	0,1147	0,1188	0.0803

Tabla 2.16: Índices WS de todos los diciembres correspondientes a los años de muestra para los cinco diferentes tipos de generadores de TMY.

DICIEMBRE	TMY	TMY2	IWEC	CHAN	TMYPlus
2006	0,1109	0,0851	0,1254	0,1263	0,0789
2007	0,0855	0,0666	0,0776	0,0915	0.0689
2008	0,0853	0,0700	0,0749	0,0753	0.0698
2009	0,0581	0,0409	0,0614	0,0618	0.0412
2010	0,0674	0,0551	0,0600	0,0615	0,0577
2011	0,0824	0,0738	0,0929	0,0933	0,0717
2012	0,0855	0,0604	0,0799	0,0773	0.0612
2013	0,1161	0,1055	0,1138	0,1081	0.1005
2014	0,0890	0,0565	0,0811	0,0741	0.0552
2015	0,0989	0,0987	0,0789	0,0879	0,0545
2016	**0,0348**	**0,0264**	**0,0345**	**0,0338**	**0,0275**

Los resultados de las Tablas anteriores muestran que los TMM coinciden en los meses de febrero, marzo, abril, mayo, julio, noviembre y diciembre para los cinco métodos empleados de generación de TMY. En los meses de enero, agosto y octubre poseen coincidencias parejas de los TMM, mientras que los meses de junio y septiembre, cuatro métodos tienen semejanza en la elección del TMM.

De las Tablas 2.5 hasta Tabla 2.16 se extraen los años con menor WS (subrayado y en negrita) y este es el mes candidato a Mes Meteorológico Típico (TMM).

La Tabla 2.17 lista los valores de MBE y RMSE para todos los meses candidatos de los cinco métodos diferentes de generación de TMY, comparados con la media de 11 años.

Tabla 2.17: error de desviación medio y el error cuadrático medio de los índices climáticos para los 5 generadores de TMY.

Índice Climático	**TMY**	**TMY2, TMY3**	**IWEC**	**CHAN**	**TMYPLUS**
Temp. bulbo seco					
MBE °C	0,093	0,037	0,168	0,101	0,042
RMSE °C	0,486	0,529	0,522	0,487	0,461
Temp. Punto de rocío					
MBE °C	-0,378	0,350	0,518	-0,306	0,403
RMSE °C	2,795	0,540	0,830	2,830	0,539
Velocidad del viento					
MBE Km/h	0,697	-0,205	-0,307	0,610	-0,178
RMSE Km/h	2,728	0,505	0,636	2,732	0,473
Radiación					
MBE MJ/m²	0,322	0,376	0,218	0,235	-0,136
RMSE MJ/m²	0,875	0,935	0,925	0,955	0,867

Humedad relativa					
MBE %	1,563	2,002	2,123	3,569	1,083
RMSE %	3,023	3,355	3,897	4,698	2,141

Se observa en Tabla 2.17 que en el método TMYPlus los valores de RMSE son los más bajos en los cinco índices climáticos, comparados con los métodos TMY1, TMY2, IWEC y CHAN. Para la radiación solar total sobre plano horizontal el método por TMY1 tiene un valor de RMSE 0,875 MJ/m^2 cercano al del TMYPlus cuyo valor es 0,867 MJ/m^2, mientras que el valor del método de CHAN es el más alto con 0,955 MJ/m^2. Para la temperatura de bulbo seco los valores de RMSE de los cinco métodos no difieren en gran medida, pero el método TMYPlus tiene el menor RMSE con 0,461 °C. Los métodos TMY2 y TMYPlus para la temperatura de rocío tienen un valor RMSE de 0,540 °C y 0,539 °C respectivamente, el método de CHAN es el más elevado con 2,830 °C (este valor alto se debe a que el autor CHAN opta por un factor de ponderación elevado para dicho índice climático). Para la velocidad del viento y la humedad relativa los valores de RMSE del método TMYPlus son los más inferiores.

La Tabla 2.18 resume el Año Meteorológico Típico de la ciudad de Salta, concatenación de todos los Meses Meteorológicos Típicos producto del método TMYPlus.

Tabla 2.18: Meses Meteorológicos Típicos con sus años correspondientes.

ENERO	**FEBRERO**	**MARZO**	**ABRIL**	**MAYO**	**JUNIO**
2013	2007	2012	2006	2011	2011
JULIO	**AGOSTO**	**SEPTIEMBRE**	**OCTUBRE**	**NOVIRMBRE**	**DICIEMBRE**
2014	2008	2007	2016	2008	2016

2.8 Comparaciones de los desarrolladores TMY

Los valores promedio mensuales de las cuatro variables climáticas principales, incluyendo la temperatura de bulbo seco, la temperatura del punto de rocío, la velocidad del viento y la radiación solar global sobre plano horizontal, se

representaron en las Figuras. 2.2 a 2.5 para comparar los datos derivados de seis casos diferentes (i) TMY, (ii) TMY2, (iii) IWEC, (iv) CHAN, (v) TMYPlus y (vi) el promedio de 11 años (2006-2016).

Como se muestra en la Figura 2.2, los perfiles mensuales de la temperatura media de bulbo seco de los cinco métodos están muy cerca del promedio de 11 años. La que mejor aproxima es la curva del TMYPlus, aunque la de CHAN es parecida pero el método TMY1 tiene menor MBE. Además, las variaciones mensuales de las dos TMY son casi idénticas excepto los datos de septiembre y octubre.

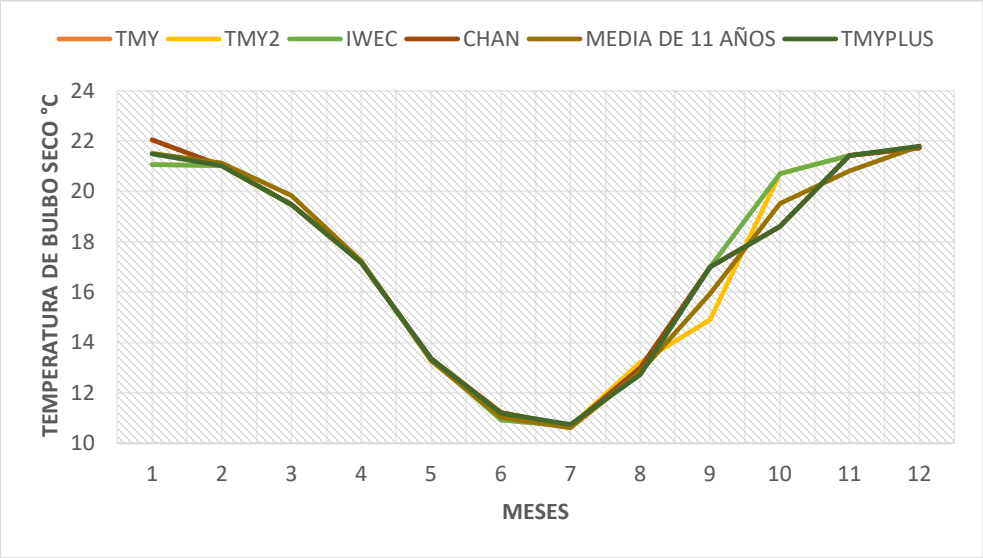


Fig. 2.2: Valores medios mensuales de la temperatura de bulbo seco.

La Figura 2.3 muestra los valores medios mensuales de la radiación solar total diaria sobre plano horizontal, promediados sobre los cinco métodos de generación de TMY y sobre todos los años. El método que mejor aproxima la curva de promedios a largo plazo es la TMYPlus y de cerca le sigue el procedimiento del TMY1 o TMY cuya curva es de color amarillo. Como se nota en la curva los métodos de CHAN e IWEC son los más desviados de la media de 11 años.

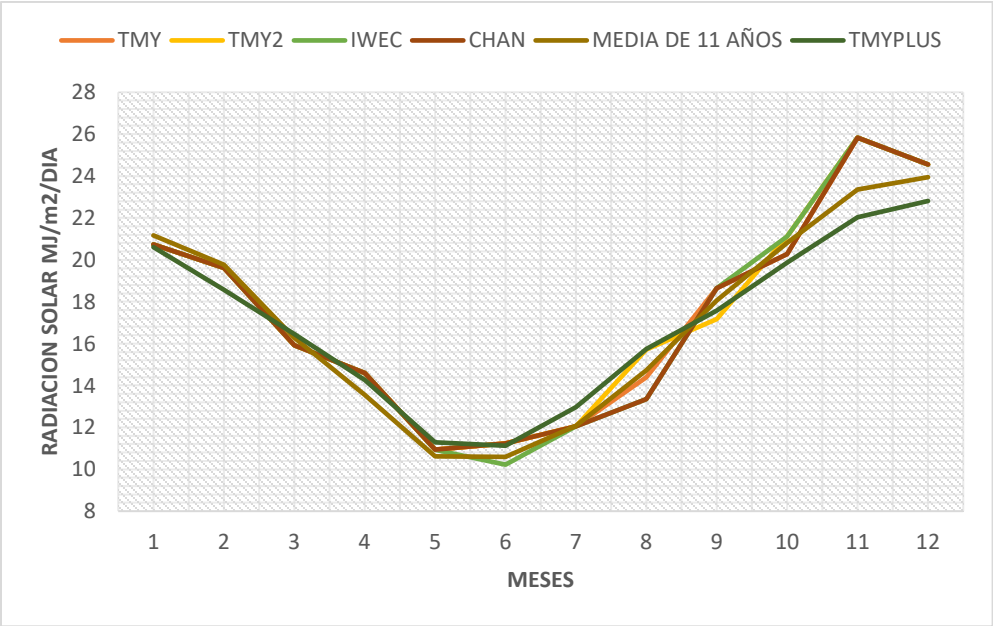


Fig. 2:3 Valores medios mensuales de la radiación solar total horizontal de todos los generadores de TMY.

La Figura 2.4 presenta las curvas de la temperatura promedio mensual del punto de rocío para los cinco casos. El método TMYPlus tiene el mejor desempeño, mientras que el método CHAN tiene una desviación relativamente grande de la media a largo plazo. La desviación del método de CHAN con respecto a la media de 11 años se debe a que el factor de ponderación dado por CHAN para dicho índice climático es de un orden de magnitud menor que de los demás métodos.

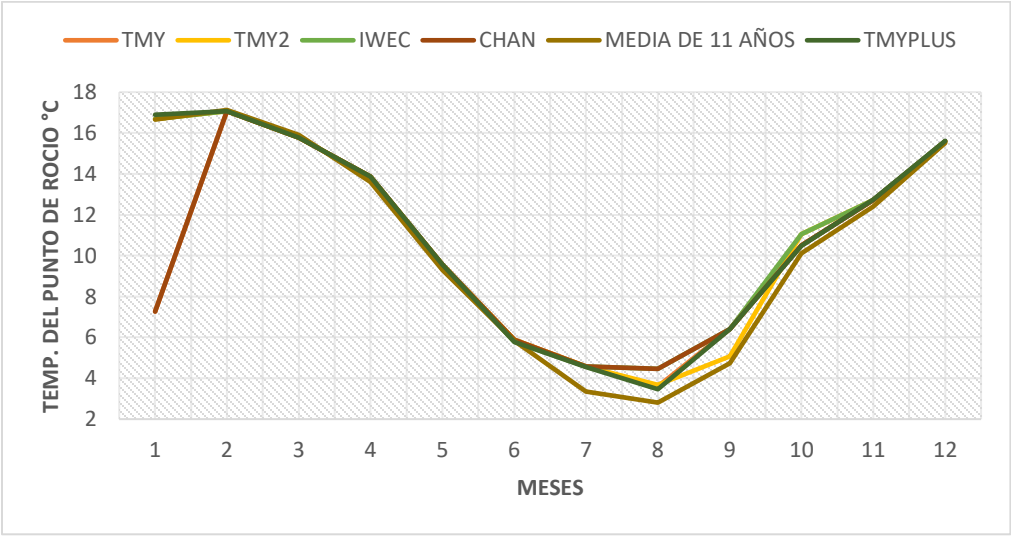


Fig.2.4: Valores medios mensuales de la temperatura del punto de rocío.

Los resultados de la velocidad del viento, se representan en la Figura 2.5. Los valores de RMSE oscilan entre los 0,473 Km/h en TMYPlus hasta los 2.73 Km/h para el método CHAN. No obstante, el TMYPlus presenta una mayor cercanía a la media a largo plazo que los cuatros métodos restantes. Como se nota en la curva de CHAN y de TMY1 para el mes de enero la desviación es el doble con respecto a la media 11 años, esta desviación se debe a que el archivo meteorológico obtenido de ambos métodos el TMM de enero corresponde al año 2014 mientras que los demás TMYs el TMM corresponden a enero 2013.

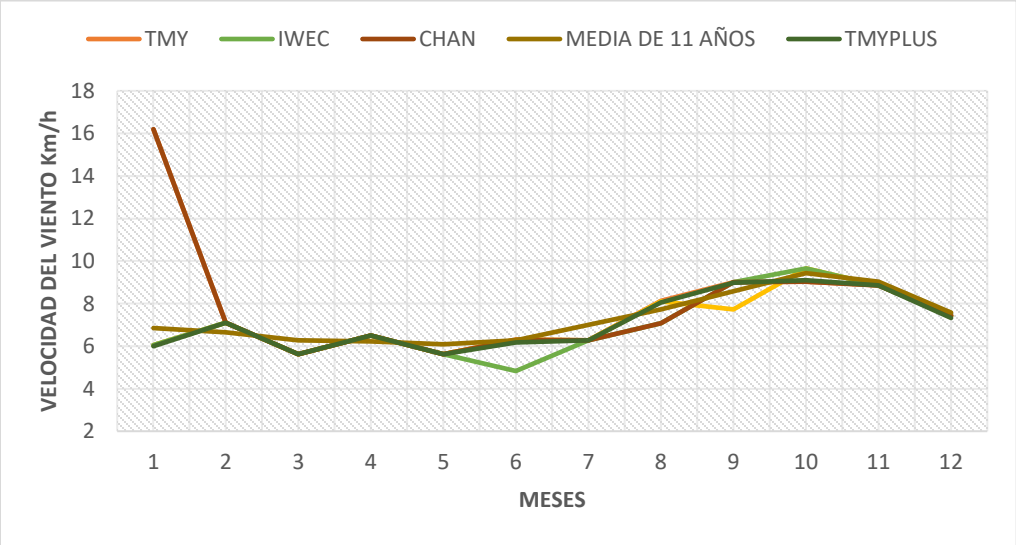


Fig.2.5: Valores horarios medios mensuales horarios de la velocidad del viento.

La Figura 2.6 muestra las curvas del porcentaje de Humedad Relativa del método TMYPlus y de la media de 11 años. Los resultados arrojaron un RMSE de 2,14 % de humedad relativa, el más bajo de los cinco métodos.

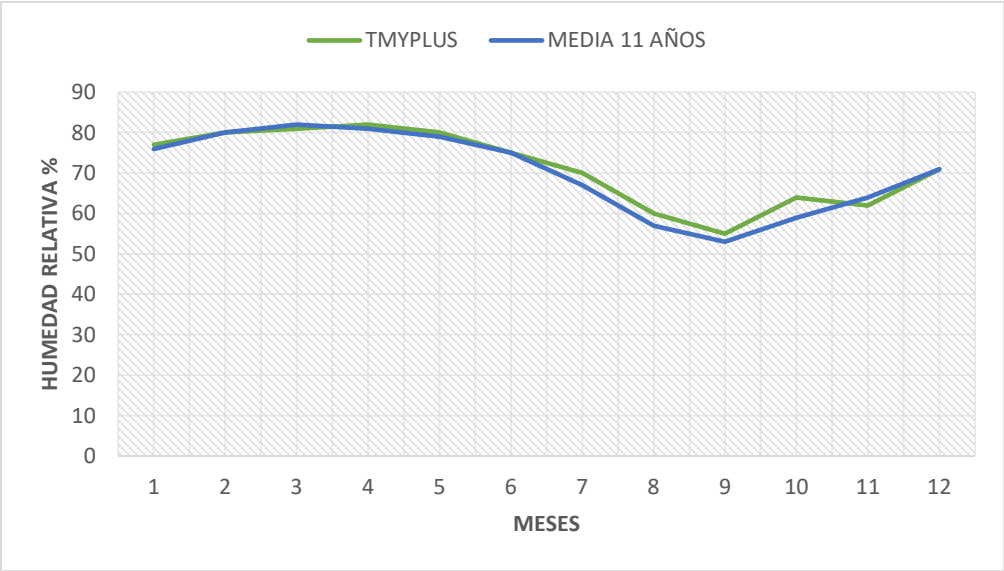


Fig. 2.7: Valores promedios mensuales del porcentaje de humedad relativa.

2.9 CONCLUSIONES DEL CAPITULO

En este capítulo se ha generado el año meteorológico típico (TMY) de la ciudad de Salta con cinco conjuntos de diferentes factores de ponderación, antes inédito. Tal información resulta crucial para la precisión de los resultados en simulaciones computacionales de rendimiento energético de edificios, que es nuestro objetivo último.

Los resultados reflejaron que los métodos elegidos para diseñar el año meteorológico típico surgen de la combinación de los métodos llamados TMY1, TMY2 y CHAN, dicho método se nombró TMYPlus. El método TMY1 se escogió para la elección del TMM para la variable meteorológica de temperatura de bulbo seco, mientras que el método TMY2 fue seleccionado para los TMMs de las variables meteorológicas de temperatura de punto de rocío y velocidad del viento. La radiación solar total diaria sobre plano horizontal estuvo con su factor de ponderación correspondiente al método de CHAN. La combinación de todos estos factores de ponderación forma el TMYPlus. Este año meteorológico típico fue transformado a los formatos *.txt, .xlsx* y *.epw*, .esto permite su utilización en todos los programas de simulación térmica y de generación eléctricas.

En el camino, se han desarrollado códigos computacionales para la implementación de la metodología seguida para generar el TMY, que permitirán actualizar fácilmente los resultados a medida que contemos con nuevos datos experimentales. Gracias a este estudio, Salta es hoy la tercera ciudad argentina con TMY, después de la Ciudad Autónoma de Buenos Aires y Santa Fe. Los códigos aquí desarrollados son directamente aplicables a cualquier otra localidad que cuente con un conjunto de datos meteorológicos suficientemente completo. Es nuestra intención aplicarlos al diseño de las viviendas sociales que producen los gobiernos provinciales, habilitando una modelización más precisa del comportamiento térmico de las edificaciones.

Capítulo 3

HD20: Aparato de placa caliente con guarda para la medición de las propiedades de transferencia de calor por conducción en hormigones

3.1 Introducción

Es de suma importancia disponer de información sobre las propiedades de transmisión de calor de hormigones para distintos propósitos, incluyendo la evaluación del cumplimiento de reglamentaciones y especificaciones, para pautas de diseño, para investigación acerca del material y sus aplicaciones en la construcción, y para la verificación de modelos de simulación.

El hormigón es un material de construcción que permite en su elaboración la incorporación de residuos y consecuentemente el desarrollo de nuevos materiales; el estudio de sus propiedades termofísicas y mecánicas posibilita la creación de nuevos elementos y sistemas constructivos con un mayor aprovechamiento de los recursos naturales y residuos de la industria. Reciclar los desechos de plástico para producir nuevos materiales es una de las soluciones para deshacerse de grandes cantidades de basura (Díaz y Hernández, 2018).

Existen investigaciones sobre el uso de residuos plásticos como rellenos o agregados en hormigón, como el Tereftalato de polietileno (Choi, 2005), Poliestireno (Tang, 2008), Poliestireno Expandido (Kan, 2009), Cloruro de Polivinilo (Kou, 2009), Polietileno de Baja Densidad (Chaudhary, 2014), Polietileno de Alta Densidad (Naik, 1996), en residuos de E-plastic, en morteros (PET). Las investigaciones indicaron que el plástico reciclado podría reutilizarse como sustitutos parciales de la arena o agregado grueso (Albano, 2009).

Sin embargo, una vez que se tiene el nuevo material es preciso determinar sus propiedades físicas de transferencia de calor. Para ello se desarrolló y evaluó experimentalmente la Caja Caliente HD20, que es la abreviatura de los nombres de sus diseñadores, Hernández y Díaz.

Dependiendo de los requisitos que deban cumplir las probetas, la caja HD20 determina las siguientes propiedades: resistencia térmica, transmitancia térmica, la conductividad térmica media y la resistividad térmica.

3.2 Antecedentes

Existen diversas investigaciones sobre la implementación de Cajas Calientes con Guardas, como (Ghosh, 2013) que calculo la transmitancia térmica de un material. El autor utiliza dos tipos de calentadores en la caja de medición, un calentador de placa de 100 W y dos calentadores tubulares de 60 W (Figura 3.1). La caja de guarda consta de dos calentadores de resistencia tubular de 120 W. Finalmente la caja fría utiliza como fluido circulante una mezcla de etilenglicol con agua y un intercambiador de calor. Para lograr uniformidad de la temperatura se instalan ventiladores de 30 W en cada caja (medición, guarda y fría). El autor concluye que la temperatura de la caja de guarda, se obtuvieron fluctuaciones probablemente debido a la baja velocidad del aire circulante y que las prueba deben realizarse durante períodos de tiempo más prolongados para evaluar el rendimiento del sistema con precisión.

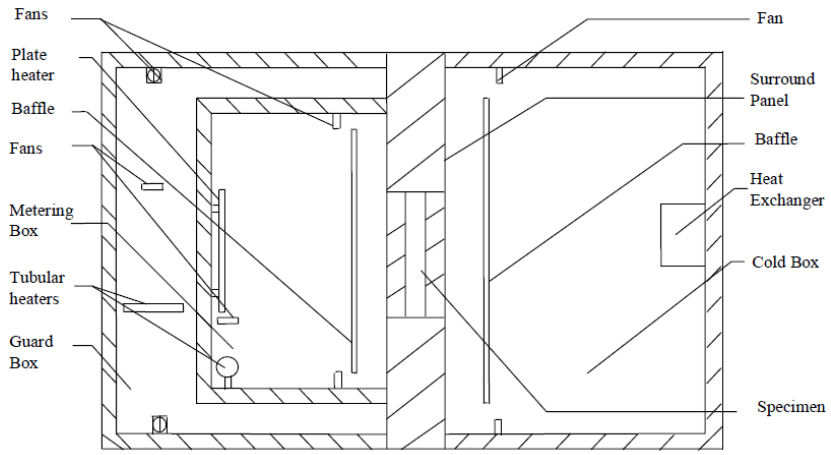


Fig. 3.1: Caja caliente de Ghosh

El autor (Wernery, 2017) determina la conductividad térmica de ladrillos aislantes utilizando dos configuraciones de Cajas Calientes, una a gran escala para muestras de hasta 1000 x 1000 mm^2 (para matriz de mampostería de 4 ladrillos x 4 ladrillos) y otra para muestras a pequeña escala de 50 x 50 x 10 mm^3. Ambas configuraciones son para muestras en posición horizontal y no tienen en cuenta la conductividad térmica del mortero (Figura 3.2).

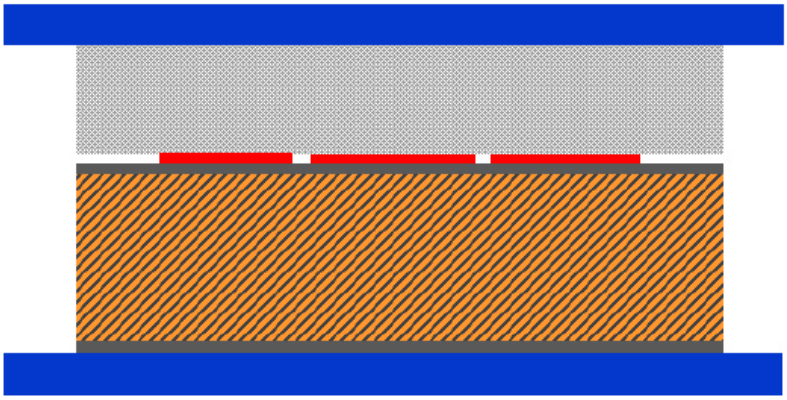


Fig. 3.2: Esquema de placa caliente de Wernery. De arriba hacia abajo: placa fría (azul), muestra de referencia de EPS de conductividad térmica conocida (gris), placa caliente con sección de protección y medición (rojo), manta de goma (gris oscuro), muestra de ladrillo (matriz 4x4), manta de goma (gris oscuro) y placa fría (azul).

(Di Maio, 2018) obtiene conductividades térmicas de morteros con agregados plásticos, utilizando un aparato de Caja Caliente para probetas horizontales de 30 x 30 x 5 cm^3 (Figura 3.3). Realiza cinco ensayos por cada tipo de dosificación de morteros.



Fig. 3.3: Caja caliente con guarda utilizada por Di Maio.

Algunos investigadores realizaron modificaciones a las Cajas Calientes existentes, como (Dalla Santa, 2017) que modifico la Caja Caliente llamada Taurus TLP 800 para obtener la Conductividad Térmica de Gravas (Figura 3.4). Una de las modificaciones se basó en las dimensiones de las probetas a 50 x 50 x 6 cm3. El tiempo promedio de funcionamiento del aparato fue entre 6 y 7 horas. Se utilizaron una placa fría superior y una placa caliente inferior. La diferencia de

temperatura impuesta entre la placa caliente y la fría se reduce a 5°C. Concluyen que la metodología propuesta resuelve los problemas relacionados con la alta variabilidad mineralógica de las litologías formadas por gravas. Los resultados son confiables tanto en muestras secas como húmedas.

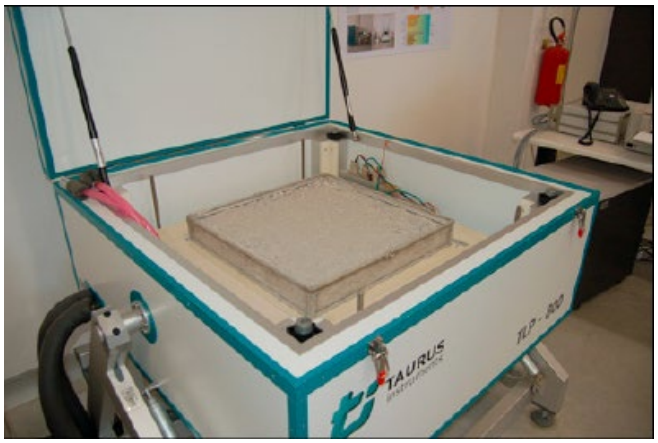


Fig. 3.4: Caja Caliente Taurus utilizada por Dalla Santa.

El investigador Carbonaro (Carbonaro, 2015) modifico el aparato Lasercomp FOX600 para la obtención de las propiedades térmicas de un yeso con material de cambio de fase. Unas de las modificaciones permiten obtener pruebas térmicas en condiciones dinámicas. Las mediciones de conductividad térmica se realizaron a tres temperaturas medias diferentes (6°C, 21°C y 36°C) mientras que la diferencia de temperatura entre las dos placas se fijó en 10°C. El tiempo de los ensayos con este aparato fue en promedio 48 horas. Los resultados concuerdan con los indicados en productos de yeso con Materiales de Cambio de Fase similares.

Dai diseño un aparato de caja caliente para calcular la conductividad térmica de objetos en forma cilíndrica en estado estable y transitorio (Dai, 2017). Hay varios aspectos que pueden influir en la precisión del método propuesto, que incluyen principalmente: el almacenamiento de calor de las paredes del tanque de agua; pérdida de calor al medio ambiente; la entrada de energía eléctrica del agitador; y los errores de medición en los sensores (Figura 3.5).

Concluye que el diseño se puede calibrar utilizando dos barras de cobre cilíndricas con diferentes longitudes y los errores sistemáticos de la medición se pueden minimizar o incluso eliminar mediante una prueba de calibración.

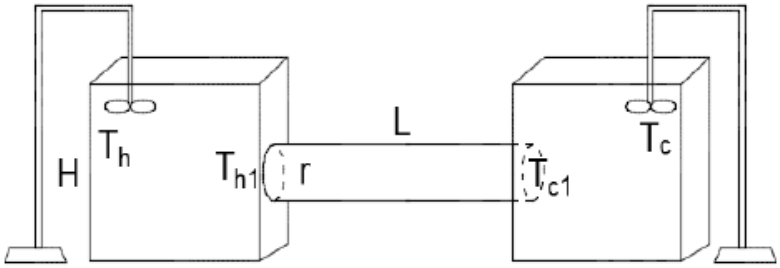


Fig. 3.5: esquema para medir la conductividad térmica de un objeto cilíndrico.

(Baldwin, 2015) diseño una Caja Caliente para medir el flujo de calor a través una pared de 1220 mm por 1500 mm (Figura 3.6). Realiza la comparación de pruebas en estado estable in situ de paredes de alta resistencia térmica.

El período de prueba duro 15 horas y se utilizaron 144,8 Wh de calor para mantener la caja de medición a una temperatura constante. El autor determinó que las pruebas con una Caja Caliente evalúan de manera más apropiada los diseños de paredes que incorporan muchos puentes térmicos.

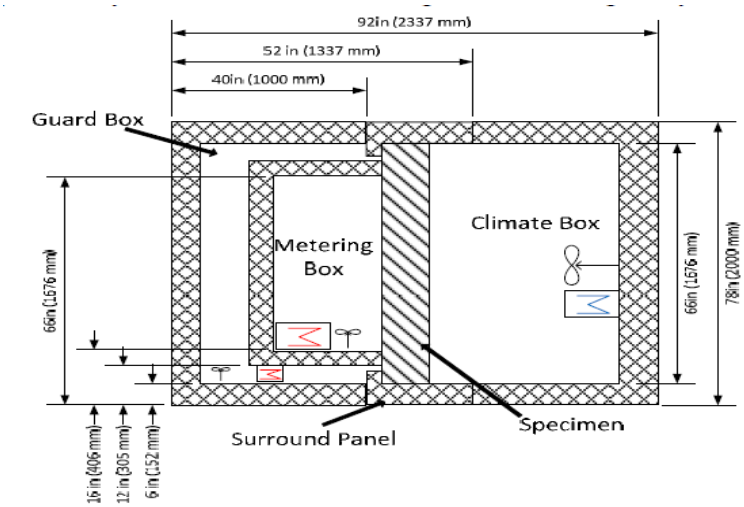


Fig. 3.6: Esquema de la caja caliente construida para probar ensamblajes de pared con VIP

Los autores (Aeberhard et al.2006) pertenecientes a la Universidad Nacional del Nordeste UNNE, construyeron un prototipo experimental de secadero solar de convección natural, para su optimización y estudio del proceso de secado de maderas. Los resultados alcanzados demostraron que para mejorar tanto la calidad de la madera tratada, como también la rentabilidad del proceso de secado, es necesario estudiar el almacenamiento y transporte de la humedad

y del calor en la estructura porosa de la madera usada como material de construcción.

Con este objetivo se construyó un dispositivo denominado “Aparato de Placa Caliente” (Figura 3.7) con el cual se puede determinar el coeficiente de conductividad térmica para diferentes contenidos de humedad.



Fig. 3.7: aparato de placa caliente de la UNNE.

3.3 Propiedades de transferencia de calor

Antes de introducirnos en las descripciones del aparato de placa caliente, debemos entender cómo es su corazón, como funciona, cual es el concepto que lleva a su construcción. Del estudio de la termodinámica aprendimos que la energía se puede transferir mediante las interacciones de un sistema con su alrededor, dichas interacciones se denominan trabajo y calor. Sin embargo, la termodinámica trata de los estados finales del proceso durante el cual ocurre una interacción y no proporciona información alguna con respecto a la naturaleza de esta interacción o la rapidez con la que esta se produce.

Transferencia de calor es la energía en tránsito debido a una diferencia de temperaturas. Siempre que exista una diferencia de temperaturas en un cuerpo o entre cuerpos, ocurre una transferencia de calor

Según se muestra en la Figura 3.8, nos referimos a los diferentes tipos de procesos de transferencia de calor como modos. Cuando existe un gradiente de temperatura en un medio estacionario (que puede ser un sólido o un fluido) utilizamos el término conducción para referimos a la transferencia de calor que

se producirá a través del medio En cambio, el término convección se refiere a la transferencia de calor que ocurrirá entre una superficie y un fluido en movimiento cuando están a diferentes temperaturas. El tercer modo de transferencia de calor se denomina radiación térmica Todas las superficies con temperatura finita emiten energía en forma de ondas electromagnéticas. Por tanto, en ausencia de un medio, existe una transferencia neta de calor por radiación entre dos superficies a diferentes temperaturas (Incropera, 2000).

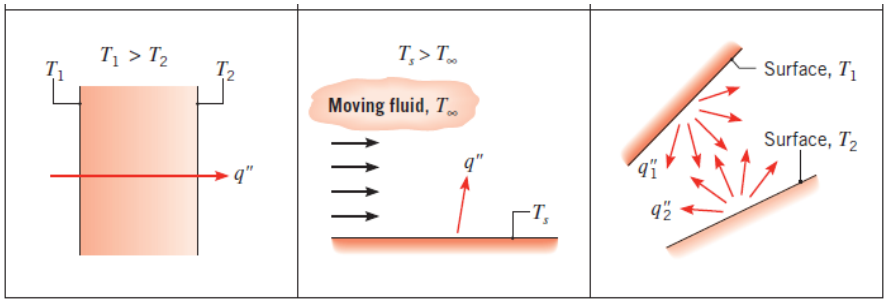


Fig.3.8: modos de transferir calor: conducción, convección y radiación.

3.3.1 Conducción

Cuando escuchamos la palabra conducción debemos evocar conceptos de actividad atómica y molecular, ya que hay procesos en estos niveles que sustentan este modo de transferencia de calor. La conducción se considera como la transferencia de energía de las partículas más energéticas a las menos energéticas de una sustancia debido a las interacciones entre las mismas.

El mecanismo físico de conducción se explica más fácilmente considerando un gas y usando ideas que le sean familiares, propias de la experiencia en termodinámica. Piense en un gas en el que existe un gradiente de temperatura y suponga que no hay movimiento global. El gas puede ocupar el espacio entre dos superficies que se mantienen a diferentes temperaturas, como se muestra en la Figura 3.9. Asociamos la temperatura en cualquier punto con la energía de las moléculas del gas en la proximidad del punto. Esta energía está relacionada con el movimiento traslacional aleatorio, así como con los movimientos internos de rotación y vibración de las moléculas.

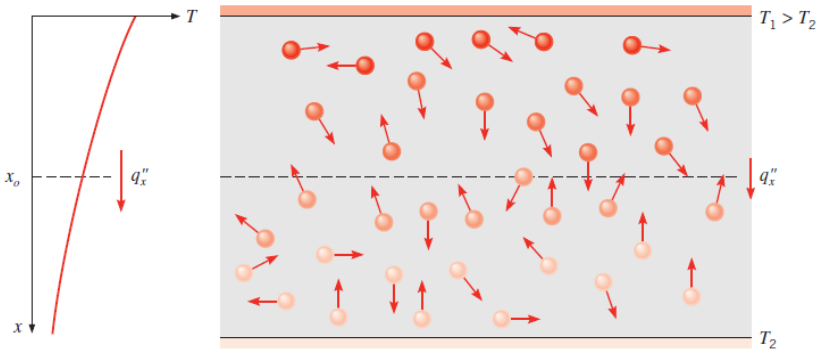


Fig. 3.9: Difusión de energía debida a la actividad molecular.

Las temperaturas más altas se asocian con las energías moleculares más altas y, cuando las moléculas vecinas chocan, como lo hacen constantemente, debe ocurrir una transferencia de energía de las moléculas más energéticas a las menos energéticas En presencia de un gradiente de temperatura, la transferencia de energía por conducción debe ocurrir entonces en la dirección de la temperatura decreciente.

Esta transferencia es evidente en la Figura 3.9. Las moléculas, procedentes de arriba y de abajo, cruzan constantemente el plano hipotético en x_0 gracias a su movimiento aleatorio. Sin embargo, las moléculas de arriba están asociadas con una temperatura mayor que la que tienen las de abajo, en cuyo caso debe haber una transferencia neta de energía en la dirección positiva de x Se habla de la transferencia neta de energía debida al movimiento molecular aleatorio como una difusión de energía.

La situación es muy similar en los líquidos, aunque las moléculas están menos espaciadas y las interacciones moleculares son más fuertes y frecuentes. De igual manera. en un sólido, la conducción se atribuye a la actividad atómica en forma de vibraciones reticulares. El punto de vista moderno es atribuir la transferencia de energía a ondas reticulares inducidas por el movimiento atómico (Figura 3.10). En un no conductor, la transferencia de energía se da exclusivamente por la vía de estas ondas reticulares; en un conductor, la transferencia de energía también se debe al movimiento de traslación de los electrones libres.

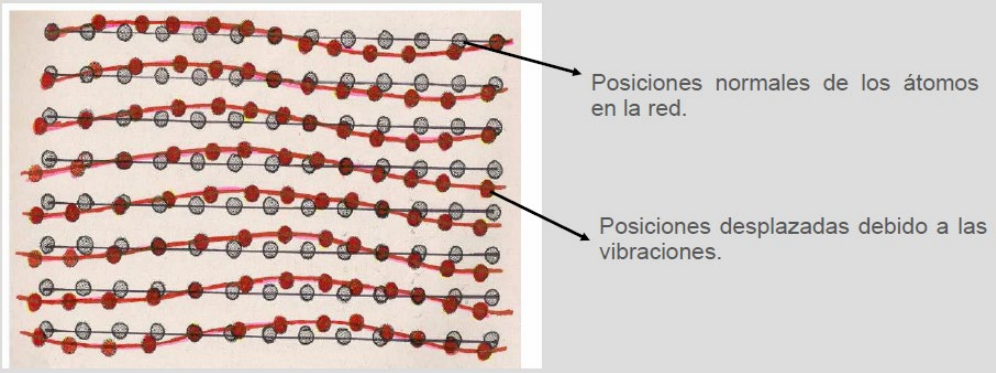


Fig. 3.10: ondas reticulares inducidas por el movimiento atómico.

3.3.1.1 Ecuación para la conducción de calor

Es posible cuantificar los procesos de transferencia de calor en términos de las ecuaciones o modelos apropiados. Estas ecuaciones o modelos sirven para calcular la cantidad de energía que se transfiere por unidad de tiempo. Para la conducción de calor, la ecuación o modelo se conoce como "ley de Fourier". Para la pared plana unidimensional que se muestra en la Figura 3.11, la cual tiene una distribución de temperatura T(x), el modelo se expresa con la ecuación 3.1.

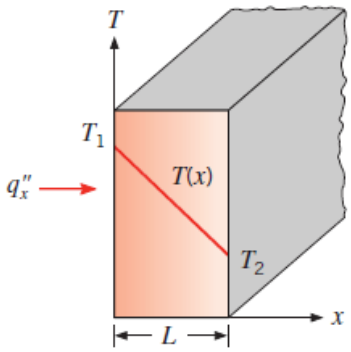


Fig. 3.11: transferencia unidimensional de calor por conducción en una pared (cortesía Incropera).

$$q''_x = -k\frac{dT}{dx} \tag{3.1}$$

El flujo de calor o transferencia de calor por unidad de Área q''_x (W/m) es la velocidad con que se transfiere el calor en la dirección x por área unitaria perpendicular a la dirección de transferencia, y es proporcional al gradiente de temperatura $\frac{dT}{dx}$, en esta dirección. La constante de proporcionalidad, k, es una propiedad de transporte conocida como conductividad térmica (W/mK) y es una

característica del material de la pared. El signo menos es una consecuencia del hecho de que el calor se transfiere en la dirección de la temperatura decreciente En las condiciones de estado estable que se muestran en la Figura 3.10, donde la distribución de temperatura es lineal, el gradiente de temperatura se expresa como muestra la ecuación 3.2:

$$\frac{dT}{dx} = \frac{T_2 - T_1}{x_2 - x_1} = \frac{T_2 - T_1}{L - 0} \tag{3.2}$$

Donde:

Tenemos que $T_2 > T_1$

L= longitud de la pared (m).

T_2= Temperatura en la posición x_2 de la pared plana (°C).

T_1= Temperatura en la posición x_1 de la pared plana (°C).

Si reemplazamos la expresión del gradiente de temperatura de la ecuación (3.2) en la ecuación (3.1) nos quedara la ecuación (3.3):

$$q''_x = -k \frac{T_2 - T_1}{L} \tag{3.3}$$

3.3.2. Conductividad térmica

Como lo dijimos en el inciso anterior, la propiedad que caracteriza la capacidad del material para transferir calor por conducción a través de él es la conductividad térmica. Es una propiedad específica del material y se define como la cantidad de energía térmica que se transmite en una dirección a través de un espesor unitario y por unidad de tiempo perpendicular a la dirección de flujo (IRAM 11549, 2002). La determinación de la conductividad térmica es importante para comprender el flujo de calor en los hormigones (Gandage, 2013). Para determinar la conductividad térmica media, las probetas deben ser homogéneas o poroso-homogéneas. Se consideran probetas poroso-homogéneas a aquellas en las cuales cualquier heterogeneidad tiene medidas más pequeñas que un décimo del espesor de la probeta. Cuando se utiliza la caja HD20 la conductividad térmica se calcula con la ecuación (3.3). A esta ecuación le vamos agregar el múltiplo 2 (Ecuación 3.4) en el denominador ya que el equipo de caja caliente con guarda utiliza dos probetas (Tabla 3.1).

$$k = \frac{q_x \ e}{2 * A * (T_1 - T_2)} \tag{3.4}$$

Siendo "e" el espesor del material en (m)," q_x el calor transferido por conducción por unidad de tiempo en (W) y A el área en m^2 por donde el calor es transferido en forma perpendicular. En la Tabla 3.2 se detallan algunos materiales con su conductividad térmica y su densidad.

Tabla 3.2: Conductividad térmica para diferentes materiales (IRAM 11601, 2002)

Material	Densidad aparente [kg/m³]	Conductividad térmica [W/m.K]
Hormigón con agregados pétreos	2.400	1,63
Hormigón con poliestireno expandido	1.300	0,35
Hormigón celular	1.400	0,66
Tejas	-	0,70 - 0,76
Laminado plástico termoestable	1.400	0,49
Madera (arce, paralela a las fibras)	700	0,42
Madera dura	1.200 – 1.400	0,34

)

Según IRAM 11601 (2002) los valores dados en la tabla para una determinada densidad, deben considerarse genéricos, dado que existen variaciones de conductividad térmica de acuerdo con la composición del material y también según sea la tecnología de producción utilizada. Esta norma dice que los valores de conductividad térmica pueden experimentar un incremento de hasta un 70 % con respecto a los que figuran en dicha tabla, si al formar parte de un cerramiento, quedan expuestos a la variación de su contenido de humedad respecto del adoptado en las condiciones de ensayo.

El contenido de humedad de un material tiene un marcado efecto en el valor del *k* del material; mientras mayor es el contenido de humedad, mayor será el valor de *k*. Por eso es importante, que cuando se especifiquen los valores de conductividad, se conozca el contenido de humedad del cual se obtuvieron estos valores de prueba.

En conclusión, puede afirmarse que la penetración de la lluvia y la condensación pueden ser las causas de una seria reducción en el valor del aislamiento de un material de construcción, de modo que su valor efectivo

cuando está en servicio resulta bastante menor que el nominal. (Short A. & Kinninburg W., 1967).

3.3.3 Resistividad térmica

A menudo es más conveniente emplear en los cálculos el reciproco de la conductividad térmica, llamada resistividad térmica. Esta propiedad se define como: el número de horas requeridas para la transmisión de una kilocaloría, a través de un metro cuadrado de superficie en un material de un metro de espesor, cuando la diferencia de temperatura entre las caras externas es de un grado centígrado (IRAM 11549, 2002). La resistividad térmica se expresa con la ecuación 3.5, su unidad es

$$r = \frac{1}{k} \tag{3.5}$$

3.3.4 Resistencia térmica

La Resistencia térmica (R) es una medida de la resistencia que se opone al flujo de calor ya sea de un material simple o en una combinación de distintos materiales de cualquier espesor. Se la define como el número de horas necesario para la transmisión de una kilocaloría, a través de un metro cuadrado de material, cuando entre las superficies que lo limitan existe una diferencia de temperaturas de un grado Celsius (IRAM 11549, 2002). Su unidad de medida es (m^2K/W).

Un incremento en el espesor del material va acompañado por un incremento correspondiente en su resistencia térmica. Así, si el espesor del material se reduce a la mitad, la resistencia térmica del mismo también se reduce a la mitad. En un muro compuesto de varios materiales, la resistencia total del muro es igual a la suma de la resistencia de cada uno de los materiales con sus respectivos espesores como se expresa en la Ecuación 3.6.

$$R_t = R_1 + R_2 + R_3 + \cdots + R_n \tag{3.6}$$

La resistencia térmica de una capa homogénea de un material sólido se calcula con la Ecuación 3.7:

$$R = \frac{(T_1 - T_2) * A}{q_x} \tag{3.7}$$

La resistencia térmica (R) de un material da idea de la dificultad que encuentra el calor a la hora de transmitirse por el interior del material. La

resistencia térmica se calcula con la ecuación 3.7 cuando se cumplan las condiciones de que las probetas sean homogéneas o porosas-homogéneas.

3.3.5 Transmitancia térmica

Para determinar el consumo de energía de una vivienda o edificio se utiliza lo que se denomina transmitancia térmica, y se simboliza por la letra K, U (nomenclatura europea o anglosajona) o T de unidades (W/m²K).

Según la norma IRAM 11601 (2002), la transmitancia térmica es la cantidad de calor que se transmite en la unidad de tiempo a través de la unidad de superficie de un elemento constructivo, (muro o tabique de un cierto espesor), cuando la diferencia de temperatura entre las masas de aire es igual a la unidad.

La transmitancia o conductancia térmica es la cantidad de calor que fluye a través de un material o de una combinación de materiales de un determinado espesor. Es, por tanto, el reciproco de la resistencia térmica y su fórmula se presenta en la Ecuación 3.8:

$$T = \frac{q_x}{(T_1 - T_2) * A} \tag{3.8}$$

Para verificar y eventualmente ajustar los valores de las transmitancias térmicas (T) a los máximos admitidos, primero se deberá determinar la Zona Bioambiental correspondiente a la ubicación geográfica del terreno donde estará ubicada la construcción. (IRAM 11603, 2012).

Mientras que el valor λ es un coeficiente para un material simple y definido, y que por lo mismo tiene una ampliación y un significado general, el valor T se refiere a la transmisión de calor a través de algún sistema específico de muro. Este valor representa la resistencia de la pared entre sus caras exteriores, tomando en cuenta la resistencia de las superficies de acabados, los efectos de las cavidades interiores y otros factores similares. Sin embargo, básicamente el valor T se integra con el valor λ de cada uno de los materiales que forman parte del espesor del muro y por tanto conforman la línea de resistencia al flujo del calor.

La transmitancia térmica o valor T tienen una gran importancia práctica ya que proporciona las bases para comparar los valores efectivos de aislamiento

de distintos sistemas de techos y muros usando diferentes materiales y estimar el consumo de energía de una vivienda o edificio bajo condiciones estables.

En la Tabla 3.3 se resumen las propiedades térmicas que vamos a obtener con la Caja Caliente con Guarda HD20:

Tabla 3.3: Propiedades térmicas obtenidas con el aparato HD20.

Propiedad Térmica	Ecuación		Unidades
Conductividad	$k = \frac{q_x\, e}{2\, A\, (T_1 - T_2)}$	(3.4)	W/mK
Resistividad	$r = \frac{1}{k}$	(3.5)	mK/W
Resistencia	$R = \frac{T_1 - T_2}{q_x}\, A$	(3.7)	m^2K/W
Transmitancia	$T = \frac{1}{R}$	(3.8)	W/m^2K

3.4 Densidad

La densidad es un parámetro fundamental para diferenciar la conductividad térmica de familias de materiales semejantes, como los hormigones, áridos y aislantes. El contenido de humedad de un material tiene un marcado efecto en el valor del k del material; mientras mayor es el contenido de humedad, mayor será el valor de k. Por ello, lo primero que se hace es acondicionar las probetas de ensayo secándolas con una estufa que trabaja entre 47°C y 57°C durante 24 horas (Tropea, 2014). Al final del proceso de secado de las probetas de hormigón se las introduce rápidamente en la caja HD20 para que no absorban humedad nuevamente.

Se calcula la densidad seca ρ_d de la probeta (cuyas unidades son Kg/m^3) acondicionada para el ensayo con la Ecuación 3.9:

$$\rho_d = \frac{M_2}{V} \tag{3.9}$$

Donde M_2 es la masa de la probeta acondicionada y V es el volumen de la misma.

3.5 La caja caliente HD20

El término "placa caliente con guarda" se aplica a un aparato totalmente ensamblado, denominado en consecuencia "aparato de placa caliente con guarda". La Caja Caliente HD20 es un aparato de placa caliente con guarda. Las

características generales del aparato con los calefactores (A y C), las probetas (F), las unidades de enfriamiento (E) y termocuplas instaladas (G, H y J) se muestran en la Figura 3.12.



Fig.3.12.: Esquema del Método de Placa Caliente con Guarda.

Las dimensiones de la caja HD20 son 39 cm x 39 cm x 19 cm. La caja exterior que envuelve a todo el ensamble es de madera con dos puertas laterales y un techo corredizo para la manipulación de las probetas.

Para sujetar firmemente todo el conjunto compuesto por las placas calefactoras, las muestras a ensayar y las unidades de enfriamiento, se instalaron varillas roscadas con tuercas galvanizadas en los 4 vértices de la caja que permiten comprimir adecuadamente los distintos elementos y lograr un buen contacto térmico entre las muestras y las fuentes caliente y fría (Figura 3.12, derecha). Además, permiten regular con precisión el espaciamiento entre las placas del aparato. Las puertas laterales y el techo del recinto de madera son sujetas con cierres metalizados de exteriores.

3.5.1 Principio de funcionamiento del aparato HD20

Mediante el aparato HD20 se establece dentro de las probetas, cuya forma es la de una placa uniforme de caras plano-paralelas, un flujo de calor uniforme y unidimensional perpendicular a las caras en condiciones de régimen estacionario (IRAM 11559, 1995). La caja HD20 es un aparato de placa caliente con guarda para dos probetas aproximadamente iguales, con una unidad de enfriamiento por cada probeta y una unidad calefactora central.

3.5.2 Unidad calefactora.

La unidad calefactora (Figura 3.13a) consiste de una sección de medición central y una sección de guarda que la rodea construida con una PBC (Printed Circuit Board) de Pertinax, a la cual se le extrajo el cobre con un baño de óxido ferroso (Mitzner, 2009). La placa caliente central es cuadrada con dimensiones de 15 cm x 15 cm x 0.2 cm, en la cual se enrolla una resistencia eléctrica de alambre de Nicrom (aleación de 80% de Níquel y 20% de Cromo) de 0.4 mm de diámetro, cubriendo ambas caras de la placa. El valor de la resistencia eléctrica de este calefactor es de 70 Ω (valor medido a 20ºC).

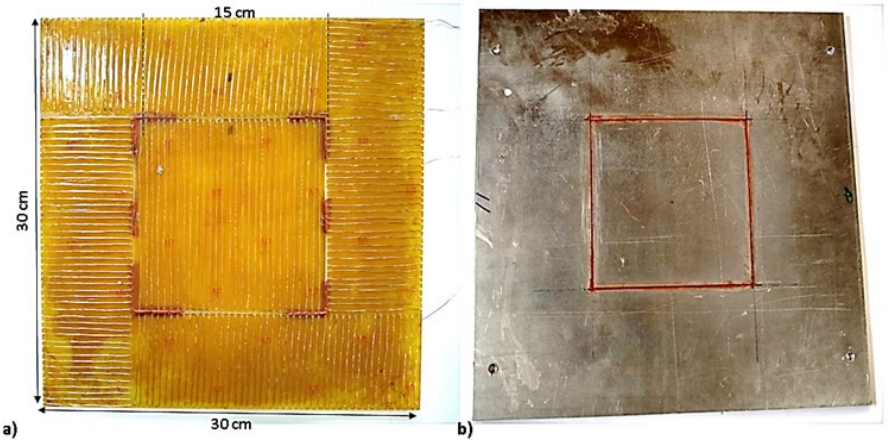


Fig. 3.13: a) Placa calefactora central y de guarda. b) Placa de superficie caliente con guarda.

Los 2 extremos de este devanado salen hacia afuera mediante terminales largos para enchufarlos en la bornera del variador de voltaje que permite seleccionar la temperatura de trabajo. La sección de guarda es de material Pertinax de dimensiones30 cm x 30 cm x 0.2 cm con un hueco central de 15 cm x 15 cm donde se ubica la placa caliente central. Tiene bobinados de alambre Nicrom de 0.4 mm de diámetro en ambas caras de la placa de guarda que dan una resistencia eléctrica de 220 Ω. Los dos extremos de la resistencia eléctrica de la guarda salen hacia la bornera de otro variador de voltaje que permite igualar la temperatura de trabajo de esta franja con la de la placa central. De esta forma, se garantiza la existencia de un flujo de calor unidimensional en la región central de las muestras de hormigón a evaluar, perpendicular a sus caras. A fin de uniformizar la temperatura sobre las caras de las muestras que dan a la placa calefactora, se intercala entre ellas una placa de aluminio de 1.5 mm de espesor

dividida también en una sección central y una sección de guarda según se observa en la Figura 3.13b.

La unidad calefactora tiene una ranura de separación entre las placas de la sección central y la de la guarda. El espacio de esta ranura fue rellenado con silicona para alta temperatura. A fin evitar el contacto eléctrico entre las placas de aluminio y las resistencias eléctricas calefactoras se intercaló entre ellas una película de poliéster denominada Mylar (Figura 3.14).



Fig. 3.14: unidad calefactora en el centro y placas de aluminio cubriéndola.

3.5.2.1 Alimentación eléctrica de la unidad calefactora

Tanto la unidad calefactora central como la resistencia eléctrica de la guarda son alimentadas con Corriente Alterna. Cada resistencia tiene un regulador Dimmer marca RBC Sitel modelo 0520 con los cuales se regulan los voltajes y la potencia disipada en cada una de ellas hasta obtener un flujo de calor uniforme tanto de la sección central como de la guarda.

3.2.3 Unidad de enfriamiento

Las medidas de la superficie de la unidad de enfriamiento son iguales a las de la unidad calefactora, incluyendo el calefactor de la guarda. La unidad de enfriamiento es un sistema compuesto por tres elementos. El primero consiste en una caja de acero inoxidable de 30 cm alto, 30 cm ancho y 3 cm de espesor en contacto con cada probeta a ensayar (Figura 3.15).

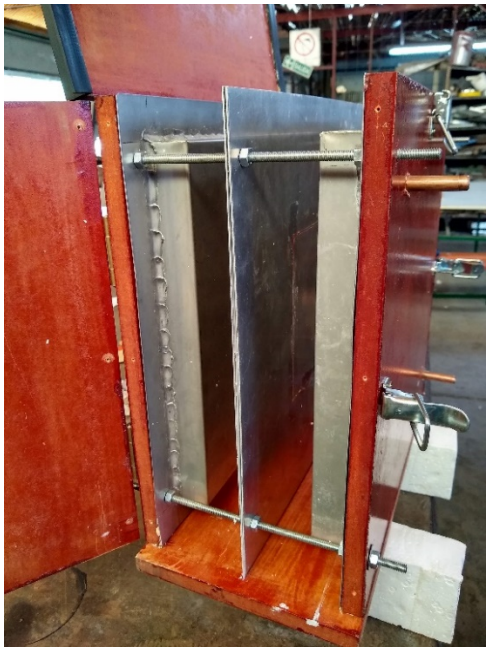


Fig. 3.15: Tanques de acero inoxidable para enfriamiento.

El segundo elemento es el agua, que circula forzada por una bomba por el interior de los tanques de acero inoxidable a razón de 1.25 l/min. El fluido ingresa por la parte inferior de la caja metálica y sale por la parte superior, extrayendo el calor que atraviesa la probeta de ensayo. El agua que sale de la caja, a una temperatura mayor a la que ingresó, pasa a un intercambiador de calor aire-agua de flujo cruzado del tipo radiador de automóvil a fin de disipar el calor extraído de la muestra. El aire circulado por este intercambiador está a la temperatura ambiente del laboratorio y es impulsado por un ventilador.

La tercera y última parte de la unidad de enfriamiento es un tanque de plástico de 40 litros de capacidad que cierra el circuito de circulación del fluido. En este tanque está instalada la bomba que recircula el agua entre el intercambiador de calor y la caja de acero inoxidable. El detalle de la unidad de enfriamiento se muestra en Figura 3.16.

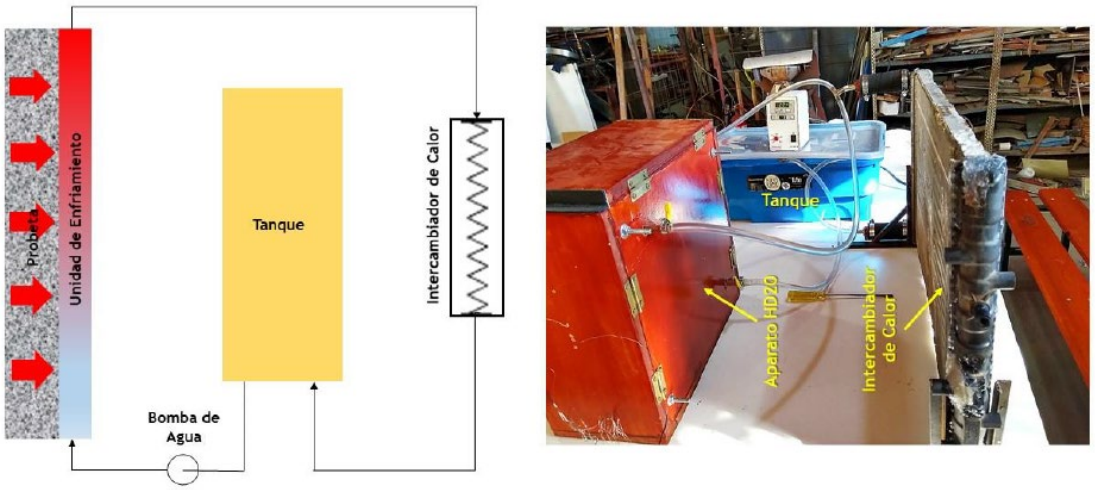
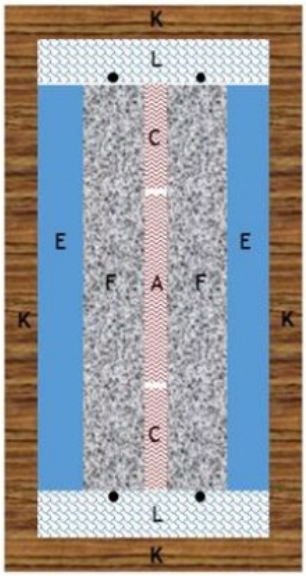


Fig. 3.16: esquema de la unidad de enfriamiento.

3.2.4. Aislación térmica lateral y pérdida de calor

A fin de minimizar la pérdida de calor desde la placa calefactora hacia el exterior y evitar la formación de un flujo de calor bidimensional a través de las probetas de ensayo se deben aislar térmicamente los bordes laterales de la unidad calefactora. Las pérdidas de calor por estos bordes desde la unidad calefactora y las probetas generan gradientes de temperatura en las placas de la sección de guarda perpendiculares a la dirección horizontal, lo que produce una desviación bidimensional en la dirección ideal del flujo de calor concebida como unidimensional (De Ponte & Di Filippo, 1974).

Las pérdidas de calor hacia el exterior provocaran errores en la determinación de la conductividad térmica de las muestras. Estos errores se calculan para probetas homogéneas, isótropas y opacas, bajo condiciones de borde simplificadas. Para reducir estos errores al mínimo, las temperaturas medias de las probetas se aproximan a la temperatura ambiente a fin de minimizar el gradiente térmico a través del borde lateral de la caja del HD20. Para lograr esto, sus aislaciones térmicas laterales son de Poliestireno Expandido (EPS) de 3 cm de espesor cuya densidad es 30 Kg/m^3 y su conductividad térmica 0,0361 W/mK. Finalmente, la envolvente exterior del HD20 es de madera de 1,5 cm de espesor. En la Figura 3.17 se muestra la configuración de las aislaciones laterales y la envolvente de madera del aparato.



(A) Núcleo Calefactor.

(C) Guarda Calefactora.

(E) Unidad de Enfriamiento.

(F) Probetas de Ensayos.

(K) Aislación de Madera.

(L) Aislación Lateral (los puntos negros son Termocuplas).

Fig. 3.17: Configuración de la aislación lateral y envolvente del aparato HD20.

3.2.5. Sistema control electrónico.

Los sensores de diferencia de temperatura entre la zona central y la de la guarda se conectaron en forma diferencial a fin de medir directamente tal diferencia la cual, idealmente, debe ser 0°C. El aparato utiliza termocuplas (Figura 3.18) de alambre grado termopar sólido calibre 20 AWG Tipo K (Cromel-Alumel) de pequeño diámetro (0.51 mm), con certificación ISO 9001:2008, resistencia a la abrasión aceptable y buena resistencia a la humedad hasta 150°C (el aparato HD20 trabaja a una temperatura Max de 75°C). Las temperaturas superficiales sobre la zona central y de guarda se miden también con estas termocuplas colocadas en las superficies de contacto con las probetas.



Fig. 3.18: Termocuplas utilizada en las probetas

Para el control de temperatura de la Unidad Calefactora y la Unidad de Enfriamiento el aparato HD20 utiliza un termostato digital con sonda STC-1000 (Figura 3.19). Primero programamos la Unidad Calefactora, por ejemplo, poniendo un valor de referencia (65°C) y un valor de histéresis (0°C).

De esta manera el termostato encenderá la Unidad Calefactora y la temperatura ira subiendo hasta alcanzar el valor de referencia, en este valor el termostato apagará la fuente de calor. Al bajar la temperatura de la unidad calefactora, del valor de referencia dado, el termostato se volverá a encender y así sucesivamente. Luego programamos la Unidad de Enfriamiento ingresando un valor de referencia (20°C) para que el termostato encienda la bomba de agua. En la Figura 3.19 se muestra el sistema de control electrónico.

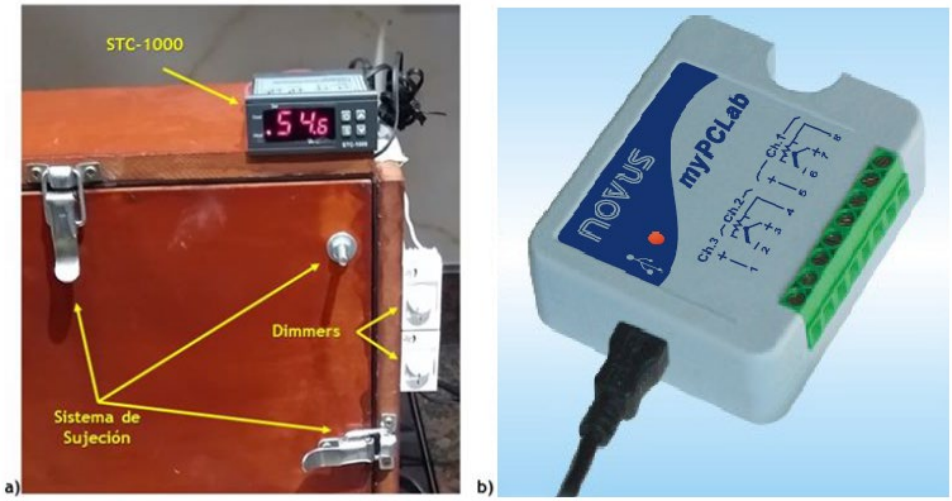


Fig. 3.19: a) sistema de control electrónico. b) curva V-I de la unidad calefactora.

Los datos de temperatura de todos los sensores fueron registrados cada 30 segundos mediante termocuplas tipo K conectadas a dataloggers marca NOVUS myPClab, Figura 3.19 b), cuyas principales características son:

- myPCLab es un módulo de adquisición de variables analógicas robusto y compacto, con entradas configurables e interface USB para comunicación con la PC.
- El software permite el registro histórico de las lecturas de myPCLab, con recursos para visualización gráfica y exportación de datos en diferentes formatos.

➢ Dos entradas analógicas, una entrada digital y sensor interno de temperatura ambiente. Tiene dos entradas analógicas configurables: termopares J, K, T, E, N, R, S y B, termorresistencia Pt100 (3 hilos), 4-20 mA, 0-50 mVcc o 0-10 Vcc. Precisión: 0,2% del rango máximo para Pt100, corriente o tensión; 0,25% del rango máximo ±3°C para termopares R, S y B; 0.25% ±1°C para otros termopares; ± 1,5ºC para sensor interno de temperatura ambiente.

Para medir la potencia eléctrica entregada por la unidad calefactora, tanto la de la sección de guarda como la de la placa central calefactora, se utilizó un Autotransformador VARIAC, Figura 3.20.



Fig. 3.20: Autotransformador que alimenta la Unidad Calefactora.

3.3 Probetas de ensayo

El HD20 está diseñado para alojar dos probetas de hormigón con diferentes agregados, idénticas en forma, dimensiones y constitución. Las probetas están ubicadas verticalmente siendo sus dimensiones 30 cm de alto, 30 cm de ancho y espesor mínimo de 3.7 cm o máximo de 4.2 cm. El espesor de las dos probetas tiene que diferir en menos de 2 %. El apartamiento máximo de la superficie real de las probetas respecto al plano de las placas, tanto de la unidad calefactora como de la unidad de enfriamiento, no deben exceder el 0.025 % en todas las condiciones de operación. Es decir, suponiendo un plano ideal que está en contacto con la superficie en M en la Figura 3.21, en cualquier otro punto O de la superficie la relación entre la distancia N-O desde el plano y la distancia N-M desde el punto de contacto de referencia deberá ser menor que 0.025 %.

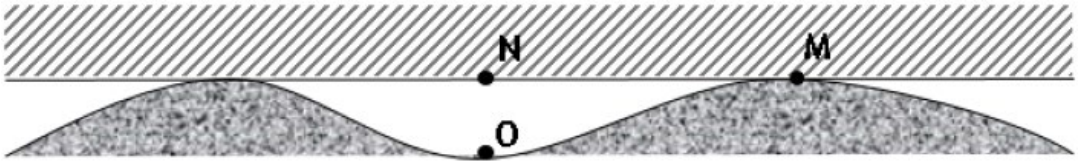


Fig. 3.21: Apartamiento de la superficie de la probeta respecto de un plano de la placa.

3.4 Calibración del aparato HD20

Para la calibración del equipo se utilizaron probetas de hormigón con agregados pétreos de diferentes densidades aparentes, mármol y madera dura, cuyas conductividades térmicas son conocidas y se usaron como probetas de referencia de la norma IRAM 11601 "Acondicionamiento térmico de edificios. Métodos de cálculo. Propiedades térmicas de los componentes y elementos de construcción en régimen estacionario" (IRAM 11601, 2002).

3.5 Detalles generales del funcionamiento

La Tabla 3.4 detalla las características generales del aparato HD20 y las condiciones de operación utilizadas para obtener las propiedades térmicas. Con el sistema de circuito cerrado de la Unidad de Enfriamiento se ahorraron entre 360 litros y 437 litros de fluido por cada ensayo. El tiempo de pruebas de los cinco ensayos duro en promedio 5.5 horas y se utilizaron entre 37 Wh y 64 Wh de calor para mantener la Unidad Calefactora a una temperatura constante.

Tabla 3.4: Características generales del aparato HD20.

Dimensiones del aparato	39 cm x 39 cm x 19 cm
Potencia de operación	Entre 37 W y 64 W
Temperatura Max de operación	75 °C
Tamaño de las probetas	30 cm x 30 cm x espesor (entre 3.7 cm y 4.2 cm)
Orientación de las probetas	Vertical
Volumen de agua utilizada en los ensayos	52.4 litros (circuito cerrado)
Promedio de horas por cada ensayo	5 hs
Método empleado	Placa caliente con guarda para 2 probetas
Peso del aparato	9 kg

En la Figura 3.22 se muestra el sistema completo del aparato HD20.



Fig. 3.22: Sistema de obtención de las propiedades térmicas de los materiales.

En el siguiente capítulo se detallan los resultados de las propiedades obtenidas por el aparato HD20 como así también de las dosificaciones y las densidades de las probetas.

3.6. Errores de Medición

3.6.1 Introducción

Una magnitud física es un atributo de un cuerpo, un fenómeno o sustancia, susceptible de ser medido (Gil, 2010). Ejemplos de magnitudes son la longitud, la masa, la potencia, la velocidad, etc. A una magnitud específica de un objeto que estamos interesado en medir la llamamos mesurando. Por ejemplo, si estamos interesado en medir el espesor de una probeta de hormigón, esa longitud específica será el mesurando.

Para establecer el valor de un mesurando tenemos que usar instrumentos de medición y un método de medición. Asimismo, es necesario definir unidades de medición. Si seguimos el ejemplo anterior, el instrumento de medición será una regla. Si hemos elegido el Sistema Internacional de Unidades (SI), la unidad será el metro y la regla a usar deberá estar calibrada en esa unidad o en submúltiplos de ella. El método de medición consistirá en determinar cuántas veces la unidad y fracciones de ella contenidos en el valor del mesurando.

Todas nuestras mediciones en esta tesis están afectadas de errores o incertidumbres de medición que proviene de las limitaciones impuestas por:

- la precisión y exactitud de los instrumentos usados,
- la interacción del método de medición con el mesurando,

- la definición del objeto a medir,
- la influencia del observador u observadores que realizan la medición.

Coloquialmente, es usual el empleo del término error como análogo o equivalente a equivocación. En ciencia, el error de una medición está más bien asociado al concepto de incertidumbre en la determinación del resultado de la misma. Más precisamente, lo que procuramos en toda medición es conocer las cotas o límites probabilísticos de estas incertidumbres. Gráficamente, buscamos establecer un intervalo como el de la Figura 3.23, donde con cierta probabilidad, podamos decir que se encuentra el mejor valor de la magnitud x. Este mejor valor x es el valor más representativo de nuestra medición y al semiancho Δx lo denominamos la incertidumbre absoluta o error absoluto de la medición.

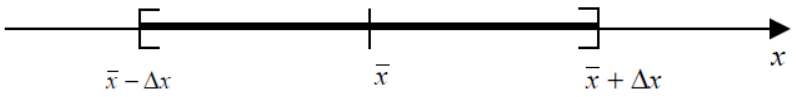


Fig. 3.23: Intervalo asociado al resultado de una medición.

Los instrumentos de medición tienen una precisión finita. La precisión de un instrumento está asociada a la variación mínima de la magnitud que el mismo puede detectar. Por ejemplo, con una regla graduada en milímetros no podemos detectar variaciones menores que una fracción del milímetro. La mínima cantidad que detecta un instrumento se denomina *la apreciación nominal* del instrumento.

La interacción del método de medición con el mesurando también puede introducir errores. Tomemos como ejemplo una medición de temperatura. Cuando usamos un termómetro para medir la temperatura, parte del calor del objeto fluye al termómetro (o viceversa), de modo que el resultado de la medición de la temperatura es un valor modificado del original debido a la inevitable interacción que debimos realizar. Es claro que esta interacción podrá o no ser significativa. Si estamos midiendo la temperatura de un metro cúbico de agua, la cantidad de calor transferida al termómetro puede no ser significativa, pero sí lo será si el volumen en cuestión es de una pequeña fracción del mililitro. Siempre que realizamos una medición, interactuamos con el objeto de la medición.

A su vez, las magnitudes a medir tampoco están definidas con infinita precisión. Imaginemos que queremos medir el largo de un listón de madera. Es posible que al usar instrumentos cada vez más precisos empecemos a notar las irregularidades típicas del corte de los bordes o, al ir aún más allá, finalmente detectemos la naturaleza atómica o molecular del material que la constituye. En este punto la longitud dejará de estar bien definida. En la práctica, es posible que mucho antes de estos casos límites, la falta de paralelismo en sus bordes haga que el concepto de la "longitud del listón" comience a hacerse cada vez menos definido, y a esta limitación intrínseca la denominamos incertidumbre intrínseca debida a la falta de definición de la magnitud en cuestión.

Todas estas limitaciones derivan en que no podamos obtener con certeza "el" valor de un mesurando, sino que solo podamos establecer un rango posible de valores donde pueda estar razonablemente contenido, lo que hacemos evaluando e informando la incertidumbre de la medición. Una forma de expresar el resultado de una medición es con la siguiente notación: $(\bar{x} \pm \Delta x)$ e indicando a continuación la unidad de medición. Además de la incertidumbre absoluta Δx se definen:

- la incertidumbre relativa o error relativo: $\varepsilon_x = \frac{\Delta x}{\bar{x}}$, que expresa cuán significativa es la incertidumbre comparada con el valor medido.
- la incertidumbre relativa porcentual o error relativo porcentual $\varepsilon_{\%} = \varepsilon_x 100\%$.

Estas dos últimas cantidades son descriptivas de la calidad de la medición que el error absoluto.

3.6.2 Propagación de incertidumbres

Hay magnitudes que no se miden directamente, sino que se derivan de otras que sí son medidas en forma directa. Por ejemplo, para conocer la conductividad térmica de un material necesitamos medidas directas como el espesor de la probeta, las temperaturas de la cara fría y la cara caliente, etc. La pregunta que queremos responder aquí es cómo las incertidumbres en las magnitudes que se miden directamente se propagarán para contribuir a la incertidumbre de la magnitud derivada que se calcula usando una expresión. La

Figura 3.24 ejemplifica el concepto de propagación cuando una magnitud y su incertidumbre Δy se calculan a partir de otra x a la cual conocemos su mejor valor x_0 y su incertidumbre Δx.

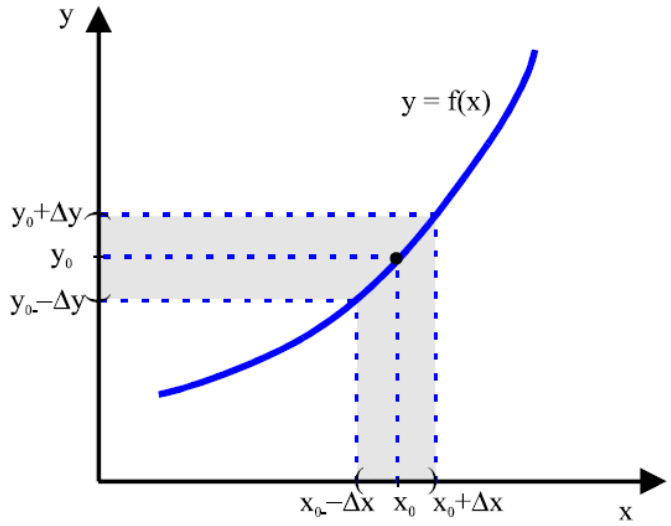


Fig. 3.24: Influencia de la incertidumbre de una magnitud x en la determinación de la incertidumbre de una magnitud derivada.

Tomemos un caso general en el que una magnitud V sea una función de varias magnitudes x, y, z, …. Entonces *V=V(x, y, z,…).*

Que x, y, z, …, todas independientes entre sí, se midieron directamente y que conocemos sus valores <x>, <y>, <z>, … e incertidumbres Δx, Δy, Δz, … Se puede demostrar que la incertidumbre de V, ΔV, está dada por Ecuación (3.10):

$$\Delta V = \sqrt{(\frac{\partial V}{\partial x})^2 \Delta x^2 + (\frac{\partial V}{\partial y})^2 \Delta y^2 + (\frac{\partial V}{\partial z})^2 \Delta z^2 + \cdots} \qquad (3.10)$$

Esta ecuación es la fórmula de propagación de incertidumbre. En el caso especial en que la función V(x,y,z,..) sea factorizable en potencias de x, y, z,…, la expresión anterior puede ponerse en un modo muy simple. Supongamos que la función en cuestión sea como la Ecuación (3.11):

$$V_{(x,y,z)} = a\frac{x^n y^m}{z^t} \qquad (3.11)$$

Donde *a* es una constante. La aplicación de la fórmula de propagación da la Ecuación 3.12:

$$\frac{\Delta V}{V} = \sqrt{n^2(\frac{\Delta x}{x})^2 + m^2(\frac{\Delta y}{y})^2 + t^2(\frac{\Delta z}{z})^2} \qquad (3.12)$$

Para cálculos preliminares, esta expresión puede aproximarse por la Ecuación (3.13):

$$\frac{\Delta V}{V} \approx n\left|\frac{\Delta x}{x}\right| + m\left|\frac{\Delta y}{y}\right| + t\left|\frac{\Delta z}{z}\right| \tag{3.13}$$

Otro caso particular de interés es el de la Ecuación (3.14):

$$.\mathrm{Z} = \mathrm{x} \pm \mathrm{y} \tag{3.14}$$

Usando la Ecuación (3.10) obtenemos la expresión de la ecuación (3.15):

$$\Delta Z^2 = \Delta x^2 + \Delta y^2 \tag{3.15}$$

Usaremos estos conceptos de errores de medición para aplicarlos a los cálculos de los capítulos siguientes.

3.7 Conclusiones del capitulo

Se ha desarrollado un equipo que permite medir las propiedades térmicas de hormigones comunes, hormigones con agregados especiales, más precisamente Polietileno de Alta y de Baja Densidad y Perlita como también hormigones celulares con agregados de desechos.

Este aparato cumple con las especificaciones técnicas de las normas nacionales IRAM 11559, IRAM 11549 e IRAM 11601 de Argentina. Mediante datos conocidos de propiedades térmicas de diferentes hormigones, se validaron los resultados del aparato obteniéndose valores dentro del orden +/-2%.

El circuito cerrado de la Unidad de Enfriamiento permitió ahorrar al menos 360 litros de fluido por cada ensayo. El bajo consumo eléctrico y peso hacen del aparato de Caja Caliente de fácil traslado. El sistema de sujeción brinda seguridad y un sencillo mantenimiento.

El aparato HD20 será de gran utilidad para realizar STAN, laboratorios de las materias transferencia de calor, Laboratorio de Mediciones, cursos de postgrados de la maestría en energía renovables como Introducción a las transformaciones energéticas y Mediciones e Instrumentación. Con esto se cubre una necesidad que el instituto INENCO y la Universidad Nacional de Salta para la medición de propiedades térmicas de nuevos materiales.

Se introdujo el concepto de errores de medición para aplicarlos en los cálculos de las propiedades térmicas como así también de otros cálculos que lo precisen.

Capítulo 4

REVESTIMIENTOS MODULARES AISLANTES PARA CERRAMIENTOS OPACOS

4.1 Concreto u Hormigón, Cemento, Agua y Agregados.

4.1.1 Algo de Historia

Las primeras referencias sobre un aglomerante con características similares al hormigón o el concreto están dadas por Plinio, autor romano, quien se refiere a las proporciones de un aglomerante empleado en la construcción de las cisternas romanas (Figura 4.1), indicando que deben mezclarse: cinco partes de arena de gravilla pura, dos de la cal calcinada más fuerte y fragmentos de sílice.



Fig. 4.1: Primeras Cisternas Romanas de hormigón.

En sus construcciones tanto los griegos como los romanos empleaban material puzolánico mezclado con cal para preparar morteros hidráulicos o concretos. Vitruvius, el gran arquitecto romano, decía de una tufa volcánica llamada puzolana: "Hay una especie de arena la cual, por sí misma, posee cualidades extraordinarias. Si se mezcla con cal y piedra, ella endurece tan bien bajo el agua como en edificios comunes". Los mejores concretos empleados en las más famosas construcciones romanas, fueron hechos de ladrillo roto, cal y puzolana. Primeras dosificaciones cuyos buenos resultados se evidencian hasta la fecha. El panteón de Adriano es un ejemplo de ello.

En 1756, el inglés John Smeaton efectúa una gran investigación de morteros en relación con la construcción del nuevo faro del poblado de Eddystone, en Inglaterra de acuerdo a sus informes, el mortero para trabajar en agua de mar, bajo condiciones de extrema severidad, estuvo compuesto de: "dos

medidas de cal cocida o apagada, en forma de polvo seco, mezcladas con una medida de una tufa volcánica, y ambas bien batidas en forma conjunta hasta lograr la consistencia de una pasta, usando tan poca agua como sea posible".

Joseph Asphin y I.C. Johnson, a mediados de 1824, patentan el denominado cemento Portland estableciendo que este debe ser fabricado combinando materiales calizos y arcillosos en proporciones determinadas, calentando el material en un horno, y pulverizando el producto hasta conseguir un polvo muy fino. Aunque existe una gran diferencia entre este material y los cementos modernos, su descubrimiento permite el creciente desarrollo del concreto (Sánchez, 2016).

Alrededor de 1892, el frances Feret establece los primeros principios modernos para las dosificaciones de mezclas de mortero y concreto. Desarrolla interrelaciones entre las cantidades de cemento, aire y agua, y define inicialmente el papel de los poros de la mezcla de concreto. Sin embargo, no llega a establecer claramente las interrelaciones en la mezcla de concreto como un todo, tal como ellas han sido aplicadas en años posteriores. Hoy en día la preparación del concreto está totalmente normalizada ya que es el material más ampliamente usado en la construcción alrededor del mundo.

4.1.2. Hormigón o concreto

El hormigón como es conocido aquí o concreto como es conocido en el mundo, es un producto artificial compuesto, que consiste de un medio ligante (pegamento) denominado pasta (mezcla del agua con el cemento), dentro del cual se encuentran embebidas partículas (agregados) de diferentes tamaños.

4.1.3. Cemento

Se define como un material pulverizado que posee la propiedad que, por adición de una cantidad conveniente de agua, forma una pasta conglomerante o aglomerante capaz de endurecer tanto bajo el agua como al aire y formar compuestos estables. El cemento es un conglomerante formado a partir de una mezcla de caliza y arcilla calcinadas y posteriormente molidas, que tiene la propiedad de endurecerse al contacto con el agua. Mezclado con agregados

pétreos y agua, crea una mezcla uniforme, maleable y plástica que fragua y se endurece, adquiriendo consistencia pétrea, denominada hormigón o concreto.

Su uso está muy generalizado en construcción. Cuenta con propiedades adhesivas y cohesivas las cuales dan la capacidad de aglutinar otros materiales para formar un todo, sólido y compacto. Su uso se remonta a la antigüedad, desde la época de los egipcios, griegos y romanos, ellos iniciaron por mezclar arena, agua y piedra triturada, por lo que se puede decir que este fue el primer concreto de la historia. Se obtiene a partir de la mezcla de materiales calcáreos y arcillosos, así como de otros que contengan sílice, aluminio y óxidos de fierro. Es un mineral finamente molido, usualmente de color grisáceo extraído de rocas calizas, que al triturarse hasta convertirse en polvo y ser mezclado con agua, tiene la propiedad de endurecer. Su fabricación consiste en la trituración fina, mezclada en ciertas proporciones y calcinada en un horno rotatorio de gran dimensión, a una temperatura de 1400 ºC, donde el material se sintetiza y se funde parcialmente formando bolas conocidas como Clinker, que cuando se enfría el material, se tritura hasta obtener un polvo fino al que se le añade un poco de yeso para obtenerse, como producto final, el cemento Portland (Instituto Español del Cemento y sus Aplicaciones, 2011). En la Figura 4.2 se muestra el Cemento Portland utilizado en esta tesis.



Fig. 4.2.: Cemento utilizado en esta tesis.

Cemento Portland: El cemento Portland debe su nombre a la semejanza, en color y calidad, con la piedra de Portland, una caliza obtenida de una cantera en Dorset, Inglaterra. Este cemento empezó a ser desarrollado por Joseph Aspin, en 1824 (Gallo, Espino y Olvera, 2003). La definición del Cemento Portland

Compuesto, dice que es conglomerantes hidráulico que resulta de la pulverización de clinker frió, a un grado de finura determinado y al cual se le añaden agua y sulfato de calcio natural.

Según el grado de trituración, el cemento puede alcanzar un peso específico bastante elevado. Existen varios tipos de cemento dependiendo de su uso específico. En relación con su color general, se encuentran los cementos grises y blancos. La clasificación general para diferentes tipos de cemento de acuerdo con su propósito específico es la siguiente:

- Cemento tipo 1(Para todos los propósitos). Se usa este tipo de cemento para mezclas de concreto en las que no se requieren de propiedades especiales, sobre todo cuando los elementos estructurales no están expuestos a la acción de sulfatos.
- Cemento tipo 2(Resistente a los sulfatos). Este cemento tiene un propósito específico. Se recomienda su uso en estructuras que van estar expuestas a la acción de cantidades no muy importantes de sulfatos.
- Cemento tipo 3(De resistencia rápida). Este cemento logra alcanzar a la resistencia en poco tiempo (una semana o quizá menos) y nos permite optimizar tiempos de construcción. Se usa en pisos, caminos, baqueta, etc.
- Cemento tipo 4 (De baja temperatura de hidratación). Este tipo de cemento se usa primordialmente en estructuras masivas, tales como presas, donde las temperaturas que se desarrollan durante el fraguado puedan dañarlas.
- Cemento tipo 5 (De alta resistencia a los sulfatos). Se usa en estructuras expuestas a la acción de sulfatos como, por ejemplo, el agua del subsuelo, que tiene gran contenido de este material.

El cemento es un elemento muy útil en la construcción, en la mayoría de los casos insustituible en muchos trabajos. Cuando lo mezclamos con agua formamos una lechada que utilizamos para los techos de las construcciones. En combinación con arena y agua podemos obtener un mortero para utilizarse en el

pegado de ladrillo, tabique, tabicón, piedra, de igual manera se puede utilizar como aplanado en muros interiores y exteriores. Cuando mezclamos el cemento con grava, arena y agua formamos el concreto. Como podemos observar el cemento nos sirve para pegar (tabique, block, etc.), lechear azoteas, fabricar tabique, aplanar, de igual manera se utiliza para fabricar mosaicos, muebles de baño, tuberías, pisos de rodamiento vehicular, losas, muros, etc. Pero no sólo se le utiliza en la vivienda, sino también para construir caminos, aeropuertos, puentes, fábricas, etc. Además, la construcción de plantas de tratamiento de aguas residuales, drenajes y acueductos se hace con este producto.

El cemento es un excelente estabilizante de residuos tanto municipales como industriales, que deben ser tratados antes de ir a rellenos sanitarios. La industria del cemento puede colaborar también para mejorar el ambiente. Su mejor aporte en este sentido consiste en la utilización de los hornos de fabricación de clinker para eliminar de una manera segura y definitiva una gran cantidad de residuos. Los hornos tienen la característica de aceptar como combustible muchos subproductos que tienen energía térmica (generan calor), municipales, llantas, plásticos, finos de coque, residuos hospitalarios (IMCYC, 2011).

Se utilizó para esta Tesis el cemento categorizado de acuerdo a Norma IRAM Nº 50000 como CPC 30, la elección del mismo se basa en que es el cemento más común en el mercado en la zona donde se realizarán las dosificaciones de este trabajo. El CPC 30 es Cemento Portland Compuesto (filler calcáreo + escoria granulada de alto horno) según Tabla 4.1, con requisitos mecánicos de resistencia a la compresión para 28 días máxima 50 MPa. En la Tabla 4.2 se detallan los requisitos mecánicos del cemento utilizado.

Tabla 4.1: Composición y tipo de cemento.

Tipo de cemento	Composición (g/100 g)	
	Clinker + sulfato de calcio	Puzolana (P), Escoria (E), Filler calcáreo (F)
Cemento Portland compuesto (CPC)	98-65	Dos o más, con P+E+F≤ 35

Tabla 4.2: Requisitos de las Normas para el Cemento.

Requisitos			Unidad	Mínimo	Máximo	Método de ensayo
Finura	Material retenido sobre el tamiz IRAM 75μm		g/100 g	-	15	IRAM 1621
	Superficie especifica	Promedio	m^2/kg	250	-	IRAM 1623
		Individual		225		
Constancia de volumen	Expansión en autoclave		%	-	1	IRAM 1620
Tiempo de fraguado	Inicial		minutos	45	-	IRAM 1619
	Final		horas	-	10	
Contracción de secado (*)	A los 28 días de la lectura inicial		%		0,15	IRAM 1651-2
Requerimiento de agua, por ciento por masa de cemento (**)			g/100 g		64	
Resistencia a la compresión a los 28 días			MPa	30	50	IRAM 1622

4.1.4 Los agregados

Empleados en la elaboración del hormigón o concreto (arena, piedra) provienen de la erosión de las rocas por acción de agentes naturales, también son obtenidos mediante trituración mecánica y tamizados de rocas. Los agregados reciclados livianos provienen de dos plantas recicladoras y el neumático reciclado triturado de una gomería local.

Agregado fino o arena (Figura 4.3) es el material que pasa la malla estándar Nº 4 (4,75 mm). Agregado grueso o piedra (Figura 4.3) es el agregado retenido en dicha malla o tamiz. Tanto la arena como la piedra están constituidas por partículas de diversos tamaños. La distribución por tamaño de las partículas es lo que se conoce como granulometría; se obtiene mediante ensayo normalizado, haciendo pasar los agregados a través de mallas estandarizadas, y se expresa en función de los porcentajes retenidos en cada una de ellas, con respecto al peso total de la muestra.



Fig. 4.3: Agregados gruesos y finos provenientes del rio Rosario y utilizados para esta Tesis

La granulometría de los agregados transciende decisivamente en las propiedades que caracterizan al concreto, tanto en su estado fresco como endurecido. Al respecto, es aceptado considerar granulometrías apropiadas para elaborar concreto a aquellas que permitan obtener mezclas lo más densas posibles y favorecen su trabajabilidad. La Norma (IRAM Nº 1505, 2003) incluye tablas de granulometría apropiadas, tanto para la arena como para la piedra; no obstante, la misma norma señala que podrán autorizarse otras gradaciones, siempre y cuando existan estudios calificados que aseguren que con el material propuesto se obtenga concreto de la calidad requerida.

4.1.5 Agua

Es el catalizador del cemento, el agua presente en la mezcla del concreto reacciona químicamente con el cemento para lograr la formación de gel y permitir que el conjunto de la masa adquiera propiedades que en estado fresco faciliten una adecuada manipulación y colocación de la misma y en estado endurecido la conviertan en un producto de las propiedades y características deseadas.

Se usa generalmente agua potable, si no está disponible se podrá usar agua de río, de lago, de afluentes naturales, entre otras, siempre y cuando estén claras, no tengan olor apreciable y cumplan con los requisitos químicos estipulados en las normas. Las mezclas se realizaron utilizando agua potable de red basadas en la norma IRAM 1601,2012. El reglamento CIRSOC 201 (2005),

normaliza que el agua empleada para lavar los agregados y mezclar y curar el hormigón, cumplirá con los requisitos establecidos en dicha norma.

4.2. Propiedades del Hormigón

Las propiedades del hormigón (resistencia, durabilidad, fluidez, trabajabilidad, entre otras.) están determinadas fundamentalmente por las características físicas y químicas del cemento, agua y agregados, es por ello la importancia de usar un cemento adecuado, agua potable y agregados de calidad.

4.2.1 Resistencia a la compresión

Es el máximo esfuerzo que puede ser soportado por dicho material sin romperse. Dado que el concreto está destinado principalmente a tomar esfuerzos de compresión, es la medida de su resistencia a dichos esfuerzos la que se utiliza como índice de su calidad.

4.2.2 Durabilidad

Es la capacidad, una vez endurecido, de mantener sus propiedades en el tiempo, aún en aquellas condiciones de exposición que normalmente podrían disminuir o hacerle perder su capacidad estructural. Por tanto, se define como concreto durable a aquel que puede resistir, en grado satisfactorio, los efectos de las condiciones de servicio a las cuales el concreto está sometido.

4.2.3 Fluidez o consistencia

Es una propiedad, en estado fresco, que define la humedad de la mezcla por el grado de fluidez de la misma; entendiéndose con ello que cuanto más húmeda es la mezcla, mayor será la facilidad con la que el concreto fluirá durante su colocación.

4.2.4 Trabajabilidad

Es la propiedad del hormigón en estado fresco la cual determina su capacidad para ser mezclado, manipulado, transportado, colocado y consolidado adecuadamente, con un mínimo de trabajo y un máximo de homogeneidad; así como para ser acabado sin que se presente segregación.

4.2.5. Requisitos de la mezcla de Hormigón

Las mezclas de hormigón deberán cumplir los siguientes requisitos básicos:

- La mezcla recién preparada deberá tener la trabajabilidad (capacidad de ser mezclado, transportado, colocado, vibrado y acabado con el mínimo esfuerzo), consistencia (fluidez) y cohesividad que permita su adecuada colocación en los encofrados. Esta mezcla deberá estar libre de segregación (separación del agregado grueso de la mezcla) y tener una exudación (afloramiento hacia la superficie del agua como consecuencia de la sedimentación de los agregados) mínima.
- La mezcla endurecida deberá tener las propiedades especificadas en función del empleo que se va a dar a la estructura, generalmente la resistencia a la compresión a 28 días de tiempo, la cual esta especificada en los planos de la vivienda social, expresada en kg/cm^2 o MPa.
- El costo del metro cúbico de hormigón endurecido deberá ser el mínimo compatible con la calidad deseada, he aquí donde radica la importancia de la selección adecuada del cemento, los agregados, el agua y la realización del diseño de mezclas en un laboratorio de materiales competente, que en este caso es el INENCO y el ICMASA.

4.3 LWC

Lo más indudable del hormigón liviano o ligero LWC (del inglés Light Weight Concrete) es su densidad, la cual es siempre considerablemente menor que la del hormigón convencional y con frecuencia solo una fracción de la misma (Sánchez, 2015). Las ventajas de tener materiales de construcción con baja densidad son muy numerosas; por ejemplo, reducción de las cargas muertas, mayor rapidez de construcción, menores costos de transporte, acarreo, baja transmitancia térmica y por ende bajo consumo en la climatización y acondicionado de la vivienda.

Las definiciones de hormigón ligero varían un poco entre las normas para determinar el límite de la masa específica. En general, se caracterizan por tener una densidad inferior a 2.000 kg/m^3 (Rossignolo et. al, 2005).

Los hormigones ligeros se definen en el American Concrete Institute (ACI 213R, 1987) como aquéllos que poseen una densidad en estado seco al aire menor a 1850 kg/m³, y pueden clasificarse en tres tipos:

- Hormigón sin finos: se obtiene por la eliminación del agregado fino, generando vacíos en la masa de hormigón.
- Hormigón aireado: se genera en su interior, la formación de numerosas y pequeñas celdas por la incorporación de aire o gas en el seno de la masa del hormigón fresco mediante la utilización de un aditivo.
- Hormigón con agregados livianos: consideran el reemplazo parcial o total del árido normal por otro de menor densidad. Su clasificación se observa en la Figura 4.4.

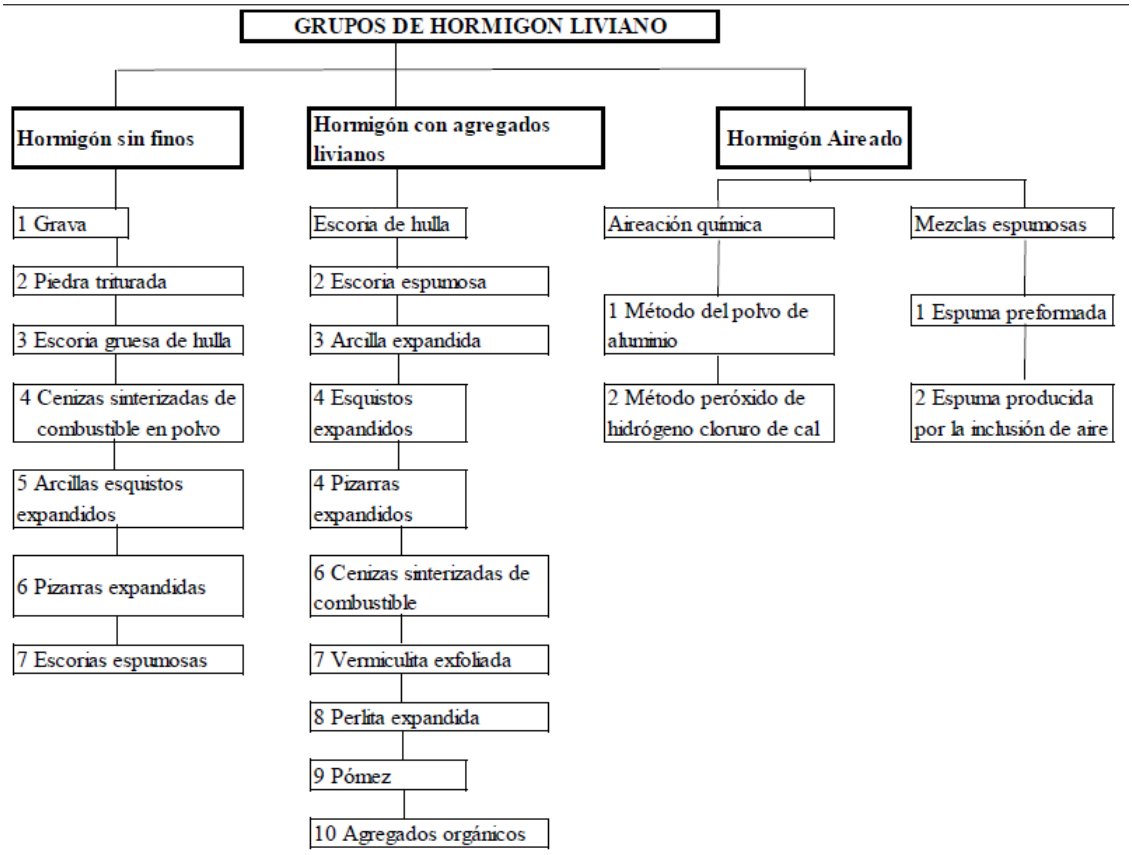


Fig. 4.4: Clasificación de los hormigones livianos según el American Concrete Institute (Sánchez, 2015).

Las ventajas que presenta este tipo de hormigón ligero son (Sánchez, 2015):

- Disminuye el peso en estructuras y cargas a la cimentación.
- Ofrece un ahorro significativo en el consumo de energía eléctrica, tanto en climatización como en acondicionamiento.
- Su colocación y acabado son más económicos.
- Baja densidad.
- Buena aislación acústica.

Las desventajas que presenta este tipo de hormigón son (Sánchez, 2015):

- Los agregados livianos podrían ser más caros que la piedra común, pero esta diferencia podrá ser compensada con un menor costo en el transporte e incluso puede influir en el tipo de cimentación favorablemente.
- Debido a que el módulo de elasticidad es bajo se pueden producir mayores deformaciones que las de un hormigón convencional.
- No se puede determinar el grado de incidencia en la relación de agua-cemento debido a su gran absorción.
- La contracción por secado es mayor a la del hormigón convencional y por lo tanto debe tenerse en consideración en el dimensionamiento de los elementos constructivos.
- La falta de experiencia en el uso del hormigón liviano lo cual genera inconvenientes en su uso y elaboración
- Debido a su gran absorción se presentan problemas de corrosión del acero de refuerzo, pero este problema se reduce al aumentar el recubrimiento de la armadura.

4.4 Plásticos

Según Smith et al. 2001, la gran mayoría de los materiales de ingeniería están divididos en tres grupos principales: materiales metálicos, cerámicos y poliméricos. Los materiales poliméricos generalmente están formados por grandes cadenas de moléculas orgánicas o redes. Estructuralmente, la mayoría de los materiales poliméricos no son cristalinos, pero algunos constan de mezclas

de regiones cristalinas y no cristalinas. La rigidez y ductilidad de los materiales poliméricos varía significativamente. Debido a la naturaleza de su estructura interna, la mayoría de estos materiales son malos conductores de la electricidad. Algunos de estos materiales son buenos aislantes, de ahí su aplicación en aislamiento eléctrico. En general, los materiales poliméricos tienen baja densidad y temperatura de fluencia (ablandamiento) o descomposiciones relativamente bajas (Smith, 2001).

Los materiales compiten unos con otros por su existencia y por los nuevos mercados. De unos a otros períodos de tiempo, aparecen muchos factores que hacen posible la sustitución de un material por otro para ciertas aplicaciones. Evidentemente, el costo es un factor. Si se hace un descubrimiento importante en el proceso de un cierto tipo de material, de manera que su costo se abarate sustancialmente, este material puede reemplazar a otro en ciertas aplicaciones. Otro factor que da lugar al reemplazo de los materiales, es el desarrollo de un nuevo material con propiedades especiales para algunas aplicaciones (Sánchez, 2015).

4.5 Desechos de neumáticos

Cada año se desechan, tiran o entierran millones de neumáticos en todo el mundo, lo que representa una amenaza muy grave para la ecología. Para el año 2030, se estima que habrá 5000 millones de llantas que se desecharán regularmente (Thomas et al., 2016). Los neumáticos desechados a menudo conducen a la "contaminación negra" o “black pollution”, porque no son biodegradables y representan una amenaza potencial para el medio ambiente (Nehdi y Khan, 2001). Por ejemplo, las llantas sin el tratamiento adecuado causan ocupación del suelo, riesgo de incendio y contaminación (Brandsma et al., 2019). En los vertederos, las llantas de caucho no se degradan fácilmente, pero con el tiempo flotan hacia arriba debido a los gases atrapados (Juma et al., 2006). La combustión de los neumáticos puede reciclar parte de la energía, pero produce gases tóxicos que requieren costosos sistemas de control de emisiones al aire.

El desarrollo económico va acompañado de un aumento en la demanda de varios productos, incluidos los productos de caucho, lo que genera cantidades cada vez mayores desechos de caucho cada año en todo el mundo. Los desechos

de caucho comprenden neumáticos usados, tubos de caucho, correas de caucho, zapatos de caucho, artículos técnicos de caucho y desechos de caucho producidos durante la fabricación de productos de caucho. Los neumáticos usados tienen una parte considerable de todos los productos de desecho de caucho. En la actualidad, el consumo anual de caucho natural supera los 15 millones de toneladas y la producción de productos de caucho supera los 31 millones de toneladas en todo el mundo (ETRMA, European Tire & Rubber Manufacturers' Association, 2019).

Sin embargo, el manejo de estas cantidades de desecho es un problema grave en todo el mundo. En la actualidad, algunas de las posibles soluciones para la eliminación de los desechos de neumáticos usados, como los vertederos o la incineración, se han vuelto cada vez menos viables debido a los problemas ambientales y los altos costos de recuperación. Las tecnologías de reciclaje actuales para residuos de neumáticos solo permiten la reutilización parcial de los residuos de neumáticos, lo que lleva a la necesidad de soluciones alternativas. La alternativa que se presenta en esta tesis doctoral es el uso de estos desechos en la fabricación de ladrillos o bloques para la vivienda social.



Figura 4.5: Partes típicas de un neumático.

En la Figura 4.5 se muestra una estructura de neumático típica. Los neumáticos, según los fabricantes, tienen diferentes valores porcentuales para los materiales que contienen, pero los valores promedio de los materiales utilizados

para los diferentes tipos neumáticos se presentan en la Tabla 4.4 (ETRMA, 2019). Como muestra dicha tabla, los neumáticos pueden tener más elementos en su composición, pero los ingredientes básicos son elastómeros de caucho, carbón negro o humo negro, insertos metálicos e insertos textiles.

Tabla 4.4: composición promedio de un neumático en % del peso.

Ingredientes	Elastómeros de caucho	Carbón negro o humo negro	Metal	Textil	Oxido de Zinc	Otros
Automóvil de pasajeros	48	21.4	15.6	5.5	1	8.5
Camión	45	22	23	3	2	5
Todo terrenos	47	22	12	10	2	7

4.5.1 Reciclaje de neumáticos

Los desechos de neumáticos de camiones, de acero y caucho natural se procesan mediante la producción de llantas recauchutadas, caucho reciclado o polvo de caucho. Al mismo tiempo, los desechos de neumáticos de automóviles de pasajeros de semiacero y caucho sintético fluyen hacia pequeños talleres no calificados, causando daños irreparables al medio ambiente ecológico. Esto requiere una forma más viable de tratar las llantas de desecho y recuperar productos valiosos de ellas.

El caucho reciclado, fabricado con caucho triturado, posee las ventajas de un precio bajo y un buen rendimiento en el procesamiento. Puede reemplazarse parcialmente o fabricarse por separado como un producto de caucho utilizable (Hassan et al., 2019). Sus defectos son poca elasticidad, resistencia al agrietamiento por flexión y resistencia al desgarro. También se han planteado preocupaciones sobre la exposición a sustancias químicas cancerígenas resultantes del contacto con campos de césped sintético fabricados con caucho recuperado (Perkins et al., 2019).

A través de la sustitución del caucho de la banda de rodadura, la producción de neumáticos recauchutados se utiliza ampliamente en la ingeniería

de neumáticos a partir de neumáticos para camiones. Puede mejorar significativamente el ciclo de vida de los neumáticos, reduciendo el costo de las empresas y el desperdicio de recursos (Simic y Dabic-Ostojic, 2017). Sin embargo, esto no se aplica en algunas condiciones que requieren neumáticos de mayor calidad. Al mejorar su desempeño, como reciclar los neumáticos en materiales de ingeniería civil (Siddique y Naik, 2004), puede reducir el impacto ambiental causado por los neumáticos acumulados (Ortiz-Rodriguez et al., 2017). No existe un método de reciclaje para los productos mencionados anteriormente. Por lo tanto, esto es solo posponer la solución final. Los productos de desechos de caucho aún requieren un método de disposición final (Lonca et al., 2018).

Dados estos aspectos, es necesario encontrar soluciones técnicas que permitan un reciclaje eficiente de los residuos de neumáticos usados para reducir la contaminación ambiental y lograr una economía circular eficiente. Para obtener una circularidad eficiente de los productos de caucho, es necesario evaluar sus principales herramientas de análisis para evitar efectos no deseados (por ejemplo, es necesario evaluar los grandes procesos de reciclaje que consumen energía y pueden llegar a ser contaminantes para el medio ambiente). Por lo tanto, para garantizar una economía circular sostenible, es necesario conservar los recursos y reducir los depósitos de neumáticos usados.

Es necesario encontrar tecnologías que aseguren un uso superior de los materiales secundarios de los neumáticos usados, aumentando así, en estas condiciones, las posibilidades de recuperación de dichos residuos y asegurando una economía circular eficiente (Dobrota, 2020). En este capítulo se analizaron los parámetros Evaluación del Ciclo de Vida (LCA) y el Indicador de Circulación de Materiales (MCI). Los estudios han demostrado que la extensión de la vida mediante la introducción de materiales reciclados en la estructura de un neumático mejora el indicador de circulación de los materiales de un neumático, pero no tiene un impacto considerable en la salud humana y los ecosistemas (Lonca et al., 2018). Para reducir el desperdicio de neumáticos, ciertos componentes, que siguen siendo funcionales y valiosos, deberían poder recuperarse para su reutilización y/o reconfiguración. Una posible solución

consiste en recauchutar neumáticos conservando la estructura básica del neumático, sobre la que se deposita una nueva capa de caucho (Shulman, 2019).

El polvo de caucho es una sustancia pulverulenta obtenida del caucho vulcanizado por desgaste mecánico. Es un tipo de material en polvo elástico especial con las características básicas del material en polvo. Tiene una amplia gama de aplicaciones: se puede utilizar como pastilla de freno, bobina impermeable para techos, junta mecánica, cojín, material absorbente de sonido, etc. (Silva et al., 2019). La desventaja es que la resistencia a la tracción de la mezcla se reduce y la resistencia a la fatiga es pobre. El proceso de mezcla requiere altos requisitos en la fórmula.

La utilización de la energía térmica consiste en tratar desechos de neumáticos como combustible, solas o mezcladas con desechos combustibles. Aunque la combustión para recuperar energía térmica es simple, conducirá a la contaminación del aire. Sin embargo, la nueva utilización termoquímica, como la tecnología de craqueo térmico, puede hacer que los bloques de neumáticos de desecho sufran una reacción de presión atmosférica/negativa para obtener carbón negro o humo negro, alambre de acero, fuel oíl y una pequeña cantidad de gas no condensable. Se encontró que las personas pueden usar los productos de pirólisis en diferentes aplicaciones, logrando la utilización completa de los recursos de llantas de desecho (Kommineni et al., 2018).

En la Figura 4.6 se detalla el proceso de obtención de los desechos de neumáticos utilizados como agregados para la fabricación de los ladrillos y bloques de esta tesis. Mientras que en la Figura 4.7 se muestra el desecho de neumático triturado.

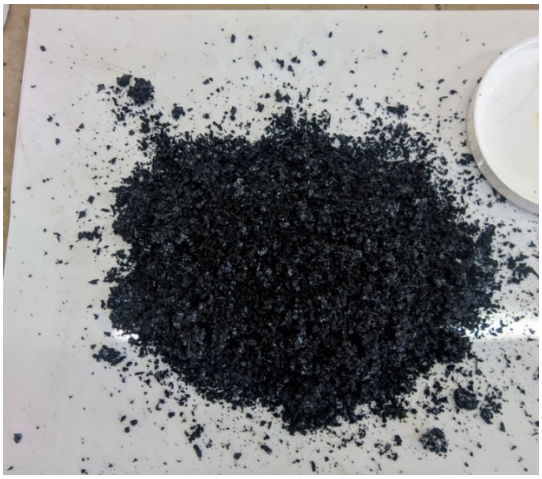


Fig. 4.7: Desecho de neumático triturado utilizado en esta tesis.



Figura 4.6: Proceso de triturado de los neumáticos usados.

4.6 Desechos plásticos.

Desde 1855, la producción de plástico se ha utilizado ampliamente en muchas aplicaciones, incluidos productos de consumo e industriales. Este polímero versátil reemplazó con éxito muchas materias primas como la madera, el metal y el papel en la fabricación de múltiples productos (Lebreton, 2019). Puede deberse a las notables propiedades del plástico, como el bajo costo, la facilidad de uso, su peso ligero, la durabilidad y la resistencia. Los plásticos se han utilizado en muchas industrias, como la del embalaje, la electrónica, la automovilística, así como en los sectores médico y sanitario (P. Europe,2019). El creciente consumo de plástico en diversas industrias y sectores ha llevado a la generación de un alto volumen de residuos plásticos en el mundo. En 2018, la

producción mundial de plástico fue de casi 360 millones de toneladas, se multiplicó 200 veces desde 1950 (P. Europe,2019).

La inmensa cantidad de desechos plásticos producidos diariamente también ha aumentado los problemas relacionados con estos, como la contaminación por microplásticos, la contaminación de la cadena alimentaria, la descomposición de la biodiversidad y también la pérdida económica. Según la EPA (2019), alrededor del 8,4 % se reciclo del total de residuos plásticos generados, mientras que el 75,8 % se acumuló en vertederos y en el medio ambiente. La Figura 4.8 muestra la tendencia histórica para la gestión y eliminación de desechos plásticos desde 1950 hasta 2015 y también las proyecciones de datos hasta 2050.

El plástico es un maravilloso invento; sin embargo, debido a sus propiedades no biodegradables, ha tenido diversas repercusiones en el medio ambiente. La contaminación por este producto se ha convertido en la amenaza más importante en la civilización moderna, ya que ha provocado contaminación ambiental y ha afectado a la economía (Saikia, 2012). El alto volumen de residuos plásticos acumulados en el medio ambiente ha amenazado muchas vidas marinas y la sostenibilidad del medio ambiente. El plástico arrojado a los ríos y océanos tiende a contaminar el agua y provoca la degradación de varios compuestos tóxicos de los desechos plásticos después de la exposición a la luz solar extrema y las fuerzas físicas de las olas (Wong, 2020).

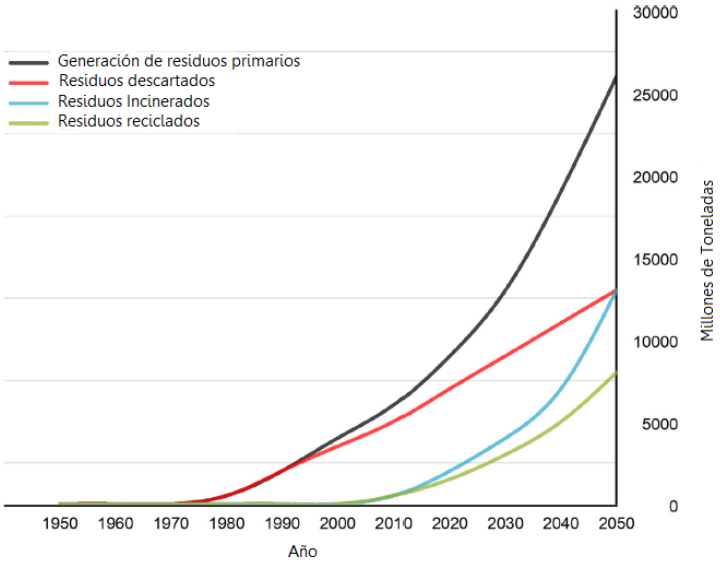


Fig. 4.8: Tendencia histórica para la gestión y eliminación de desechos plásticos (Geyer, 2017).

La meteorización del plástico en pequeñas partículas también condujo a la bioacumulación y biomagnificación en los animales y, finalmente, dañó su salud (Barboza, 2020). Aparte de eso, los desechos plásticos también pueden interrumpir el sistema de drenaje y provocar la reproducción de mosquitos y enfermedades transmitidas por el agua (Saika,2012). El drenaje bloqueado también provocará problemas de inundación (Lebrenton, 2019). Además, la gran cantidad de residuos plásticos que normalmente se depositan en vertederos en lugar de reciclarse también se ha convertido en una razón importante para descubrir una gestión adecuada de los residuos plásticos (Ozbakkaloglu, 2016). El alto costo y la energía requerida para el proceso de vertido han provocado que parte de los desechos plásticos se acumulen o se arrojen al medio acuático (Awoyera, 2020). Como resultado, el plástico ha contribuido a muchos problemas ambientales y al mismo tiempo representa peligros para los habitantes debido a su baja propiedad biodegradable.

4.6.1 Reciclaje de los plásticos

Para la protección del medio ambiente y el desarrollo sostenible, el reciclaje de plástico es una alternativa factible para gestionar los residuos plásticos (Kamaruddin, 2017). En las últimas décadas, el uso de residuos plásticos en la construcción ha sido ampliamente estudiado (Kolisetty, 2013). En la mayoría

de los casos, los residuos plásticos se han utilizado en hormigones o morteros, ya sea como agregado de árido fino o grueso (Babafemi, 2018). Se ha estudiado una amplia variedad de materiales de desecho plástico, por ejemplo, tereftalato de polietileno (PET), polietileno de alta densidad (HDPE), cloruro de polivinilo (PVC), polietileno de baja densidad (LDPE), polipropileno (PP), policarbonato, metalizado residuos plásticos (MPW) y también poliestireno (PS).

Las excelentes propiedades como durabilidad, liviandad, resistencia, dureza y alto aislamiento térmico hacen que los residuos plásticos sean aptos para ser utilizados y reciclados en la industria de la construcción. Por lo tanto, la utilización de residuos plásticos en el proceso de fabricación de materiales de construcción o compuestos cementosos se convierte en un gran esfuerzo para reducir los impactos ambientales (Kamaruddin, 2017). De hecho, reemplazar los recursos naturales con materiales de desecho también minimizará el daño ambiental y el agotamiento de los materiales naturales causado por la explotación de canteras y la explotación de los agregados naturales (Kolisetty, 2013). También brinda una ventaja económica para reducir el costo de los materiales convencionales después de reemplazar una porción particular de agregado en la mezcla de concreto o mortero.

La acumulación de plástico sigue aumentando día a día debido a sus propiedades no degradables, así como a los métodos de eliminación y uso no sostenibles (Prata,2019). Los desechos plásticos postconsumidos generalmente se manejan con tres métodos comunes que incluyen el vertido, la incineración y el reciclaje (Ozbakkaloglu, 2016). Sin embargo, estos métodos no tienen un impacto significativo en la reducción de la cantidad de residuos plásticos, por lo que estos métodos tampoco son relevantes para la práctica, ya que el vertido y la incineración no son respetuosos con el medio ambiente. La reutilización y el reciclaje de los desechos plásticos son más efectivos que la incineración y el vertido, pero las estrategias de reciclaje actuales no pueden mitigar los efectos adversos de la contaminación plástica debido a la cantidad cada vez mayor de desechos plásticos que se producen a diario. Por lo tanto, es muy necesario encontrar una aplicación sostenible para la gestión de residuos plásticos para superar estos problemas (Zulkernain, 2021).

4.6.1.1 Vertido de desechos plásticos

El vertido es una técnica antigua en el manejo de la mayoría de los desechos sólidos, incluidos los desechos plásticos (Vanapalli, 2019). Se estimó que entre el 22% y el 43% de los desechos plásticos en todo el mundo se eliminan en vertederos (Hester, 2020). Es la práctica más habitual para los plásticos no reciclables enterrándolos en el suelo.

El vertido de plástico en vertederos se considera el último recurso en la gestión de los residuos plásticos porque requiere una gran cantidad de espacios, pero puede causar un problema de contaminación a largo plazo (Ozbakkaloglu, 2016). El costo de operación en el vertido de residuos plásticos puede ser bastante bajo en comparación con otros métodos de eliminación; sin embargo, a menudo se cuestiona la sostenibilidad ambiental de este método. El riesgo de que los aditivos y otros contaminantes potenciales se descompongan de los desechos plásticos y eventualmente contaminen el sistema de aguas subterráneas ha sido una gran preocupación a lo largo del tiempo (Oehlmann, 2009). Una cantidad considerable de aditivos plásticos y sustancias químicas pueden liberarse de los desechos plásticos y, en consecuencia, estar presentes en los lixiviados de los vertederos (Teuten, 2009). Esto implica que es probable que los aditivos plásticos y los monómeros se liberen en los lixiviados de los vertederos, lo que puede provocar la contaminación del sistema de aguas subterráneas y el medio ambiente acuático.

4.6.1.2 Incineración de desechos plásticos.

La incineración es ampliamente utilizada como uno de los métodos de eliminación para reducir el volumen de desechos sólidos (National Research Council, 2000). Este tratamiento térmico también se aplica comúnmente a los desechos plásticos en muchos países como Dinamarca, Noruega y Suecia (Seltenrich, 2021). La incineración es un método tradicional en el manejo de desechos plásticos que redujo significativamente la necesidad de vertederos de plástico (Chun-Teh Li, 2001). La incineración es capaz de reducir entre un 80% y un 90% de varios tipos de desechos, y esto se considera una ventaja (Yogalakshmi, 2021). Sin embargo, la incineración ha sido evaluada como un método ecológicamente inaceptable en la última década debido a las cargas

ambientales y el riesgo potencial para la salud humana (Subramanian, 2019). La incineración de desechos plásticos es una amenaza para el medio ambiente, ya que puede causar contaminación atmosférica (Subramanian, 2019). La quema de desechos plásticos emite humos tóxicos, emisiones peligrosas, sustancias nocivas, incluidas partículas, monóxido de carbono, dioxinas y furanos; metales, gases ácidos, compuestos orgánicos clorados volátiles y compuestos aromáticos policíclicos (Malaysia's Performance Management And Delivery Unit, 2015).

4.6.1.3 Reciclado de residuos plásticos

El reciclaje es la práctica principal para la gestión de residuos plásticos en muchas partes del mundo, aparte del vertido y la incineración (Ozbakkaloglu, 2016). Siempre se ha visto como un método efectivo que puede minimizar el impacto ambiental y el agotamiento de los recursos (Hopewell, 2009).

El reciclaje de desechos plásticos se incluye con varios métodos de reciclaje, como el reciclaje mecánico, químico y térmico. El reciclaje y la reutilización de materiales tienen muchas ventajas. Puede reducir el tiempo, el costo, el consumo de energía y el uso de material virgen por unidad de producto (Kapoor, 2019). En ese sentido, la utilización de desechos plásticos en aplicaciones de ingeniería civil recientemente ganó mucha atención, ya que este enfoque ha considerado que puede enfrentar problemas notables de contaminación plástica.

De esta manera, los residuos plásticos se convierten en un agregado de construcción donde reemplazan al agregado convencional durante la producción de materiales de construcción. Por este método, los residuos plásticos no implican ningún tratamiento de reciclaje intenso. Se puede utilizar directamente en materiales de construcción como alternativa al árido convencional. En este sentido, los residuos plásticos se disponen dentro de los materiales de construcción endurecidos. Evita un retorno directo al medio ambiente, a diferencia de los vertederos y la incineración de plásticos, que contribuyeron con algunas consecuencias ambientales a través del proceso de lixiviación y calentamiento (Mousavimehr, 2020). Los residuos plásticos en los materiales de construcción pueden mejorar algunas propiedades mecánicas y físicas de los materiales producidos (Nematzadeh, 2019).

Polietileno de Alta Densidad (PEAD): Se produce por proceso de polimerización a bajas presiones. Actualmente se define solamente por su rango de densidad que va desde 0,941 g/cm³ hasta 0,965 g/cm³. Es una poliolefina de cadenas lineales; utilizado para fabricar botellas de leche, jugo, agua y productos de limpieza. Las botellas de PEAD no pigmentadas son translúcidas, muy buenas barreras al vapor de agua y duras. Las pigmentadas son de mayor resistencia química que las no pigmentadas, propiedad necesaria para el envasado de artículos de limpieza. Los productos de PEAD fabricados por inyección son resistentes a quebraduras y deformación, (Sánchez, 2015). En este trabajo se utilizó el PEAD reciclado proveniente de la planta recicladora de PETIT Salta. En la Figura 4.11 se muestra el tamaño de ambos polietilenos.

Polietileno de Baja Densidad (PEBD): Se produce por el proceso de polimerización a alta presión. Según este proceso se fabrica la mayor parte del polietileno. Actualmente se define solamente por su rango de densidad que va desde 0,910 g/cm³ hasta 0,925 g/cm³. Es un plástico que se utiliza principalmente para la fabricación de películas (films) debido a su tenacidad, flexibilidad y relativa transparencia. El PEBD alcanza un punto de fusión elevado, lo cual le otorga preferencia en la opción para aplicaciones donde se necesita sellado térmico. Se usa comúnmente para fabricar películas flexibles para bolsas de venta por menor u otras. EL PEBD también se utiliza en diferentes películas coextrudadas o laminadas que se utilizan para el envasado de diferentes productos alimenticios, cosméticos, etc.). El PEBD utilizado en esta tesis proviene de la planta recicladora ECO NORTE S.R.L. (Figura 4.9).

En el vertedero San Javier de la Ciudad de Salta, tres Cooperativas de Reciclado e Inclusión trabajan para la recogida y clasificación de materiales reciclables, como así también para el procesamiento y el envío a las plantas recicladoras. La mayor parte del material recogido procede del trabajo informal de los cartoneros o la recogida selectiva de los programas municipales como el programa “Separemos Juntos”.



Fig. 4.9: A la izquierda el PEBD y ala derecha de color verde el PEAD.

Las cooperativas del Vertedero reciclan los materiales y vende el material a recicladores privados como ECONORTE SRL y PETIT Salta, quienes realizan el siguiente proceso:

- Selección manual.
- Trituración bajo chorro de agua.
- Extrusión.
- Granulado (rigidez, fluidez, color).

El sistema se inicia con una selección manual de los plásticos; luego se alimenta con esta materia prima la trituradora, se realiza la trituración y desmenuzamiento mediante calor y chorro de agua; luego el material se transporta hasta un recipiente donde se distribuye y enfría. Una vez enfriado el material es introducido en la extrusora que ablanda el material convirtiéndolo en rolos de plástico. El material sale caliente y es transportado en un medio refrigerante, luego se lo introduce en un molino donde se tritura hasta la forma final de pellets, para ser envasado y suministrado como materia prima. En la Figura 4.10 se muestra otro tipo de LDPE reciclado utilizado por esta tesis.



Fig. 4.10: Otro tipo de Polietileno de Baja Densidad reciclado.

4.7 Desechos EPS

El poliestireno expandido (EPS) es un tipo de espuma rígida de muy baja densidad, que consta de pequeñas partículas esféricas (perlas) que están hechas de una matriz de polímero termoplástico que contiene vacíos discretos de aire (Cook, 1983). Es un polímero y la base del poliestireno es el estireno, un líquido cuyas moléculas se polimerizan, dando origen a las macromoléculas de poliestireno. El estireno se mezcla íntimamente con agua y un agente de expansión: el hidrocarburo pentano C_5H_{12}. De esta forma obtenemos el poliestireno expansible que luego podrá ser expandido conformando las distintas formas comerciales. También se puede obtener otro tipo de poliestireno expansible denominado "difícilmente inflamable" o "auto extinguible". Es de origen artificial, ya que, al no encontrarse poliestireno expansible en la naturaleza, debemos recurrir a procesos de sintetización a fin de producirlo.

El poliestireno expansible, se pre-expande en grandes recipientes (90 °C a 105 °C) aumentando su volumen hasta 50 veces gracias a la acción del agente de expansión, dando lugar así a la famosa "perlita" de poliestireno. Luego se dejan un tiempo en reposos a fin de que el aire penetre en las partículas y las seque, estabilizando su volumen. Estas son las perlitas de EPS que usamos como agregado liviano en nuestro hormigón que se complementan con aditivos complementarios.

En los últimos años, hubo un crecimiento en el interés por la aplicación desechos de poliestireno expandido para la industria de la construcción. Durante este período, se lo utilizó en diversas aplicaciones estructurales y no estructurales para la construcción. En [Dima, 2009] se presenta una revisión exhaustiva sobre la aplicación de EPS en la construcción. Entre muchas aplicaciones, las perlas de poliestireno expandido se pueden incrustar fácilmente en hormigón o mortero para producir materiales de construcción ligeros a base de cemento, con una amplia gama de densidades (Cook, 1983).

El hormigón de poliestireno expandido se puede considerar como un hormigón simple convencional, en el que un determinado porcentaje de árido se sustituye por perlas de EPS ultraligeras o simplemente una mezcla de cemento, arena y árido de EPS. Dependiendo del porcentaje de reemplazo de hormigón de peso normal, el hormigón obtenido puede clasificarse como hormigón liviano o no liviano.

Las propiedades mecánicas del concreto EPS pueden diferir de los del concreto convencional debido a la densidad muy baja de entre los 10 a 30 kg/m^3 y la resistencia muy baja del agregado de poliestireno que puede ser en forma de perlas o reciclado (Cook, 1983). Desde la perspectiva de la tecnología del hormigón, las perlas de EPS también presentan ventajas e inconvenientes (ACI Committee, 2003). La forma redondeada casi esférica mejora los parámetros reológicos de la mezcla, pero, por otro lado, los gránulos tienen una fuerte tendencia a la segregación en la mezcla debido a su muy baja densidad y la superficie es de naturaleza hidrofóbica provocando una falta en la adhesión con la mezcla. Para estos inconvenientes existen remedios como el tratamiento químico de su superficie con aditivos adhesivos que potencian las propiedades hidrofílicas de la superficie provocando un mejor cubrimiento con la pasta de cemento y potenciando la adherencia a la misma (Fernando, 2017).

4.7.1 Reciclado de EPS

En el futuro, el hormigón y los morteros con poliestireno expandido reciclados podrían ser muy populares en el área de la construcción, ya que hoy en día las perlas de EPS están ampliamente disponibles en los mercados de materiales de construcción, a diferencia del agregado liviano clásico como la

puzolana, piedra pómez y escorias volcánicas o artificiales como escorias espumadas y clínker de horno, que son subproductos. Las arcillas expandidas, esquistos, pizarras, etc., son productos terminados de la industria de los áridos.

En los próximos años aumentaran las demandas de sostenibilidad de los materiales de construcción como el hormigón convencional, por lo que la incorporación de un mayor volumen de áridos alternativos disponibles en el mercado podría ser la solución. Es bien sabido que el agregado de EPS también se puede obtener a través del reciclaje, por lo que se considera un material de construcción ecológico (Rosca, 2021).

Hay investigaciones sobre el hormigón ligero (LWC, del inglés Light Weight Concrete) que contiene poliestireno de baja y media resistencia y su aplicación a varios tipos de elementos de construcción como paneles de revestimiento, muros cortina, elementos de hormigón de mampostería, etc. Hasta el momento, una amplia gama de ensayos se publicaron datos de las características físicas y mecánicas de LWC con perlas de EPS. En (Xu, 2012) se presenta una revisión exhaustiva de las propiedades mecánicas del LWC con perlas de EPS.

Para aplicaciones estructurales en los edificios, el uso de concreto con agregado de EPS conduce a la reducción del peso propio de los miembros estructurales como las losas, vigas, columnas y muros. Por lo tanto, el uso de este tipo de hormigón abre espacio para algunas alternativas estructurales (Fernando, 2017). Por ejemplo, para un edificio existente, podría ser posible mejorarlo con un nuevo piso y para un edificio nuevo de baja altura, la masa sísmica total de la estructura es menor en comparación con una estructura hecha de concreto de peso normal.

En la Figura 4.11 se muestra el EPS reciclado utilizado en esta tesis para mezclas de hormigón ligero. Este producto fue reciclado de los cortes de placas de poliestireno expandido para cielorraso.



Fig. 4.11: Poliestireno Expandido reciclado.

Según el ICPA-Instituto del Cemento Portland Argentino (2018) acerca de los hormigones livianos, el aumento del volumen interno de huecos puede conseguirse mediante tres procedimientos:

- Eliminando en un hormigón convencional las fracciones más finas del agregado, en general toda la fracción granulométrica 0-5 mm, con lo que quedaría un hormigón de tipo poroso con gran cantidad de huecos. A este hormigón se le denomina: hormigón sin finos. Los "hormigones sin finos" son mezclas constituidas por agregados gruesos o medianos y una pasta de cemento portland. Se diferencian esencialmente de los hormigones convencionales, en la granulometría de los agregados utilizados y en una reducción del porcentaje de cemento, lo cual es posible por el hecho de que el aglomerante tiene como única función envolver los granos de agregado grueso y vincularlos entre sí, obteniéndose de esta manera una disminución de su densidad.
- Incorporando altos porcentajes de aire al hormigón, formando burbujas de gran tamaño, con diferente proporción y diámetro de los del aire ocluido que se incorpora para mejorar determinadas propiedades de los hormigones de densidad normal. Recibe el nombre de hormigón aireado,

hormigón celular, hormigón espuma, etc. El hormigón celular es un material que se logra por medio de la mezcla dosificada de arena, cemento, a la que se le agrega agua y un agente expansor en base a aluminio, el que reacciona creando millones de microesferas de aire distribuidas en la mezcla, lo que determina su estructura alveolar. Las finísimas retículas de cemento fraguado que contienen aire encerrado en burbujas tienen un volumen lo suficientemente pequeño como para que no se produzca transmisión de calor por convección. Así, la transmisión de calor a través de ellas ha de producirse por conducción y, teniendo en cuenta que el aire es un poderoso aislante térmico, hace que el calor para atravesar el hormigón celular, tenga que recorrer un camino muy largo y complejo a través de la matriz sólida.

- Utilizando agregados con densidades sensiblemente inferiores a las densidades de los agregados gruesos utilizados en las mezclas convencionales, denominándose a éstos como hormigones con agregados livianos. La estructura que presentan estos hormigones es, aparentemente, semejante a la de los hormigones convencionales, pero contiene en su interior una gran cantidad de alveolos que ocupan un volumen considerable que se debe a una distribución heterogénea de vacíos repartidos dentro de las partículas de los agregados; a diferencia de los hormigones celulares anteriormente descriptos en que los alveolos están distribuidos uniformemente en la masa del hormigón.

Los hormigones con agregados livianos son los únicos dentro de los tres tipos de hormigones livianos, descriptos por el ICPA, aptos para hormigones estructurales (Sánchez, 2015).

4.8 Finos de perlita

La perlita es un vidrio volcánico amorfo que tiene un contenido de agua relativamente alto. Es un mineral que aparece en la naturaleza y tiene la propiedad poco común de expandirse muchísimo cuando se la calienta lo

suficiente. Hoy este mineral tiene un valor importantísimo en el país: si bien en San Juan su consumo es alto, no se produce, pero en Salta están asentada 9 de las 10 compañías que la producen (la otra está en Mendoza), según un informe que publicó recientemente Mining Press. La exportación salteña de la perlita le implicó a esa provincia una divisa superior al 1,05 millón de pesos. Por esta capacidad de multiplicar su tamaño varias veces, la perlita pierde densidad y permite ser utilizada como filtrante para vinos, jugos y aceites comestibles, también como aislante térmico para obras de ingeniería y como sustrato en la agricultura (Burgos, 2015).

La perlita cruda, tal cual se extrae del suelo, es sometida a altas temperaturas de entre 850 y 900° C durante su industrialización, esto provoca que el agua atrapada en su interior se convierta en vapor y escape. Por esta razón física es que el material se expande de siete a dieciséis veces con respecto a su volumen original. Según el ingeniero Roberto Vázquez Rivera, director ejecutivo de Perfiltra SA, en América sólo producen perlita Estados Unidos, México y Argentina. En Chile, los altos contenidos de hierro asociados a la perlita no permiten su explotación. Otras fuentes señalan que también se produce en Grecia, Japón, Turquía, Hungría, Italia y Alemania.

En agricultura, la perlita tiene un rol fundamental en la práctica conocida como “hidroponía”. Según esta práctica, en vez del suelo tradicional se cultiva la planta en un medio de soluciones minerales. Las raíces pueden crecer en un medio dominado por la perlita, que tiene la capacidad de contener agua, aire y otros elementos vitales para el vegetal.

En la construcción, la perlita tiene propiedades como aislante térmico y acústico, debido a que su estructura está conformada por celdas de aire. Se la mezcla con cemento, cal o yeso y permite una terminación fina en revoques. Por su bajo peso, los empresarios del sector publicitan una reducción de costos de hasta el 30 por ciento en la construcción al emplear perlita en vez de otros materiales (Burgos, 2015).

Las mezclas obtenidas con perlita expandida constituyen un material excepcionalmente fácil de transportar, mezclar y de aplicar en obra. Sus usos y

posibilidades de aplicación son tan amplios como versátiles, permitiendo la realización de contrapisos tradicionales livianos, cargas de techos y azoteas, rellenos en bajo losas, revoques aislantes y/o cortafuegos, piezas premoldeadas de cualquier tamaño, etc. La perlita es un mineral versátil y sostenible que se extrae y se procesa con un impacto insignificante sobre el medio ambiente. Y la comunidad ambientalista reconoce a la perlita para la ejecución de productos mejorados, con peso ligero aislante cubiertas, como agregado a losas de hormigón lo cual da soluciones de alto rendimiento, como un material natural utilizado en la agricultura, etc.

A la perlita se la puede definir en síntesis como una microestructura formada por capas o láminas alternas de las dos fases (α y cementita) durante el enfriamiento lento de un acero a temperatura eutectoide. Se le da este nombre porque tiene la apariencia de una perla al observarse microscópicamente a pocos aumentos.

4.8.1 Perlita de San Antonio de Los Cobres

La perlita se obtiene de a partir de un origen volcánico, la misma en este informe se obtiene de canteras, donde trabaja actualmente la minera IMERYS, y la cual extrae en forma diaria aproximadamente 100 Tn por día. De dicha extracción de las canteras de pava, guanaco, gacela el 20 por ciento es residuo y es lo que nosotros usaremos para la elaboración de hormigón estructural.

Como se dijo, Geológicamente el "Mineral de Perlita" es una roca de origen volcánico, con la propiedad saliente de tener del 2 al 7 % de agua en estado de adsorción. Cuando es procesado y sometido a un shock térmico de 900 ±1000 °C, que produce la "Perlita Expandida", que se utiliza como árido liviano, disminuyendo su densidad 30 veces. En el presente trabajo se utilizaron finos de perlitas desechados por la industria minera y como puede verse en la Figura 4.12, en estado pulverulento y con finura similar al cemento. Los datos de estos finos, fueron suministrados por una empresa minera dedicada a la industrialización de la perlita. Los datos de sus propiedades físicas y composición química, se indican en las tablas siguientes. Con estos finos se elaborarán dosificaciones para hormigón estructural que remplazarían a los tradicionales hormigones en las viviendas.

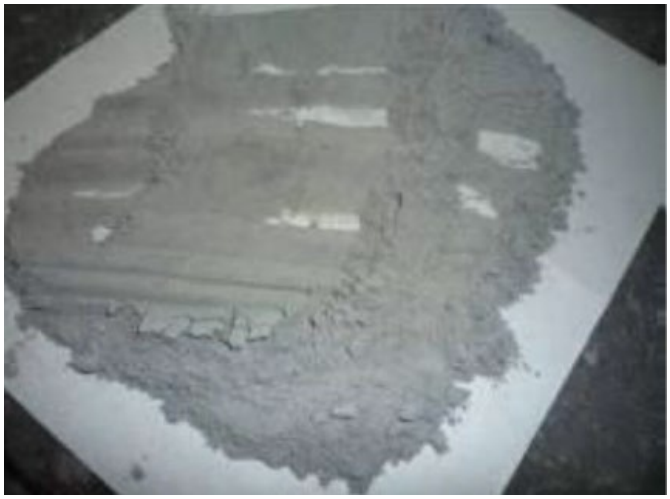


Fig. 4.12: Finos de perlita provenientes de San Antonio de los cobres.

4.8.2 Propiedades físicas de la Perlita

La perlita aparece en granos denominados "colonias"; dentro de cada colonia las capas están orientadas esencialmente en la misma dirección y esta dirección varía de una colonia a otra. Las capas delgadas claras son deferrita, y la cementita aparece como capas delgadas más oscuras. La mayoría de las capas de cementita son tan delgadas que los límites de fases adyacentes no se distinguen.

Enfriando la austenita con una concentración intermedia de carbono, se transforma en fase ferrita, con un contenido de carbono inferior, y en cementita, con un porcentaje muy superior de carbono. Los átomos de carbono necesitan difundir para segregar selectivamente. Los átomos de carbono difunden de la región ferrítica a las capas de cementita para conseguir la concentración del 0,77% en peso de C y la perlita se propaga, a partir de los límites de grano al interior de los granos austeníticos. La perlita forma láminas porque los átomos de carbono necesitan difundir la distancia mínima dentro de su estructura.

Hay dos tipos de perlita:

- Perlita fina: dura y resistente.
- Perlita gruesa: menos dura y más dúctil.

La razón de este comportamiento radica en los fenómenos que ocurren en los límites de fases (α y cementita). En primer lugar, hay un alto grado de adherencia entre las dos fases en el límite. Por lo tanto, la resistencia y la rigidez de la fase cementita restringe la deformación de la fase (ferrita), más blanda, en

las regiones adyacentes al límite; es decir, la cementita refuerza a la ferrita. Este grado de reforzamiento es más elevado en la perlita fina porque es mayor la superficie de límites de fases por unidad de volumen del material. Además, los límites de fases sirven de barrera para el movimiento de dislocaciones, del mismo modo que los límites de grano. En la perlita fina y durante la deformación plástica las dislocaciones deben cruzar más límites de fases que en la perlita gruesa. De este modo el mayor reforzamiento y restricción del movimiento de las dislocaciones en la perlita fina se traducen en mayor dureza y resistencia mecánica (Burgos, 2015). La perlita gruesa es más dúctil que la perlita fina a consecuencia de la mayor restricción de la perlita fina a la deformación plástica.

Las propiedades físicas de los finos de perlitas de San Antonio de Los Cobres se muestran en la Tabla 4.5, se realizó estudios de densidad aparente, humedad libre, PH, perdida por ignición, color y forma.

Tabla 4.5: Propiedades físicas de los finos de perlita.

Densidad aparente suelta de mineral crudo	1100–1250 g/dm^3
Color y forma	Gris granulado
Humedad libre	< 1 %
Ph	6-8 Neutro
Pérdida por ignición	3-5 %

4.8.3 Composición Química de la perlita

La perlita es un mineral de origen volcánico compuesto principalmente por óxido de silicio y de aluminio. La composición química de la perlita utilizada en la presente tesis se muestra en la Tabla 4.6.

Tabla 4.6: Propiedades Químicas de los finos de Perlita

Si	30-36
Al	6-8
Fe	0-1
Ca	0-1
Mg	0-1
Na	2,5-5
K	2-4
Sulfato	exenta
O_2 (por diferencia)	44,5 -47,5
H_2O ligada	3-5

Otros datos de interés de la perlita de San Antonio de Los Cobres son:

- Porcentaje de humedad en cantera 8%
- Porcentaje de humedad en planta 5%
- Densidad de cantera Pava: 1,05 g/dm^3
- Densidad de cantera Gacela: 2,1 g/dm^3
- Densidad de cantera guanaco: 1,7 g/dm^3

4.8.4 Obtención de la perlita, extracción de perlita cruda y transformación a expandida

El primer proceso en la fabricación de perlita, consiste en la extracción de la materia prima en la mina, donde se somete a un proceso de limpieza, eliminación selectiva de las impurezas, pasando posteriormente las piedras a molerse en sucesivos molinos.

Luego pasa a una zona de desecado a alta temperatura (300-400 ºC) para eliminar la humedad del mismo, y proceder a su clasificación en bandas granulométricas distintas. Todo este proceso se realiza normalmente en minas y canteras.

La siguiente fase de la materia prima, es el tratamiento térmico en el horno de expansión. Se trata de un horno vertical, alimentado de forma continua con depósitos de propano. Al ponerse en contacto el mineral con una llama a

alta temperatura, superior a los mil grados centígrados, se provoca un cambio en su estado físico-químico, ya que se evapora bruscamente el agua, estallando la partícula y aumentando de 10 a 20 veces su volumen original. Este cambio lo hemos comprobado todos en alguna ocasión, en el proceso que sigue un alimento que empleamos mucho en los cines; nos referimos a las palomitas de maíz.

La homogeneidad en la distribución de las partículas, es el factor más difícil de conseguir. Podemos ir adelantando la gran cantidad de aire que acumula un sustrato de perlita. El aire se comporta como un excelente aislante de la temperatura, y esto se ve demostrado en distintas ropas que utilizamos, e incluso en nuestras propias casas. Las partículas de perlita de menor tamaño, no se emplean en la agricultura, se utilizan como aislantes de temperatura en la construcción de edificios.

Las aplicaciones de perlita como materia prima pueden dividirse en nueve ítems que se añaden a su uso más común en la producción de agregados súper-livianos:

- Industria de cerámicas y vidrio
- Producción de explosivos
- Manufactura de filtros
- Manufactura de electrodos
- Producción de cementos y concretos
- Industria de zeolita
- Industrias mineras
- Manufactura de fibras minerales
- Operaciones metalúrgicas

Algunas de estas aplicaciones tienen ya su uso comercial mientras que otras son todavía materia de investigación para su eventual aplicación en un mediano plazo. La directa aplicación de la perlita y vermiculita como materia prima en nuevas aplicaciones aparte de su tradicional uso en aplicaciones en la construcción y agricultura, deberían liderar su el aumento en la producción de perlita y vermiculita en un futuro (Burgos, 2015).

4.9 Metodología

El gran desafío consistió en lograr un diseño de mezcla que, con la incorporación de reciclados de plásticos, neumáticos usados y EPS, como reemplazo del agregado convencional en gran porcentaje, la mezcla conserve sus características reológicas en estado fresco. A todos los agregados mencionados anteriormente los llamaremos Agregados Reciclados Livianos No Convencionales (ARLINC).

En estado endurecido el objetivo fue lograr dosificaciones de densidades menores a 2000 kg/m³ y una resistencia mínima a la compresión a la edad de 28 días de 2 MPa para la mampostería y 17 MPa para las estructuras (CIRSOC 202, 1984).

Se realizaron varias familias de dosificaciones en función de los reciclados disponibles, para poder estudiar el efecto que tienen dentro de la mezcla cementicia. Variando en la relación agua/cemento, porcentaje de áridos gruesos y finos; EPS y de neumáticos triturados. Se orientó más específicamente en la trabajabilidad de la mezcla y la resistencia a compresión a la edad de 28 días y prestando particular atención a la disminución de la conductividad térmica. Para la dosificación se consideraron las siguientes variables:

- Tipo de Cemento: Se utilizó un cemento Portland compuesto con 2 (dos) o más adiciones minerales (CPC30). Este tipo de cemento es de venta común en todas partes.
- Tipo de plásticos: Se han utilizado Polietileno de Baja Densidad y Polietileno de Alta Densidad, ambos pellets de 5 mm. Estos son reciclados por cooperativas y luego procesados por dos empresas salteñas.
- Tipo de elastómero: se utilizaron desechos de neumáticos triturados de no más de 5 mm de largo.
- Finalmente, el ultimo agregado son los desechos de EPS cuyo tamaño varía entre 2 y 8 mm.
- Consistencia: Se fijó para la consistencia de los ladrillos un valor de asentamiento de 2±1 cm. Mientras que para el hormigón estructural con desechos plásticos el valor fue de 3±1.

- Edad: en las mezclas finales, las edades de ensayos se establecen en 7, y 28 días a los efectos de determinar a edad temprana la resistencia para desmoldar, manipular y trasladar, en el caso de elementos premoldeados, y determinar la evolución de las características y propiedades en función del tiempo.
- Proporción agregado fino y grueso para hormigón estructural: la relación entre el agregado fino y grueso fue de un 38 % y 62 % respectivamente en las primeras mezclas realizadas; variando luego en 57 % agregados gruesos y 43 % agregados finos, 52 % para AG y 48 % AF, finalmente la proporción utilizada fue 40,5 % fino y 59,5 % grueso.
- Proporción agregado fino y cemento para los ladrillos: ladrillo de Caucho con EPS tiene un 30% de AF y 70% de cemento, mientras ladrillo hormigón celular tiene 66,6 % de AF y 34,4 % de cemento.

Como variables intervinientes se consideran:

- Contenido de cemento por metro cúbico.
- Contenido de agua por metro cúbico.
- Temperatura Ambiente.
- Humedad Ambiente.

En Estado Fresco:

- Consistencia utilizando el tronco de cono: aplicamos la Norma IRAM 1536. Este método es aplicable a hormigones plásticos con un tamaño máximo de agregado grueso de hasta 37,5 mm. El molde de forma tronco-cónica, mide 20 cm de diámetro inferior, 10 cm de diámetro superior y 30 cm de altura. Se llena en tres capas de igual volumen y se compacta cada una de ellas golpeándola con una varilla 25 veces. Luego se levanta en forma vertical cuidadosamente el molde y se mide en centímetros la diferencia entre la altura inicial y final. Se informa ese valor denominándose asentamiento con una aproximación de ±0,5 cm.

- Exudación: La uniformidad de la mezcla puede verse modificada por el fenómeno de exudación. La exudación es la ascensión del agua de amasado y salida de la masa de la mezcla, caracterizada por su capacidad y velocidad, las cuales pueden ser afectadas por el uso de plásticos en el hormigón. Por ello este ensayo se le aplico a la serie estructural. Aplicando Norma IRAM 1604, el método de ensayo consiste en recolectar agua acumulada en la superficie de una muestra de hormigón a intervalos de tiempo establecidos, lo que permite calcular:
  - El volumen de agua exudada por unidad de superficie, V [cm^3/cm^2]. Donde obtendremos la velocidad de exudación.
  - La capacidad de exudación en [g/cm^2]

En Estado Endurecido:

- *Resistencia a compresión*: La resistencia a la compresión axial es la característica mecánica principal del hormigón o mezcla, dada la importancia que reviste esta propiedad, dentro de una estructura convencional de hormigón armado y los ladrillos, es importante conocer cómo se comporta con la incorporación de los agregados livianos no convencionales en la mezcla. Es el máximo esfuerzo que puede ser soportado por dicho material sin romperse. Dado que el hormigón o concreto o la mezcla que utilizaremos en los ladrillos está destinado principalmente a tomar esfuerzos de compresión, es la medida de su resistencia a dichos esfuerzos la que se utiliza como índice de su calidad. Se determinó la resistencia a compresión axial según norma IRAM 1546, 2013. Las probetas permanecieron en cámara de curado hasta ser ensayadas (7 días y 28 días). Se ensayaron con prensa hidráulica y antes del ensayo las probetas fueron llevadas a horno para realizarles un agregado compuesto por azufre y arena fina (encabezado), el cual consiste en ponerle una tapa y

base muy fina de espesor, pero de igual diámetro que la probeta. Con la Ecuación (4.1) calculamos la carga de rotura:

$$G = Div * 219\ \frac{\overrightarrow{Kg}}{Div} \tag{4.1}$$

Finalmente, con Ecuación (4.2) obtenemos la resistencia a la compresión:

$$R_C = \frac{4*G}{\pi*d^2} \tag{4.2}$$

Donde:

$R_C = Resistencia\ a\ la\ compresión\ \left[\frac{\overrightarrow{Kg}}{cm^2}\right]$

Div= *División obtenida del ensayo*

$G = Carga\ de\ rotura\ \left[\frac{\overrightarrow{Kg}}{Div}\right]$

$d = Diametro\ [cm]$

- *Resistencia a la tracción por compresión diametral*: esta resistencia es importante con respecto al agrietamiento, debido a la limitación de las contracciones. La formación y propagación de las grietas, dependen principalmente de la resistencia a la tracción. La resistencia a tracción por compresión diametral se realizó según norma IRAM 1658,1995. El ensayo se efectuó a los 28 días de moldeadas las probetas. La resistencia a la tracción por comprensión diametral de la probeta se calcula con la Ecuación (4.3).

$$T = \frac{2*G}{\pi*L*d} \tag{4.3}$$

Donde:

$T = Resistencia\ a\ la\ tracción\ por\ comprensión\ diametral\ \left[\frac{\overrightarrow{Kg}}{cm^2}\right]$

$G = Carga\ de\ rotura\ \left[\frac{\overrightarrow{Kg}}{Div}\right]$

$d = Diametro\ [cm]$

$L = Longitud\ [cm]$

- *Módulo de elasticidad*: Para calcular la rigidez y deformaciones de los elementos estructurales es necesario conocer el módulo de elasticidad. Él módulo de elasticidad del hormigón representa la rigidez de este material ante una carga impuesta sobre el mismo. La norma que aplicaremos para determinar el Módulo de elasticidad estático de las mezclas es la ASTM C469 (2014). En general, es la capacidad del hormigón de deformarse bajo carga, sin tener deformación permanente. El concreto es un material elástico blando, ya que no tiene un comportamiento lineal en ningún tramo de su diagrama carga versus deformación en compresión, sin embargo, convencionalmente se acostumbra a definir un "Módulo de elasticidad Estático (MEE)" del concreto mediante una recta tangente a la parte inicial del diagrama, o una recta secante que une el origen del diagrama con un punto establecido que normalmente es un porcentaje de la tensión última.
- *Resistencia a la flexión*. Tenemos que saber cuál es la resistencia mínima a la flexión para las baldosas y para ello aplicamos las norma IRAM 1522 e IRAM 1622. Se coloca la probeta en un dispositivo de flexión, con una cara lateral sobre los rodillos soporte y con su eje longitudinal normal a los soportes. Se aplica la carga verticalmente por los rodillos de carga sobre la cara lateral opuesta de la probeta y se la incrementa uniformemente, a una velocidad de 50 N/s ± 10N/s hasta rotura. Los ensayos se aplicaron a los 7 días y 28 días de curado de las probetas. Aplicamos la Ecuación (4.4) para obtener la resistencia a la flexión de las probetas destinadas para las baldosas:

$$R_f = 3\,\frac{P}{d^2} \qquad (4.4)$$

Donde:

R_f= resistencia a la flexión $[\frac{\text{daN}}{\text{cm}^2}]$
P= carga de rotura [daN]
d= lado de la sección cuadrada del prisma [cm]

- *Resistencia al choque.* Las baldosas ensayadas no deberán romperse por caída desde alturas menores de 70 cm. Se aplica norma IRAM 1522. Se coloca la probeta sobre un lecho de arena seca de unos 10 cm de espesor, la misma está dentro de un cajón de 60 cm x 60 cm x 15 cm de altura. Colocamos la probeta con la cara vista hacia arriba y dispuesta de manera que la pesa (fundición esférica de hierro de unos 250 g por 40mm de diámetro) caiga en su centro. Se suspende la pesa a 30 cm de la cara vista de la baldosa y se la deja caer. Esta operación a alturas sucesivas, que se incrementan en 5 cm hasta producir la rotura de la probeta o en su defecto hasta llegar a los 100 cm.

Los ensayos de indicadores de durabilidad del hormigón, actualmente han adquirido tanta importancia como los de resistencia. Estos ensayos permiten estimar el comportamiento futuro de la mezcla puesto en obra ante agentes físicos y químicos que puedan afectar su vida útil. En este caso se evaluó la durabilidad del hormigón estructural y los ladrillos, mediante el ensayo de succión capilar, absorción y permeabilidad al aire:

- Absorción: la absorción de agua por inmersión es un ensayo que ofrece información sobre la calidad de las baldosas. Se puede considerar como una medida indirecta de la resistencia de la mezcla a la penetración de agentes agresivos. Se aplica Norma IRAM 1522. Las probetas tienen que tener todos los bordes rotos pero libres de fisuras o laminaciones. Las probetas se secan en una estufa a una temperatura comprendida entre 105 °C y 110 °C, luego de enfriarlas a temperatura ambiente se pesan hasta obtener un valor constante al 0.1 %, verificado mediante dos pesadas sucesivas, con un intervalo de 24 h. a este valor se lo designa como m_1. Las probetas secas se sumergen en un baño de

agua a temperatura ambiente, disponiéndolas de modo que el líquido pueda circular libremente entre ellas. Se caliente el agua del baño en forma gradual hasta alcanzar el punto de ebullición, manteniendo esas condiciones por 3 h y cuidando de reponer el agua evaporada de modo que las probetas queden permanentemente sumergidas. Transcurrido el lapso indicado se coloca el baño bajo una corriente de agua hasta que tome la temperatura ambiente. Se retiran las probetas de baño, se enjuagan con un trapo y luego se pesan dentro de los 5 minutos. El valor obtenido se designa con m_2. La cantidad de agua absorbida se calcula mediante la ecuación (4.5):

$$A = \frac{m_2 - m_1}{m_1} * 100 \quad (4.5)$$

Donde:

A= contenido de agua absorbida [%]
m_1= masa de la probeta seca [g]
m_2= masa de la probeta saturada [g]

Y como aporte al ahorro energético de estos hormigones, ladrillos y baldosas, se midieron para las diferentes mezclas con agregados livianos no convencionales, la conductividad térmica. Entendiendo como:

- *Conductividad térmica*: el coeficiente de conductividad térmica es una característica de cada material y expresa la magnitud de su capacidad de conducir el calor. Esta propiedad está muy relacionada con la densidad de los materiales y resulta de suma importancia en el caso de hormigones livianos y los ladrillos. Para calcular la conductividad térmica utilizamos el aparato HD20 descripto en el capítulo anterior de esta tesis.
- *Resistencia térmica:* Calcularemos la resistencia térmica de los ladrillos desarrollados en esta Tesis. Se aplicará la norma IRAM 11.601 "Aislamiento térmico de edificios, Métodos de cálculo-Propiedades térmicas de los componentes y elementos de construcción en régimen estacionario".

- *Calor especifico:* En base a los ensayos anteriores, se obtendrá el Calor Especifico del material mediante la técnica de Calorimetría. Una vez que los ensayos anteriores den el resultado buscado de la dosificación óptima para la construcción del ladrillo óptima, se procederá al cálculo del Cp del mismo.

4.10 Materiales y Dosificaciones

4.10.1. Materiales reciclados en empresas

Los desechos plástico reciclados de Polietileno de Alta Densidad fueron provistos por la empresa Petit Salta, mientras que los desechos plásticos de Polietileno de Baja Densidad por la empresa EcoNorte SRL. Los desechos de EPS se obtuvieron de la empresa SALTAPORT y los desechos de neumáticos triturados por una gomería de la provincia de Córdoba.

4.10.2 Caracterización de los materiales componentes

El proceso de selección de los materiales es una de las fases donde más sencillo resulta incidir, económica y técnicamente, en la reducción del impacto medioambiental (Sánchez, 2015). Por eso fue necesario analizar con criterio de sustentabilidad los materiales a utilizar (Short & Kinninburg, 1967).

4.10.3 Cemento Pórtland

Se trabajó con el cemento portland compuesto (CPC30) denominado según la norma IRAM 50000 (2010) como cemento, cuya elección se debe a la disponibilidad y fácil acceso en el mercado local. En el inciso 4.2.3 se detallan las propiedades físicas y mecánicas de este cemento.

4.10.4 Adiciones minerales

Se utilizó, en las mezclas para hormigón estructural, adiciones minerales activas en reemplazo de parte del cemento. En la primera etapa de ensayos se usó finos de Perlita, mineral proveniente de una roca volcánica vítrea, rica en sílice, originaria de un yacimiento al oeste de la ciudad de Salta, Argentina. Su densidad es 1150 g/dm^3.

4.10.5 Aditivos

En algunas series de hormigones, más precisamente para uso estructural se utilizó un superligante cuya característica de elección se basó en el tipo de consistencia de la mezcla que se realizó. El superligante es una emulsión sintética de color blanco, a base de polímeros acrílicos deseada para brindar una óptima adherencia e incrementar las propiedades mecánicas en mezclas de cemento, no es corrosivo. Su densidad es 1,02 Kg/dm^3, el intervalo de dosis recomendada es 0.1 % a 5 % por los Kg totales de cemento utilizado por m3 de hormigón, en este trabajo se utilizó una dosis del 0,63 % de superligante.

4.10.6 Agua

Las mezclas se realizaron utilizando agua potable de red (Norma IRAM 1601:2012). El reglamento CIRSOC 201 (2005), normaliza que el agua empleada para lavar los agregados, mezclar y curar el hormigón, cumple con los requisitos establecidos en dicha norma.

4.10.7 Agregado grueso

En cuanto al agregado grueso se utilizó un triturado pétreo de uso normal en la zona, más precisamente del rio Rosario de nuestra provincia de Salta, cuyas características físicas se presentan en la Tabla 4.7.

Tabla 4.7: Propiedades físicas del agregado grueso.

Propiedades	Agregado grueso
Tamaño máximo [mm] (IRAM 1505)	19,1
Densidad relativa [g/cm^3] (IRAM 1533)	2,646
Absorción [%] (IRAM 1533)	0,7

En la Tabla 4.8 tenemos los resultados de los ensayos con los tamices para el agregado grueso.

Tabla 4.8: Resultados de los ensayos con los tamices para el agregado grueso.

Tamices	Aberturas (mm)	Peso del tamiz (gr)	Peso Ret (gr)	Peso Ret mdfdo(gr)	% Ret. Parcial	%Ret. Acum.	%Pasa Acum.
2´´	50.8	542	0	0	0	0	100
1½´´	38.1	548	0	0	0	0	100
1´´	25.4	545	0	0	0	0	100
¾´´	19.1	633	1467	1467	17,46	17,46	82,54
½´´	12.7	605	3635+44	3679	43,78	61,24	38,76
3/8´´	9.52	587	1161	1161	13,82	75,06	24,94
4	4.8	515	2096	2096	24,94	100	0
Fondo		325	44	0	0		
			Σ=8403	Σ=8403			

En las Figura 4.13 se presenta la curva granulométrica de los agregados gruesos, que cumplen con los límites establecidos por el reglamento CIRSOC 201 (2005) y la Norma IRAM 1627 (1997).

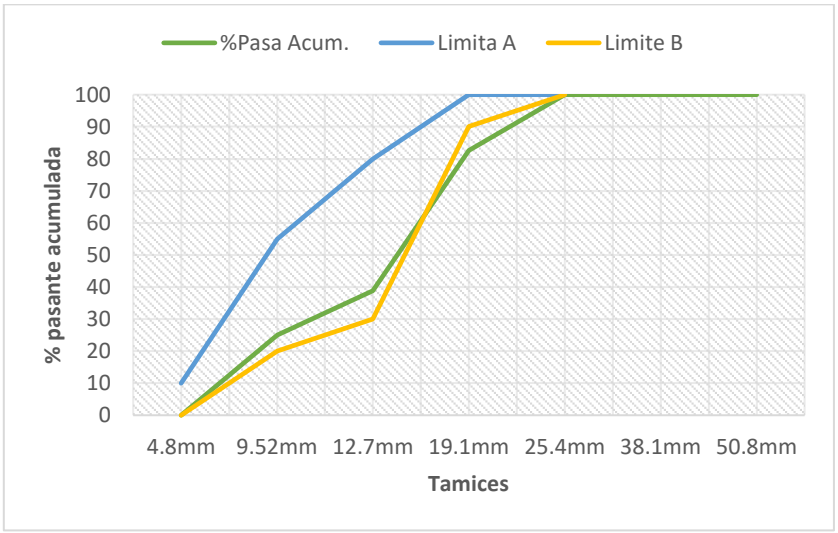


Fig. 4.13: Curva granulométrica del agregado grueso.

4.10.8 Agregado fino

En la Tabla 4.9 y Figura 4.14 se muestran los resultados de la granulometría del agregado fino, la curva es continua y cumple la norma 1627, 1997, tenemos que para el tamiz 2,4 mm del agregado fino es un poco bajo para el límite A. En la Tabla 4.10 se detallan los resultados del cálculo de la densidad, módulo de finura y porcentaje de absorción.

Tabla 4.9: Resultados de los ensayos con los tamices para el agregado fino.

Tamices	Aberturas (mm)	Peso Ret (gr)	Peso Ret modificado (gr)	% Ret. Parcial	%Ret. Acum.	%Pasa Acum.	LIMIT E A	LIMIT E B	LIMIT E C
4	4.8	38	38	2,5	2,5	97,5	95	100	100
8	2.4	348	348	22,91	25,41	74,59	80	100	100
16	1.2	128	128	8,43	33,84	66,16	50	85	100
30	0.6	165	165	10,86	44,7	55,3	25	60	95
50	0.3	119	119	7,83	52,53	47,47	10	30	50
100	0.15	475+30	505	33,25	85,78	14,22	2,5	10	10
200	0.075	216	216	14,22	100	0			
Fondo		30	0						
		Σ= 1519							

Tabla 4.10: Propiedades físicas del agregado fino.

Propiedades	Agregado fino
Módulo de Finura (IRAM 1505)	3,75
Densidad relativa [g/cm^3] (IRAM 1520)	2,645
Absorción [%] (IRAM 1520)	0,8

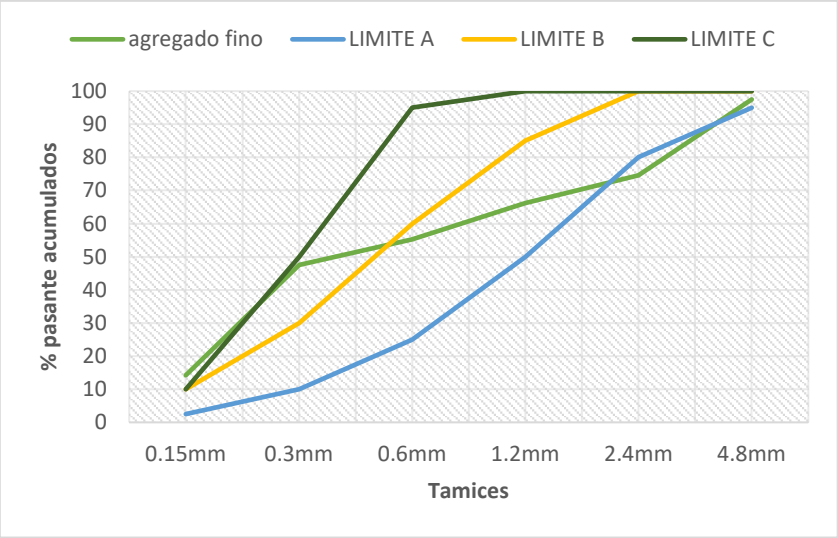


Fig. 4.14: Curva granulométrica del agregado fino.

En lo gráfico 4.14 se presenta las curvas granulométricas de los agregados finos, todas las curvas cumplen con los límites establecidos por el reglamento CIRSOC 201 (2005) y la Norma IRAM 1627, 1997. Las curvas granulométricas son continuas y están comprendidas entre las curvas límites. Tenemos que para el tamiz 2,4 mm del agregado fino es un poco bajo para el límite A.

Este agregado fino proveniente del rio Rosario es el que se utilizó para todo tipo de investigación de esta Tesis.

4.10.9 Absorción, granulometría y densidad de los ARLINC

Para determinar las características físicas de los agregados livianos no convencionales se realizaron los siguientes ensayos:

Absorción: Para determinar el agua retenida en los agregados reciclados livianos no convencionales utilizados, se adaptó la Norma IRAM 1533 (2009) y se procedió de la siguiente manera:

1. Se sumergen 100 gr del agregado en agua durante 24 horas.
2. A las 24 horas se retira el agregado y se seca con un trapo absorbente, inmediatamente se pesa la muestra para obtener el "P_{hum}".
3. Se coloca la muestra en estufa durante 24 hs.
4. Se pesa para obtener el P_{seco}.
5. A continuación, con los datos obtenidos se calcula el agua retenida según la Ecuación 4.6.

$$\frac{P_{hum}-P_{seco}}{P_{seco}} = \% \quad (4.6)$$

Granulometría de los ARLINC: Para conocer la granulometría de los agregados livianos no convencionales reciclados se procedió de igual manera que para los agregados de peso normal según norma IRAM 1505 (2005).

Densidad de los ARLINC: Para sacar la densidad de los agregados se colocó alcohol en un matraz aforado y se los sumergió. Se obtuvo la diferencia entre peso final en cm^3 (LF) menos peso inicial (LI) en cm^3 y se dividió la cantidad de agregado ensayado por la diferencia de volumen. Se aplica ecuación 4.7.

$$\frac{ARLINC\ (g)}{L_f - L_I(cm3)} = Densidad\ (g/cm3) \quad (4.7)$$

4.10.10 Agregado de plásticos reciclados

En primer ARLINC que analizaremos serán los agregados de plásticos reciclados. Las propiedades físicas se detallan en Tabla 4.11. En la Figura 4.15 se muestra la curva granulométrica de los plásticos reciclados. En esta Tesis se utilizó este agregado liviano como reemplazo del agregado grueso con el objetivo de reducir la densidad del hormigón. Los tamaños nominales de los agregados livianos utilizados fueron de máximo 5 mm y mínimo de 2 mm.

Tabla 4.11: Propiedades físicas de los agregados plásticos.

Propiedades	HDPE	LDPE
Tamaño máximo [mm]	5	5
Densidad relativa [g/cm^3]	0,92	0,89
Absorción [%]	11	10

4.10.11 Agregado de EPS reciclados

Tenemos que en 1 cm^3 de poliestireno expandido contiene de 3 a 6 millones de celdillas, cerradas y no conectadas, llenas de aire, que son resultado de su proceso de fabricación. Es entonces un material muy poroso, pero cuya característica principal reside en estas celdillas cerradas y no conectadas. Debido a su porosidad y al material polímero que rodea las celdillas, es compresible con los dedos. Es entonces un material blando y de buena elasticidad.

Debido al volumen que representan las celdillas de aire (alcanzan hasta un 97%), es un material de muy baja densidad y muy bajo peso específico. El peso específico es función de la duración del calentamiento en el proceso de pre-expansión. Tiene una densidad de 10 kg/m^3.

Las perlitas son de forma esférica, pero como el material proviene del reciclado (o bien se desgrano una plancha de EPS) son de forma irregular. Son de color blanco. En este aspecto reside uno de los grandes problemas de las perlitas de EPS. En cuanto a su rugosidad superficial la superficie de la perlita es casi perfectamente lisa lo que afecta considerablemente la adherencia de la pasta de cemento y agua, a la misma, a la hora de mezclar los componentes del hormigón. Esto sumado a la baja densidad de la perlita hacen que alguna de ellas se “floten”

en la mezcla intima, generando así un esqueleto granular defectuoso. Esto se solucionó agregando un aditivo cementico usado en la parte de los revestimientos de los azulejos.

Gracias a la conformación del EPS (celdillas de aire cerradas y no conectadas entre sí) el material es de muy baja absorción. La granulometría que se realizó de este agregado fue variable entre 2 mm y 8 mm. En la Figura 4.16 se detalla la granulometría de los EPS reciclados.

4.10.12 Agregado de Neumáticos usados triturados.

La granulometría se realizó de acuerdo con la norma antes mencionada y el tamaño de los agregados fueron de 1 mm a 4 mm. Este tipo de agregado se clasificó como agregado fino y reemplazó parcialmente al agregado fino convencional. Como se muestra en la Figura 4.15 la granulometría de este ARLINC satisface la Norma IRAM 1505. La densidad de estos desechos arrogó valores de 0,34 g/cm^3.

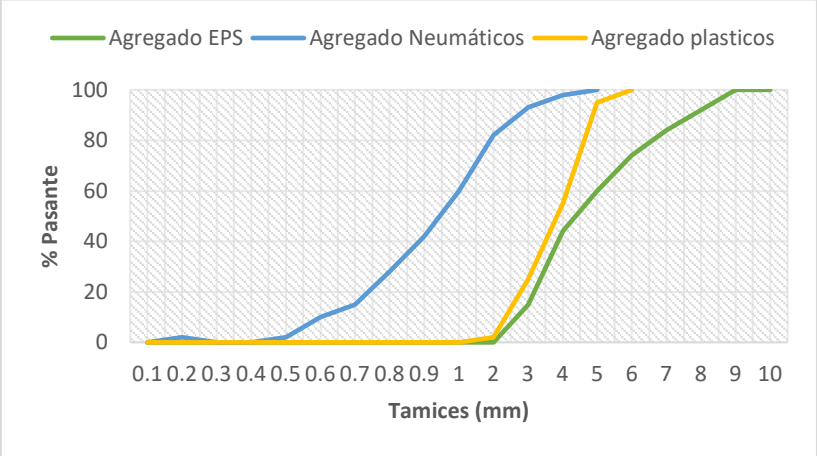


Fig. 4.15: Curvas granulométricas de los ARLINC.

4.10.12 Superligante para los ARLINC

Para mejorar la adherencia de la mezcla con los agregados reciclados livianos no convencionales, se incorporó un superligante. Se trata de un adhesivo impermeable para la colocación de piezas cerámicas de alta absorción en interiores. Es un polvo de color gris y su composición se basa en un cemento gris, áridos silíceos de granulometría compensada y aditivos orgánicos e inorgánicos. Su densidad es 1,6 g/cm^3.

4.11 Dosificaciones

Las dosificaciones de los hormigones se plantearon con el Método del Instituto Americano del Hormigón (ACI), que permite llegar a la dosificación final de una manera práctica, haciendo correcciones sucesivas por asentamiento y resistencia. La base para el cómputo es la expresión del m^3 de hormigón como suma del volumen sólido de cada uno de los componentes de la mezcla (ACI 211.1, 2009) El diseño de una mezcla es un proceso que consiste en tres pasos interrelacionados:

- Selección de los constituyentes.
- Determinación de sus cantidades relativas para producir, lo más económicamente posible, una mezcla de las características apropiadas, tanto en estado fresco como endurecido
- Ajuste de las cantidades estimadas mediante su ensayo en pastones de prueba.

Aunque muchas de las propiedades de los hormigones estructurales y los ladrillos son importantes, la mayoría de los métodos están dirigidos a la obtención de cierta resistencia a la compresión con una consistencia determinada. Se asume que, si esto se logra con éxito y la mezcla está bien especificado, las otras propiedades también serán satisfactorias.

El método A.C.I. es un método de dosificación para el diseño de mezclas de hormigón, así que lo utilizaremos para los ladrillos también; se basa en medir los materiales (cemento, agua, grava y arena) en peso y volumen, y se diseña tanto para una mezcla en estado fresco como endurecido.

La norma que rige los diseños de mezclas de concreto es la A.C.I 211.1 que, a su vez, está basa en la norma ASTM C33, donde se hace referencia a las especificaciones granulométricas.

Antes de diseñar la mezcla, como se dijo anteriormente se deben tener datos previos del tipo de obra que se va a construir y los tipos de materiales que se van a usar para construir la obra.

4.11.1 Elección del asentamiento

Los valores del asentamiento recomendados son los mostrados en la Tabla 4.12. y se usan cuando el método de compactación utilizado es la vibración (para otros métodos se deben sumar 1,5 cm a los valores de la Tabla 4.12.).

Tabla 4.12: Ámbitos de consistencia, asentamiento y métodos de compactación, extractados del Reglamento CIRSOC 201.

Asentamiento (cm)	Ámbito de consistencia	Aspecto del hormigón fresco	Tipo de estructura, condiciones de colocación y métodos de compactación
1 a 4,5	seca	suelto-tendencia a la segregación	vigas o pilotes de alta resistencia con vibraciones de formaletas. Vibradores potentes alta frecuencia
5,0 a 9,0	plástico	levemente cohesivo a cohesivo	pavimentos vibrados con máquina mecánica. Vibración o varillado o apisonado
10,0 a 15,0	blando	cohesivo o levemente fluido	construcciones en masas voluminosas. losas medianamente reforzadas con vibración. Fundaciones en concreto simple. pavimentos con vibradores normales. Varillado o vibración leve.
Mayor que 16	superfluidificado	fluido–tiende a segregarse	losas medianamente reforzadas y pavimentos, compactados a mano. columnas, vigas, fundaciones y muros, con vibración. secciones con mucho refuerzo. Trabajos donde la colocación sea difícil. revestimiento de túneles. no

recomendable para compactarlo con demasiada vibración. Varillado o muy leve vibración.

4.11.2 Elección del tamaño máximo nominal

Se trata de elegir una adecuada granulometría, tener una masa más compacta y con menos vacíos. Si se trata de una obra de hormigón armado, la separación de las armaduras y las dimensiones del elemento a hormigonar condicionarán la elección del tamaño máximo del agregado grueso a emplear. Estas relaciones pueden indicarse en la Tabla 4.13.

Tabla 4.13: Relaciones para el uso de los tamaños máximos de los agregados.

Tamaño Máximo de los agregados	1/3 de la altura de losas. 3/4 separación de armaduras y/o espesor de recubrimiento. 1/5 menor dimensión estructural.

4.11.3 Estimación de la cantidad de agua

La demanda de agua en las mezclas se debe a aspectos de manejabilidad, adherencia e hidratación. La Figura 4.16. muestra el requerimiento de agua en la mezcla, que está en función del asentamiento y el módulo de finura del agregado.

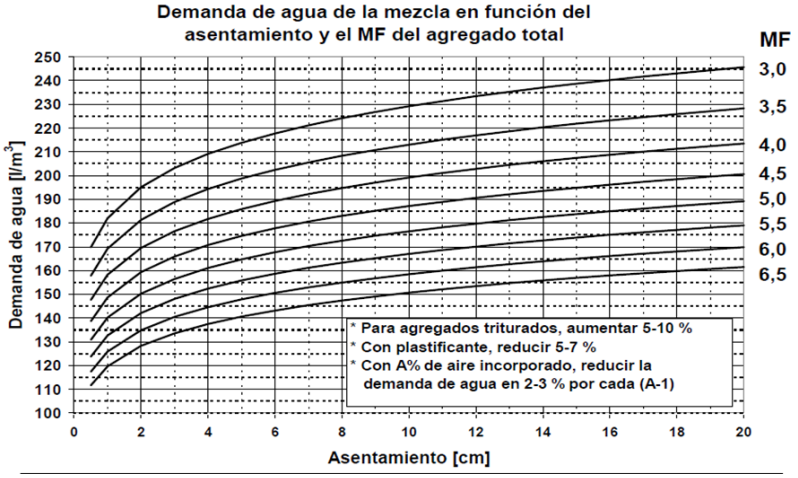


Fig. 4.16: Demanda de agua en función del asentamiento y MF.

4.11.4 Estimación de la relación agua cemento (a/c)

Este es el factor más importante en el diseño de mezclas, porque con él se pueden determinar los requisitos de resistencia, durabilidad, permeabilidad y acabado. Para determinar esta relación se utiliza la Figura 4.17.

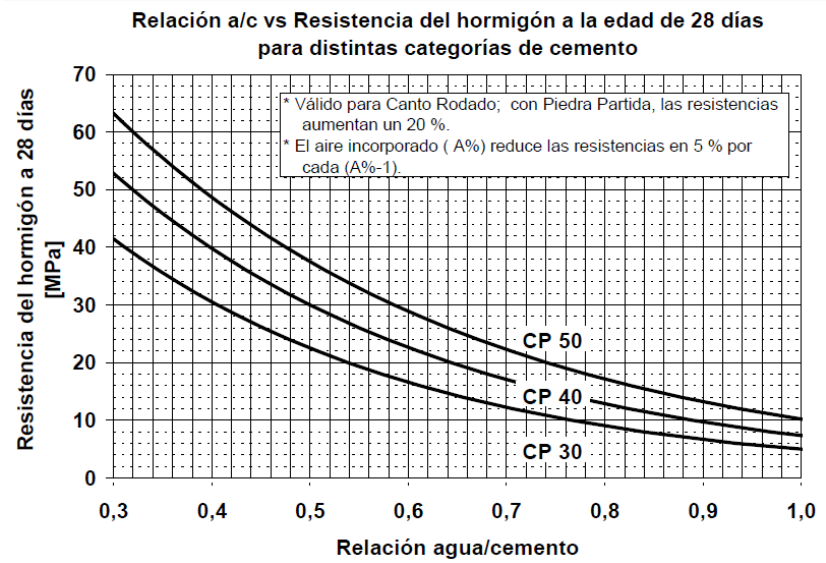


Fig. 4.17: Relación agua-cemento vs resistencia a la compresión.

4.11.5 Aditivos

El método contempla el uso de distintos tipos, básicamente los incorporadores de aire y los reductores de agua o fluidificantes (plastificantes) entre otros. En el primer caso, puede esperarse una cierta cantidad de aire que depende, entre otros factores, de la dosis de aditivo, el tamaño máximo del agregado y la consistencia de la mezcla, así como un efecto secundario de reducción en la cantidad de agua de mezclado y disminución de la resistencia. Con el uso de reductores de agua o fluidificantes, la reducción en la demanda de agua "esperada" permite distintas alternativas: disminución de la relación agua/cemento, aumento de la fluidez o una reducción en el contenido de cemento. No es redundante indicar que, en ningún caso se emplearán aditivos si no pueden medirse los materiales en peso en el momento de la elaboración de los hormigones. Además, no deberán mezclarse distintos aditivos en el mismo vaso dosificador, salvo indicación expresa del fabricante. En la Tabla 4.14. se detalla la clasificación de los aditivos para las mezclas.

Tabla 4.14: Tipos de aditivos para las mezclas clementicas.

Tipo de aditivo	Efecto deseado
Plastificante	Plastificar o reducir agua entre el 5% y el 12%
Retardantes	Retardar el tiempo de fraguado
Acelerantes	Acelerar el fraguado y el desarrollo de la resistencia a edades tempranas
Plastificantes retardantes	Plastificar o reducir agua entre el 5% y el 12% y retardar el fraguado
Plastificantes acelerantes	Plastificar o reducir agua entre el 5% y el 12% y acelerar el fraguado
Superplastificantes	Superplastificar o reducir agua entre el 12% y el 30% y retardar el tiempo de fraguado
Aditivos minerales	Aumentar la impermeabilización y mejorar la trabajabilidad
Cementantes	Aumentar propiedades cementantes y sustituir parcialmente el cemento
Puzolanas	Mejorar la trabajabilidad, la plasticidad, la resistencia a los sulfatos, reducir la reacción álcali- agregado, reducir la permeabilidad, reducir el calor de hidratación y sustituir parcialmente el cemento y rellenar
Inertes	Mejorar la trabajabilidad y rellenar
Formadores de gas	Provocar expansión antes del fraguado
Impermeabilizantes	Disminuir la permeabilidad
Ayudas de bombeo	Mejorar la capacidad de bombeo
Inhibidores de corrosión	Reducir el avance de la corrosión en ambientes con cloruros
colorantes	Colorear concreto

4.11.6 Etapas

A continuación, se enumeran las etapas del método a modo de resumen.

I. Elección del cemento a emplear (categorización por resistencia: CP30–CP40–CP50).
II. Elección de una consistencia adecuada.
III. Decidir si se incorporará aire en forma intencional.
IV. Distribución granulométrica de agregados:
    a. Seleccionar una curva o ámbito granulométrico apropiado para el agregado total.
    b. Selección y ajuste de las fracciones disponibles para ajustarse a lo seleccionado en Iva) (Mezcla de las distintas fracciones).
    c. Cálculo del Módulo de Finura (MF) del Agregado Total, contemplando los retenidos sobre los tamices de la serie normal.
V. Estimación de la cantidad de agua de amasado, en función del asentamiento elegido y el MF del agregado total.
VI. Cálculo de la resistencia de diseño, f'cm, en función de la resistencia especificada (f'ce). Verificación del cumplimiento de la f´cm mínimo por razones de durabilidad.
VII. Estimación de la relación a/c.
    a. Determinación de la relación agua/cemento necesario en función de la resistencia media a la edad de 28 días para las distintas categorías de cemento.
    b. Verificación del cumplimiento de eventual relación agua/cemento máximo por razones de durabilidad.
VIII. Cálculo del contenido unitario de cemento y verificación del cumplimiento de eventual contenido de cemento mínimo por razones de durabilidad.
IX. Determinación de la cantidad de agregado (fino y grueso) por diferencia a 1000 de los volúmenes de agua, cemento y aire estimado. Ese volumen se integra con los agregados en las proporciones establecidas en el paso IVb)

Se construye una tabla que sirve para afectar a estas cantidades por la absorción de los agregados y, en general, las proporciones de la mezcla se expresan para éstos en condición de saturados a superficie seca.

4.11.7 Determinación de la cantidad de agregado (fino y grueso) por diferencia a 1000 de los volúmenes de agua, cemento y aire estimado. Ese volumen se integra con los agregados en las proporciones establecidas en el paso IV.

Cuando los pesos específicos de los distintos agregados o fracciones que se emplean son similares, resulta indistinto trabajar con las proporciones en peso o en volumen, mientras que, si son significativamente diferentes entre sí, debe trabajarse con ecuaciones en volumen solamente (alternativa b).

Alternativa "a": ecuaciones en "peso" Ecuación 4.8, Ecuación 4.9 y Ecuación 4.10:

$$\text{Volumen total de agregados} = 1000 \text{ litros} - \sum \text{Volúmenes del (agua+cemento+aire)} \quad (4.8)$$

$$\text{Peso de Ag. Grueso 1} = (\text{Volumen total de agregados}) \times (\%\text{de AG1 en la mezcla}) \times (\text{Pe AG1}) \quad (4.9)$$

$$\text{Peso de Ag. grueso 2} = (\text{Volumen total de agregados}) \times (\%\text{ de AG2 en la mezcla}) \times (\text{Pe AG2}) \quad (4.10)$$

y así siguiendo si hubiese más agregados.

Alternativa "b": ecuaciones en volumen, Ecuación 4.11, Ecuación 4.12 y Ecuación 4.13:

Si PeAG1≠PeAG2≠PeAF1, entonces se plantea el siguiente sistema de ecuaciones, para trabajar en volúmenes:

$$\text{Volumen total de agregados} = 1000 \text{ litros} - \Sigma \text{Volúmenes del (agua+cemento+aire)} \quad (4.11)$$

$$\text{Volumen total de agregados} = \Sigma Vai = (\text{PesoAG1})/(\text{PeAG1}+\text{PesoAG2})/(\text{PeAG2}+\ldots+\text{PesoAFn})/(\text{PeAFn}) \quad (4.12)$$

$$\text{Volumen total de agregados} = \Sigma\, Vai = Ptotal\,[\%AG1/PeAG1 + \%AG2/PeAG2 + \ldots + \%AFn/PeAFn] \quad (4.13)$$

Igualando (4.11) con (4.13) se obtiene el P_{total} del agregado, el que se distribuye luego según los porcentajes de participación en la mezcla, según IVb) (% A_{G1}, % A_{G2}, … , % A_{Fn}). Tenemos asi Ecuación 4.14 y Ecuación 4.15:

$$P_{AG1} = P_{Total}\,(\text{de Agregados}) \times \%A_{G1}/100 \quad (4.14)$$

$$P_{AG2} = P_{Total}\,(\text{de Agregados}) \times \%A_{G2}/100 \quad (4.15)$$

Finalmente, para expresar los Pesos de los agregados en condición de "saturados a superficie seca" es necesario multiplicar los valores calculados por (1 + Abs) del agregado.

Un procedimiento que simplifica el diseño de la mezcla es construir una Tabla resumen, tal como la que se indica a continuación (Tabla 4.15):

Tabla 4.15: Tabla resumen de los cálculos.

componente	Peso para 1 m^3 de mezcla [kg*] (A)	Densidad [kg/m3] (B)	Volumen solido [dm^3] (C)	Peso (sss) por m^3 de mezcla [kg] (D)	Peso húmedo para 1 m^3 [Kg] (E)
Agua					
Cemento					
Ag. grueso 1					
Ag. grueso 2					
Ag. fino 1					
Ag. fino					
Ag. liviano					
Aire					
Aditivo					
SUMA					

Donde cada columna es:

(A) Valores obtenidos siguiendo el método adoptado.

(B) Corresponde a los agregados en condición de seco en estufa. Si no hay datos experimentales, se adopta 3,15 kg/dm^3 para el cemento Portland sin adiciones.

(C) Se calcula dividiendo la columna de (A) por la columna (B). Las sumas de volúmenes sólidos, en dm^3, debe ser 1000. De no existir datos experimentales, el aire naturalmente incorporado se estima en 1-1,5 % (o sea, entre 10 y 15 litros por metro cúbico de mezcla).

(D) Se multiplican los pesos de los agregados de la columna (A) por el factor (1+Abs/100).

(E) Se multiplican los pesos secos de los agregados de la columna 1 por (1 + h). La diferencia entre los pesos de los agregados húmedos y los pesos en

condición de saturados a superficie seca debe "restarse" al agua de amasado. Si esta diferencia fuera negativa (tendencia a "absorber" agua de la mezcla), es prudente multiplicarla por 0,7.

Las sumas correspondientes a las columnas (D) y (E) deben ser idénticas. Completaremos entonces las tres primeras columnas de la tabla, con nuestros datos.

Para llegar al valor de la resistencia a la compresión que exige la norma, se realizaron una serie de pastones, dosificando en volumen. Se fueron variando la cantidad de cemento y los agregados finos y gruesos (en el caso de hormigón estructural con plásticos), como también la cantidad de agregados reciclados livianos no convencionales y analizando los rendimientos.

Uno de los primeros pasos a abordar en el diseño del hormigón estructural es el análisis de la trabajabilidad del mismo, dado que la introducción de polímeros a la mezcla del hormigón suma una variable que incide en las propiedades reológicas.

4.11.8 Dosificaciones para hormigón estructural, mampostería, hormigón celular y baldosas

La primera etapa experimental tuvo como objetivo comparar el efecto de la incorporación de distintos agregados reciclados livianos no convencionales (ARLINC) en las propiedades en estado fresco del hormigón. Comprendió el estudio de la trabajabilidad y comportamiento endurecido, en hormigones realizados con diferentes agregados de cementos, combinados algunos con adiciones minerales.

Se estudiaron primero cinco grupos de hormigones diferenciados principalmente por el tipo de plástico (PR_1, PR_2, PR_3 PR'C, PR'_1, PR'_2 y PR'_3), agregado de finos de perlita (PP y PP') y las probetas de control (PRC y PRC'), estos corresponden a la serie "estructural". Luego tenemos la serie "mampostería" que lo forman cinco dosificaciones diferentes (MEN, MEP_1, MEP_2, MEP_3, ME y MEC). También, la serie "celular" que lo conforman tres dosificaciones diferentes (HC_N, HC_1 y HC_2). Por último, la Serie Baldosa con tres dosificaciones diferentes (B_1, B_2 y B_3). Se evaluó el efecto de la morfología, absorción de agua y granulometría de

los polímeros en las mezclas. Los resultados de estos pastones dieron lugar a la dosificación de la serie de hormigones definitivos de la segunda etapa. La designación para cada serie de hormigón puede observarse en la Tabla 4.16.

Tabla 4.16: tipo de series, tipo de agregado reciclado usado y nomenclatura.

Serie	Tipo de ARLINC	Relación a/c	nomenclatura
Serie Estructural	PEAD y PEBD	0,45	PR_C
			PR_1
			PR_2
			PR_3
		0,54	PR'_C
			PR'_1
			PR'_2
			PR'_3
	PEAD y FP	0,55	PP
		0,67	PP'
Serie Mampostería	EPS y NTU	0,4	MEN
	EPS y PEBD	0,4	MEP_1
		0,4	MEP_2
	EPS	0,38	ME
	-	0,4	MEC
	EPS y PEAD	0,43	MEP_3
Serie Celular	NTU	0,42	HCN
	-	0,22	HC_1
	-	0,43	HC_2
Serie Baldosa	-	0,65	B_1
	EPS y PEBD	0,56	B_2
	EPS y PEAD	0,73	B_3

Las dosificaciones resultantes para cada Serie se presentan en las Tablas 4.17, 4.18, 4.19 y 4.20. Los materiales se expresan en peso para elaborar un metro cúbico de hormigón.

4.11.8.1 Dosificaciones Serie Estructural

Para la primera prueba de hormigones con plásticos reciclados se diseñaron y elaboraron cinco hormigones con CPC30, agregado grueso, agregado fino, polietileno de alta y baja densidad, el aditivo superligante y finos de perlita. El aditivo se utilizó en un 0,63% con respecto al peso del cemento. En la Tabla 4.19 se presentan las distintas dosificaciones siendo su denominación la siguiente:

- PR_C: Hormigón de referencia sin plásticos reciclados. Relación a/c=0,55. Porcentaje de agregados: 47% fino y 53% grueso.
- PR_1: 73 kg de Polietileno de Alta Densidad (19% en peso de reemplazo del agregado grueso). Relación a/c=0,45. Porcentaje de agregados: 52% fino y 48% grueso.
- PR_2: 143 kg de Polietileno de Alta Densidad (37% en peso de reemplazo del agregado grueso). Relación a/c=0,45. Porcentaje de agregados: 57% fino y 43% grueso.
- PR_3: 62 kg de Polietileno de Baja Densidad (19% en peso de reemplazo del agregado fino). Relación a/c= 0,45. Porcentaje de agregados: 41% fino y 59% grueso.
- PP: 65 kg de Polietileno de Alta Densidad (19% en peso de reemplazo del agregado grueso) y 33 kg de finos de perlita (19 % en peso de reemplazo del cemento). Relación a/c= 0,45. Porcentaje de agregados: 57% fino y 43% grueso.

Tabla 4.17: Dosificaciones de la primera prueba (serie estructural).

Componentes	PR_C	PR_1	PR_2	PR_3	PP
Agua	155	155	155	155	155
Cemento	345	345	345	345	279
Agregado grueso	1105	895	596	1105	795
Agregado fino	955	955	855	774	955
Agregado Plástico	0	73	143	62	65
Aire	10	10	10	10	10

Aditivo	2	2	2	2	2
Finos de Perlita	-	-	-	-	33
Densidad [kg/m^3]	2572	2435	2106	2453	2294

Para la segunda prueba de hormigones se diseñaron y elaboraron cinco hormigones con diferentes cantidades con respecto a la primera prueba. El aditivo se mantuvo en un 0,63% con respecto al peso del cemento. En la Tabla 4.18 se presentan las distintas dosificaciones siendo su denominación la siguiente:

- PR'$_C$: Hormigón de referencia sin plásticos reciclados. Relación a/c=0,54. Porcentaje de agregados: 37,5% fino y 62,5% grueso.
- PR'$_1$: 78 kg de Polietileno de Alta Densidad (19% en peso de reemplazo del agregado grueso). Relación a/c=0,54. Porcentaje de agregados: 42% fino y 58% grueso.
- PR´$_2$: 152 kg de Polietileno de Alta Densidad (37% en peso de reemplazo del agregado grueso). Relación a/c=0,54. Porcentaje de agregados: 48% fino y 52% grueso.
- PR'$_3$: 60 kg de Polietileno de Baja Densidad (19% en peso de reemplazo del agregado fino). Relación a/c= 0,54. Porcentaje de agregados: 41% fino y 59% grueso.
- PP': 79 kg de Polietileno de Alta Densidad (19% en peso de reemplazo del agregado grueso) y 49 kg de finos de perlita (19 % en peso de reemplazo del cemento). Relación a/c=0,66. Porcentaje de agregados: 42% fino y 58% grueso.

Tabla 4.18: Dosificaciones de la segunda prueba (serie estructural).

Componentes	PR'C	PR'1	PR'2	PR'3	PP'
Agua	140	140	140	140	140
Cemento	259	259	259	259	210
Agregado grueso	1364	1033	803	1094	999
Agregado fino	816	749	755	752	721
Agregado Plástico	0	78	152	60	79

Aire	0	0	0	0	10
Aditivo	2	2	2	2	1
Fino de Perlita	0	0	0	0	49
Densidad [kg/m^3]	2581	2261	2111	2307	2209

4.11.8.2 Dosificaciones Serie Mampostería

Para esta etapa de prueba se utilizaron en el hormigón los agregados reciclados livianos no convencionales (EPS, PEAD, PEBD y Neumáticos Triturados Usados o NTU), o en su abreviación ARLINC. Se procedió a diseñar cuatro grupos de hormigones y sus designaciones fueron:

- MEN: 5 kg de desechos de EPS. Relación a/c=0,4. Porcentaje de agregado fino y cemento: 23% fino y 53% cemento.
- MEP$_1$: 5 kg de desechos de EPS. 23 kg de desechos plásticos. Relación a/c=0,4. Porcentaje de agregado fino y cemento: 30% fino y 22% cemento.
- MEP$_2$: 4 kg de desechos de EPS (20 % menos que probeta control MEN). 94 kg de desechos plásticos. Relación a/c=0,4. Porcentaje de agregado fino y cemento: 21% fino y 47% cemento.
- MEP$_3$: 6 kg de desechos de EPS más pequeños (20 % más que probeta control de MEN). 89 kg de desechos plásticos. Relación a/c=0,43. Porcentaje de agregado fino y cemento: 22% fino y 45% cemento.
- ME: 5 kg de desechos de EPS. 94 kg de neumáticos triturados usados. Relación a/c=0,4. Porcentaje de agregado fino y cemento: 21% fino y 48% cemento.
- MEC: Sin agregados de desechos. Relación a/c=0,4. Porcentaje de agregado fino y cemento: 23% fino y 53% cemento.

En la Tabla 4.19 se detallan los pesos de cada componente que forman la serie mampostería.

Tabla 4.19: Dosificaciones de la serie mampostería.

Componentes	MEN	MEP_1	MEP_2	MEP_3	ME	MEC
Agua	149	178	178	187	162	255
Cemento	377	443	443	433	443	642
Agregado fino	159	189	189	208	189	274
Agregado EPS	5	5	4	6	5	0
Agregado NTU	0	0	0	0	94	0
Agregado Plástico	0	23	94	89	0	0
Aditivo	17	23	28	35	23	33
Densidad [kg/m^3]	707	861	938	958	916	1205

4.11.8.3 Dosificaciones Serie Hormigón Celular

Para esta etapa de prueba se utilizó en el hormigón un agregado espumante, que genera aire en la mezcla (Tabla 4.20). Se procedió a diseñar tres grupos de hormigones y sus designaciones fueron:

- HC_1: 25 cm^3 de espumante en 350 cm^3 de agua. 100 g de Neumático Triturado Usado (NTU). Relación a/c=0.42.
- HC_2: 13 cm^3 de espumante en 175 cm^3 de agua (50% menos de espumante y 53 % menos de agua para espumante con respecto a probeta HC1). Relación a/c=0.22.
- HC_3: 25 cm^3 de espumante en 350 cm^3 de agua (6 % más de agua para espumante con respecto a HC1). Relación a/c=0.43.

Tabla 4.20: Dosificaciones de la serie de hormigón celular.

Componentes	HC_1	HC_2	HC_3
Agua	100	120	100
Cemento	315	630	315
Agregado fino	794	794	794
Agregado espumante	3	1.56	3
Agua para espumante	33	17,5	35
Agregado NTU	10	0	0

Densidad [kg/m^3]	1255	1563	1247

4.11.8.4 Dosificaciones Serie Baldosa

Para esta etapa de prueba se utilizó en el hormigón un agregado de oxido férrico, que genera un color rojo en la mezcla (Tabla 4.21). Se procedió a diseñar dos grupos de dosificaciones y sus designaciones fueron:

- B_1: Sin agregados de desechos. Relación a/c=0,65. 2,22 kg de pigmento rojo. Porcentaje de agregado fino y cemento: 55 fino y 45% grueso.
- B_2: Agregados de 9 kg de desechos de EPS y 45 kg de desechos plásticos PEBD. 2,4 kg de pigmento rojo (9 % más que probeta B_1). Relación a/c=0,56. Porcentaje de agregado fino y cemento: 55 fino y 45% grueso (9,5 % menos de agregados finos y grueso que probeta B_1).
- B_3: 9 kg de desechos de EPS (igual que probeta B_2). 54 kg de desechos plásticos PEAD (16 % más que probeta B_2.). 3,6 kg de pigmento rojo (63 % más que la probeta B_1 y 50 % más que probeta B_2). Relación a/c=0,73. Porcentaje de agregado fino y grueso: 55% fino y 45% grueso (12 % menos de agregados finos y grueso que probeta B_1).

Tabla 4.21: Dosificaciones de la serie de baldosas.

Componentes	B_1	B_2	B_3
Agua	176	140	122
Cemento	270	250	167
Agregado fino y grueso	569	515	500
Agregado EPS	0	9	9
Agregado Plástico	0	45	54
Aditivo	120	120	120
Pigmento	2,22	2,40	3,6
Densidad [kg/m^3]	1137	1081	975

4.12 Métodos y resultados de ensayos

4.12.1. Elaboración de pastones para la serie estructural

En lo que respecta al procedimiento de mezclado, la mezcla se amasó en una hormigonera de tambor basculante de 60 litros de capacidad (Figura 4.18). El procedimiento de mezclado tuvo el primer lugar la humectación de la hormigonera para que no afecte en la dosificación, luego se comenzó con el procedimiento de mezclado se introdujo el agregado grueso, luego se colocó el agregado plástico con el aditivo superligante, posteriormente el agregado fino ambos en condición de superficie seca y saturada. Luego se agregó un tercio del agua de mezclado y se mezcló por unos minutos hasta lograr que se unificaran. Luego se agregó el cemento y la adición mineral, en caso de corresponder, y se mezcló para homogeneizar la mezcla durante un minuto. A continuación, se añadió el agua de mezclado restante en dos etapas. Una primera, aproximadamente 60% del agua de dosificación y el otro 20% restante junto con el aditivo superligante. Se amasó todo durante 7 minutos aproximadamente, se verificó la homogeneidad de la mezcla, y finalmente se procedió a realizar la medida del asentamiento del cono de Abrams, IRAM 1536.

a)  b) 

Fig. 4.18: a) Balanza para las dosificaciones y b) Hormigonera de 60 litros.

El hormigón fue colocado en moldes de acero de 10 cm de diámetro por 20 cm de alto compactadas de manera manual según norma IRAM 1524. En el caso de las probetas para ensayo de conductividad térmica el hormigón se colocó en moldes de madera de 30 cm de lados por 4 cm de espesor, compactados en dos capas con la cuchara de albañil y una regla para darle una buena terminación

a las caras de las probetas (Figura 4.19a) Veinticuatro horas después del moldeo, las probetas desmoldadas se colocaron en una pileta de curado por inmersión en agua hasta la fecha de ensayo (Figura 4.19b).

a)  b) 

Fig. 4.19: a) Moldes de acero con la mezcla y b) Pileta de curado para las probetas.

4.12.2. Elaboración de pastones para la Serie Mampostería

Para la elaboración de las mezclas de la serie mampostería se siguieron los siguientes pasos: 1°) se agregó agua a los ARLINC, se mezclan y dejar secar unos 15 minutos. 2°) introducimos el o los ARLINC (según corresponda la dosificación) a la hormigonera. 3°) agregamos aditivo y cemento con un 20 %de agua de amasado. 4°) luego de unos minutos de mezclado introducimos el agregado fino con un 30 % de agua de amasado. 5°) luego de tres minutos de mezclado agregamos el agua restante (50%). 6°) tomamos la temperatura de la mezcla y procedemos a llenar los moldes para la conductividad térmica y los moldes de acero para los pastones (Figura 4.20).



Fig. 4.20: A la izquierda agregados de ARLINC y a la derecha toma de temperatura.



Fig. 4.21: Mezcla del EPS y Neumático Usado.

En la Figura 4.21 podemos apreciar la buena adaptación de los agregados ARLINC con el aditivo superligante. En la Figura 4.22 se muestra la mezcla de agregados y luego el estado final de la mezcla. El mezclado se realizó en una carretilla con una pala de albañil para demostrar la sencilla trabajabilidad de la mezcla.

a)  b) 

Fig 4.22: a) Mezclado con pala a mano de los agregados. b) Luego de 7 minutos de mezclado la pasta esta lista.

4.12.3. Elaboración de pastones para la Serie Hormigón Celular

Esta etapa de elaboración de pastones es diferente a las anteriores. Por tratarse de una mezcla más fluida se procedió de la siguiente manera:

1°) Se construyo una mezcladora de hierro (Figura 4.23).



Fig. 4.23: Mezcladora casera construida a base de barra de hierro.

2°) Se construyo una pistola generadora de espuma (Figura 4.24).



Fig. 4.24: Pistola casera construida para generar espuma.

3°) En un recipiente colocamos agua y el agente espumante (depende de la dosificación la cantidad). El agente espumante es un detergente de uso cotidiano para la limpieza. Esta mezcla le agregamos a la pistola generadora de espuma.
4°) Para estos ensayos se utilizó un balde de 20 litros. Introducimos al balde el agregado fino y el cemento con un 40% del agua para amasado. Se produce la mezcla por unos 6 minutos agregando el agua restante.

5°) Agregamos espuma a la mezcla y procedemos a batir con la pala mezcladora hasta que quede todo homogenizado (Figura 4.25).

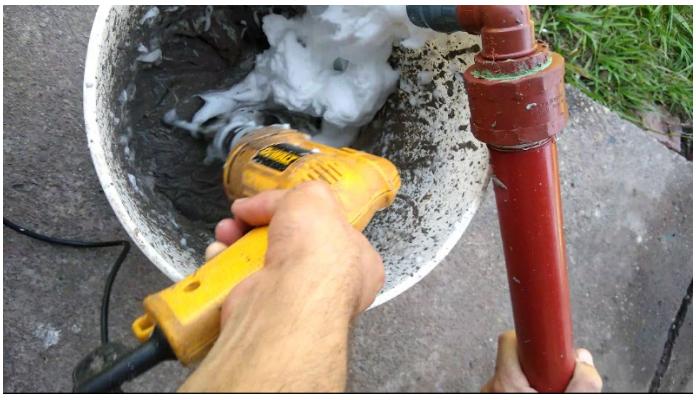


Fig. 4.25: Proceso de mezclado de la serie hormigón celular.

6°) Una vez que este toda la mezcla homogenizada, procedemos a llenar los moldes de acero. A las 48 hs se realiza el desmolde (al tratarse de una mezcla muy fluida) y se llevan las probetas a la pileta de curado hasta los días de ensayos.

4.12.4. Elaboración de pastones para la Serie de Baldosas.

Para la elaboración de las mezclas de la serie de baldosas el procedimiento es similar a la de la serie de mampostería y fueron los siguientes:

1°) Se agregó agua a los ARLINC, se mezclan y dejar secar unos 15 minutos. En la Figura 4.26 se muestran los agregados para formar la pasta para las baldosas.



Fig. 4.26: Ingredientes utilizados para la elaboración de la Serie de Baldosas.

2°) Introducimos el o los ARLINC (según corresponda la dosificación) a la hormigonera.

3°) Mezclamos un 20 % del agua con el pigmento.

4°) Agregamos aditivo y cemento con un 20 %de agua de amasado.

5°) Luego de unos minutos de mezclado introducimos el agregado fino con un 10 % de agua de amasado, Figura 4.27.



Fig. 4.27: Agregados de todos los ingredientes para la realización de la baldosa.

6°) Después de tres minutos de mezclado agregamos el agua restante (50%), Figura 4.28.



Fig. 4.28: Etapa final de la pasta.

7°) Tomamos la temperatura de la mezcla y procedemos a llenar los moldes para la conductividad térmica y los moldes de acero para los pastones, Figura 4.29.

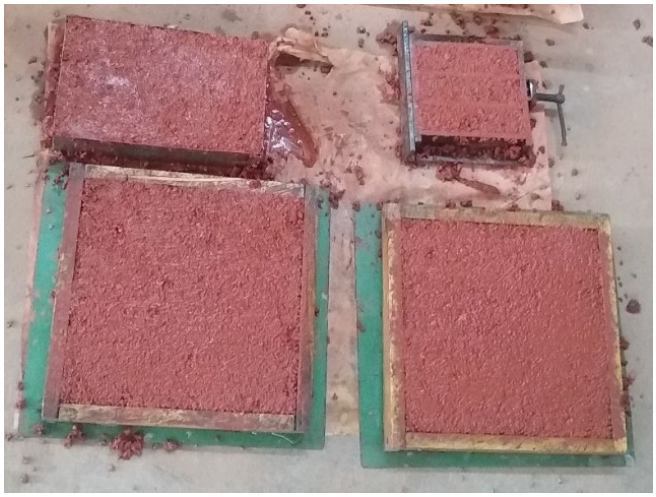


Fig. 4.29: Llenado de los moldes para sus posteriores ensayos.

4.13 Ensayos sobre hormigón en estado fresco

4.13.1 Serie Estructural

Para verificar la influencia de los agregados reciclados en la trabajabilidad del hormigón se realizaron ensayos en estado fresco determinando el asentamiento con el cono de Abrams (Norma IRAM 1536), Se procedió a llenar el cono con hormigón; se repite el ensayo dos veces por cada pastón sacando un valor promedio de asentamiento. Luego se procedió a realizar el ensayo de exudación según Norma 1604. Se llenó un molde normalizado con hormigón fresco y se midió periódicamente el volumen de agua exudada determinando los siguientes parámetros:

- Velocidad de exudación: mide el volumen de agua exudada por unidad de tiempo.
- Capacidad de exudación: Está dada por el porcentaje de agua de mezclado que se exuda. En la Tabla 4.22 se presentan los resultados de la Serie Estructural.

Tabla 4.22: Resultado de los asentamientos y capacidad de exudación de la serie estructural.

Serie	Tipo de ARLINC	Relación a/c	Nomenclatura	Asentamiento [cm]	Capacidad de exudación [g/cm^2]
Serie Estructural	PEAD y PEBD	0,45	PR_C	2,5	0,70
			PR_1	1,3	1,76
			PR_2	1,4	2,30
			PR_3	1,2	0,75
		0,54	PR'_C	4	0,90
			PR'_1	3,5	2,45
			PR'_2	3,3	4,2
			PR'_3	3	2,5
	PEAD y FP	0,55	PP	1,4	1,68
		0,67	PP'	4,5	3,8

Por lo apreciado en el resultado de la Tabla 4.22, conforme se fue agregando más reciclado de plásticos al hormigón el asentamiento decayó. En la primera prueba (PR_1) hay una rebaja del 48% del asentamiento con respecto a la mezcla de control. Mientras la mayor rebaja se vio en la probeta PR_3, donde presento un 52 % de asentamiento menos que la de control. Los ensayos con relación de agua/cemento al 0,54 tuvieron mayor asentamiento, variaron desde los 3 cm (Probeta PR'_3) hasta los 4 cm (probeta PR'_C). En los ensayos de las probetas con finos de perlita, el mayor asentamiento se dio en la probeta PP', ya que se la preparo con mayor relación de agua/cemento. En la Figura 4.30 se muestra el ensayo de asentamiento de la probeta PR_3 de la Serie Estructural.



Fig. 4.30: Ensayo de asentamiento para probetas de Serie Estructural.

Los resultados de ensayos de exudación de agua mostrados en la Tabla 4.22 presentan un comportamiento similar al del hormigón de referencia (PR_C y PR'_C) durante los primeros 40 minutos. Sin embargo, transcurrido este tiempo los valores de exudación de agua aumentan notablemente, esto puede observarse en la Figura 4.31 donde se presenta el volumen de agua exudada por unidad de superficie (cm^3/cm^2), para los hormigones con mayor porcentaje de plástico de la Serie Estructural.

En la Figura 4.31 puede visualizarse claramente como las mezclas (PR_C y PR'_C), hormigones de referencia sin plástico, son las que menos agua exudaron durante el ensayo.

Se observa cómo en todos los hormigones de la serie estructural aumenta la exudación en la medida que se incrementa el contenido de plástico. El hormigón PR_3, con incorporación de agregado plástico hasta un 19 %, se comporta prácticamente de la misma manera situándose próximos a la curva del hormigón de control PR_C. El hormigón PR_1 que tiene 52% agregado fino y 48 % de agregado grueso tuvo un comportamiento similar al hormigón PP con agregados de finos de perlita. La mezcla PR_2 fue la que mayor velocidad de exudación presento ya que posee un 37 % más de agregados plásticos. En la serie de a/c=0.54 las mezclas con agregados plásticos presentaron mayor velocidad de exudación que las mezclas de la serie a/c=0.45. Siendo la mezcla PR'_2 la que mayor velocidad de exudación tuvo de todas las mezclas. En definitiva, a mayor

porcentaje de plástico en la mezcla, el volumen de agua y la velocidad de exudación también aumenta.

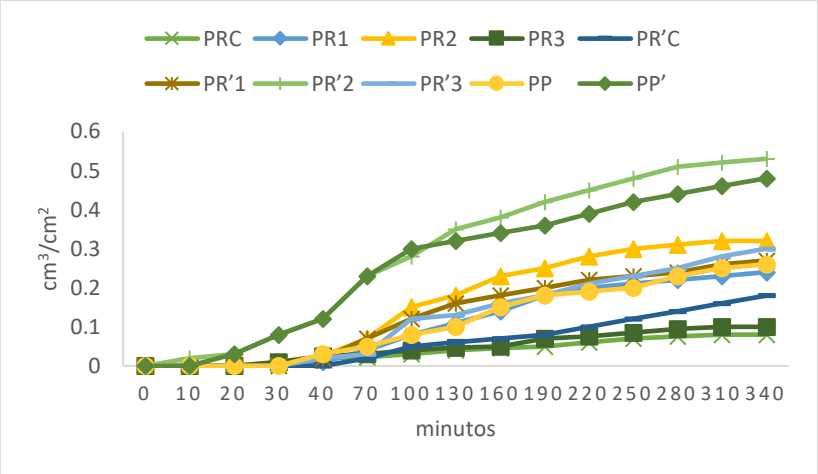


Fig. 4.31: Velocidad de exudación de la Serie Estructural.

Según la Norma IRAM 1604 cuando se construyan elementos estructurales que superen los 2 metros de altura o que estén sometidos a abrasión, erosión o cavitación, la exudación del hormigón debe cumplir que la capacidad de exudación igual o menor a 5% y la velocidad de exudación igual o menor que 100 x 10^{-6} cm/s. Las mezclas PP' y PR'_2 no cumplen con estas dos condiciones, mientras que todas las demás mezclas si lo cumplen. Las consecuencias de la exudación excesiva es que provoca canales y capilares que subsisten después de endurecido el hormigón aumentando la permeabilidad del hormigón, son las vías de ingreso de sustancias agresivas o de agua libre.

4.13.2 Serie Mampostería

Para verificar la influencia de los agregados ARLINC en la trabajabilidad de la mezcla se realizaron ensayos en estado fresco determinando el asentamiento con el cono de Abrams (Norma IRAM 1536). Se procedió a llenar el cono con la mezcla que será destinada a la mampostería; se repite el ensayo dos veces por cada pastón sacando un valor promedio de asentamiento. En la Tabla 4.23 se presentan los resultados de las Series Mampostería.

Tabla 4.23: resultado de los asentamientos de la Serie Mampostería.

Serie	Tipo de ARLINC	Relación a/c	Nomenclatura	Asentamiento [cm]
Serie Mampostería	EPS y NTU	0,4	MEN	0,9
	EPS y PEBD	0,4	MEP_1	0,8
		0,4	MEP_2	1
	EPS y PEAD	0,43	MEP_3	1,3
	EPS	0,38	ME	0,5
	-	0,4	MEC	2

Por lo apreciado en el resultado de la tabla 4.23, el agregado EPS hace que la mezcla sea más compacta y por ello los resultados de los asentamientos son bajos. El de mayor asentamiento es la mezcla de control (MEC) que no tiene agregados reciclados. Mientras que la de menos asentamiento es la probeta ME. Se realizaron dos diferentes relaciones a/c, la primera de 0,4 y la segunda de 0,38. Los resultados obtenidos fueron satisfactorios, ya que los asentamientos estuvieron dentro del rango calculado teóricamente.

4.13.3 Serie Hormigón Celular

Este tipo de hormigón es especial por su alta fluides, por lo que la aplicación del cono Abrams no se llevó a cabo.

4.13.4 Serie Baldosa

El procedimiento es el mismo que de las Series anteriores. Se procedió a llenar el cono con la mezcla; se repite el ensayo dos veces por cada pastón sacando un valor promedio de asentamiento. En la Tabla 4.24 se presentan los resultados de las Serie de Baldosas.

Tabla 4.24: resultado de los asentamientos de la Serie de Baldosas.

Serie	Tipo de ARLINC	Relación a/c	nomenclatura	Asentamiento [cm]
Serie Baldosa	EPS y PEAD	0,56	B_2	3,5
		0,73	B_3	4,5
	-	0,65	B_1	4,0

Por lo apreciado en el resultado de la Tabla 4.24, se aumentó la relación de agua/cemento (a/c) para que la mezcla sea más fluida, por ellos los resultados de los asentamientos son más altos que las anteriores series. El de mayor asentamiento es la mezcla B_3 que tiene más kg de agregados plásticos. Mientras que la de menor asentamiento es la probeta B_2 que contiene menos agregado plástico y más de agregados finos y gruesos.

4.14 Ensayos sobre hormigón en estado endurecido

Las pruebas de resistencia a la compresión se llevaron a cabo a los 7 días y 28 días de curado de las probetas cilíndricas de 10 cm x 20 cm, según norma IRAM 1546, también los ensayos de resistencia a la tracción por compresión diametral, según norma IRAM 1658. El módulo elástico se determinó según establece la norma ASTM C469 a los 28 días.

Los ensayos de flexión y choque para la Serie de Baldosas se realizaron a los 7 y 28 días de realizadas las probetas siguiendo la Norma IRAM 1522. Las probetas tienen la forma prismática de 4 cm x 4 cm x 16 cm.

Para analizar el comportamiento térmico de las diferentes Series, se determinó el coeficiente de conductividad térmica mediante un equipo de placa caliente, de acuerdo a Norma IRAM 11.559. Dicho aparato se detalla en el capítulo 3 de esta tesis. Para las mediciones realizadas se necesitaron dos probetas mellizas de cada mezcla, dado que este modelo de equipo necesita dos muestras de similares características para medir la conductividad térmica (k). Las dimensiones de las probetas eran de 30 cm de alto x 30 cm ancho x 4 cm de espesor.

4.14.1 Ensayo estado endurecido de Serie Estructural

A continuación, en la Tabla 4.25 se presentan los resultados de la resistencia a compresión, conductividad térmica y densidad, obtenidos para las edades de 7 y 28 días de los hormigones de la primera Serie Estructural.

Tabla 4.25: Resultados de la resistencia a la compresión y conductividad para la primera Serie Estructural.

Probetas	Rc [Kg/cm^2] a los 7 días	Rc [Kg/cm^2] a los 28 días	Cond. Térmica *k* [W/mK]	Densidad [Kg/m^3]
PR'C	51,56	103	1,76	2581
PR'1	48,26	106	1,36	2261
PR'2	18,23	29	1,05	2111
PR'3	28,36	48	1,44	2307
PP'	25,78	40	1,29	2209

En esta serie se trabajó con relaciones de a/c = 0,54 y a/c = 0,67 para la dosificación de finos de perlita.

Al igual que las demás propiedades en estado fresco, la densidad de la Serie Estructural también disminuye en la medida que se incorpora mayor porcentaje de agregado plástico a la mezcla. La probeta de control PR_C es la de mayor densidad, seguida por la probeta PR_3 que contiene 62 kg de agregado plastico por m^3 de mezcla. La de menor densidad es la probeta PR_2 que contiene 143 kg de plastico por m^3 de mezcla, lo cual representa 57 % mas que la probeta PR_3. Los valores en que se redujo la densidad de la probeta PR_C van desde el 5 % al 19 %. Esto se debe al reemplazo de agregados pétreos por agregado plásticos.

a)  b) 

Fig. 4.32: a) Probeta durante el ensayo de compresión y b) Luego del ensayo.

En la Figura 4.32 tenemos el momento en que se realiza el ensayo destructivo de una de las muestras de la serie estructural y como queda la muestra luego del ensayo. Podemos notar que la probeta cilíndrica luego del ensayo de compresión presento un corte diagonal uniforme, lo que hace que la mezcla estuvo bien distribuida y un buen curado en la pileta de agua.

En la Tabla 4.26 se detallan los resultados de la segunda etapa de la Serie Estructural. En la cual se trabajó con relaciones de a/c = 0,45 y a/c = 0,55 para la dosificación con finos de perlita.

Tabla 4.26: Ensayos de compresión axial de la segunda etapa de la Serie Estructural.

Probetas	Rc [Kg/cm^2] a los 7 días	Rc [Kg/cm^2] a los 28 días	Conductividad Térmica *k* [W/mK]	Densidad [Kg/m^3]
PR_C	191	310	1,89	2572
PR_1	160	200	1,43	2435
PR_2	120	135	0,80	2106
PR_3	150	190	1,46	2453
PP	135	173	1,33	2294

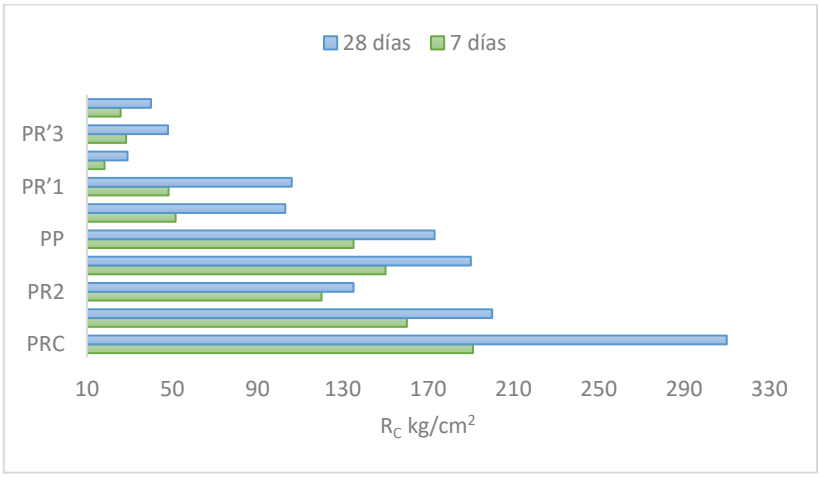


Fig. 4.33: Resultados de la resistencia a la compresión de la Serie Estructural.

En la Figura 4.33 tenemos la resistencia a la compresión de las dos etapas de ensayos de la Serie Estructural a los 7 días y 28 días. Como era de esperarse la probeta de control PR_C tuvo la mayor resistencia a la compresión (310 kg/cm^2), seguida por la probeta PR_1 con 200 kg/cm^2, representando 35 % menos que la probeta de control. PR_3 y PP tuvieron valores de 190 kg/cm^2 y 173 kg/cm^2

respectivamente. Estas tres probetas (PR_1, PR_3 y PP) superaron el requisito mínimo de 170 kg/cm^2 propuesto por la Norma CIRSOC 202. Las demás probetas no llegaron a cumplir la resistencia mínima.

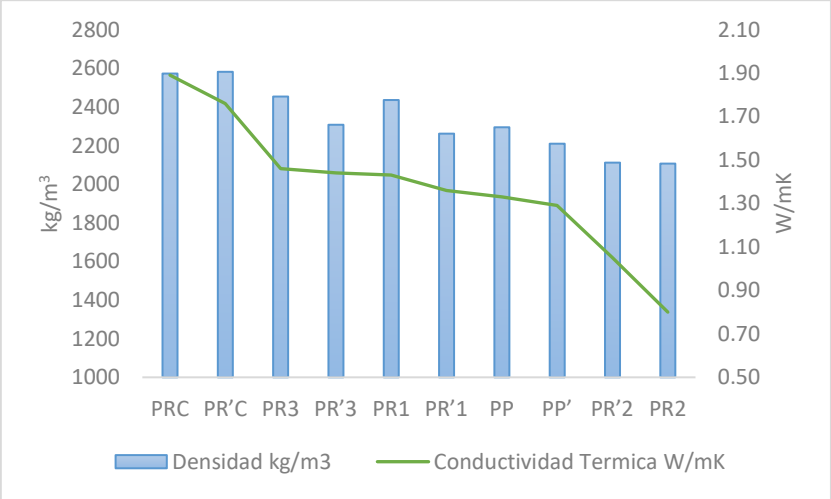


Fig. 4.34: Resultados de las densidades y conductividades térmicas de las dos etapas de ensayos de la Serie Estructural.

Existe una relación directa entre la resistencia a la compresión y la densidad de los hormigones con agregados plásticos. Al disminuir la densidad disminuye la resistencia a compresión de los mismos. El gráfico de la Figura 4.34, muestra la evolución de las densidades de las series estructurales de la primera y segunda etapa de ensayos. La probeta con mayor descenso de la densidad es la PR_2 que se redujo un 18% con respecto a la probeta de control PR_C, la misma tendencia se presenta en la conductividad térmica con un 58 % menos respecto a PR_C. El porcentaje de reemplazo de agregado fino por plástico es de 11 % y de 13 % de agregado grueso. Si ordenamos de mayor a menor el descenso de la densidad con respecto a la probeta de control estos serían PR'_2, PP', PP, PR'_1, PR_1, PR'_3 y PR_3; las cuales dieron una reducción del 44 % de la densidad respecto a PR_C y 17 % de conductividad térmica menos que PR_C, PP' 32 % y 14 %, PP 30 % y 11 %, PR'_1 28 % y 12 %, PR_1 24 % y 5 %, PR'_3 23 % y 10 %, PR_3 22 % y 5 %, respectivamente.

Se puede deducir como la disminución de la densidad es prácticamente lineal, siendo el porcentaje de reducción del peso del hormigón de 2,3 % aproximadamente por cada 10% de agregado plástico que se incorpora en

reemplazo de agregados gruesos y finos. Estos porcentajes de reducción coinciden con los estudios realizados por Sánchez (2015) y Siddique (2008).

En las Tablas 4.27 y 4.28 están los resultados de los ensayos de tracción por compresión diametral y módulo de elasticidad de las series estructural.

Tabla 4.27: Ensayos de tracción por compresión diametral y módulo de elasticidad de la primera etapa de la serie estructural.

Probetas	*T* a los 28 días [Kg/cm^2]	E [GPa]
PR'$_C$	19,43	8,6
PR'$_1$	11,65	6,1
PR'$_2$	7,12	2,2
PR'$_3$	9,71	5,6
PP'	6,47	7,8

Tabla 4.28: Ensayos de tracción por compresión diametral y módulo de elasticidad de la segunda etapa de serie estructural.

Probetas	*T* a los 28 días [Kg/cm^2]	E [GPa]
PR$_C$	29,43	38,6
PR$_1$	27,65	35,1
PR$_2$	17,12	15,2
PR$_3$	25,71	35,6
PP	26,47	37,8

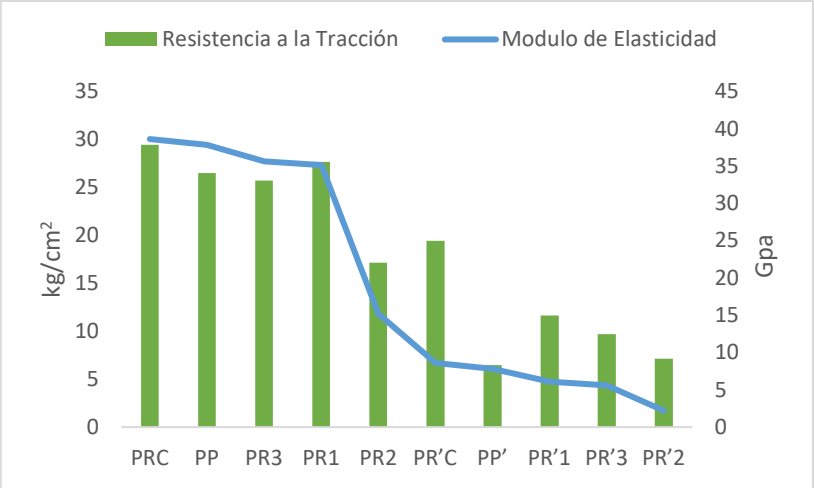


Fig. 4.35: Resultados de las dos etapas de ensayos de Tracción y Elasticidad de la Serie Estructural.

Si bien el hormigón está diseñado para resistir especialmente demanda de compresión su falla inicia por fisuras de tracción. El grafico de la Figura 4.35 detalla el compartimiento de las dos etapas de ensayo tanto de resistencia a la tracción por compresión diametral, como también el módulo de elasticidad de la Serie Estructural, el grafico esta ordenado de la probeta con mayor módulo de elasticidad PR_C hasta la de menor que es PR'_2. Como podemos notar en la Figura 4.35 el descenso casi también se repitió para la resistencia a la tracción, donde la que mayor valor dio es la probeta PR_1 con 27,61 kg/cm^2, seguida por las probetas PP y PR_3 con 26,47 kg/cm^2 y 25,71 kg/cm^2 respectivamente. La probeta con menor valor fue PP' con 6,47 kg/cm^2 de resistencia a la tracción. Es importante mencionar que el módulo de elasticidad está fuertemente influenciado por la cantidad y las características físicas y mecánicas de los agregados livianos que se incorporan a la mezcla. Esta influencia se puede observar en las Figuras 4.35, donde a mayor porcentaje de agregado plástico el módulo de elasticidad disminuye.

4.14.2 Ensayo estado endurecido de Serie Mampostería.

En este inciso se presentan los resultados de la resistencia a la compresión axial obtenidos para las edades de 7 y 28 días de los hormigones de la primera serie mampostería. Los resultados obtenidos se presentan en la Tabla 4.29. También se detallan el cálculo de la conductividad térmica de las probetas.

Tabla 4.29: Resultados de los ensayos en las probetas de la serie mampostería.

Probetas	Rc [Kg/cm^2] a los 7 días	Rc [Kg/cm^2] a los 28 días	Cond. Térmica *k* [W/mK]	Densidad [Kg/m^3]
MEN	11,20	14,00	0,37	707
MEP$_1$	11,00	15,40	0,41	861
MEP$_2$	12,60	15,68	0,43	938
MEP$_3$	38,8	50,19	0,46	958
ME	11,20	16,80	0,42	916
MEC	128	180	1,35	1025

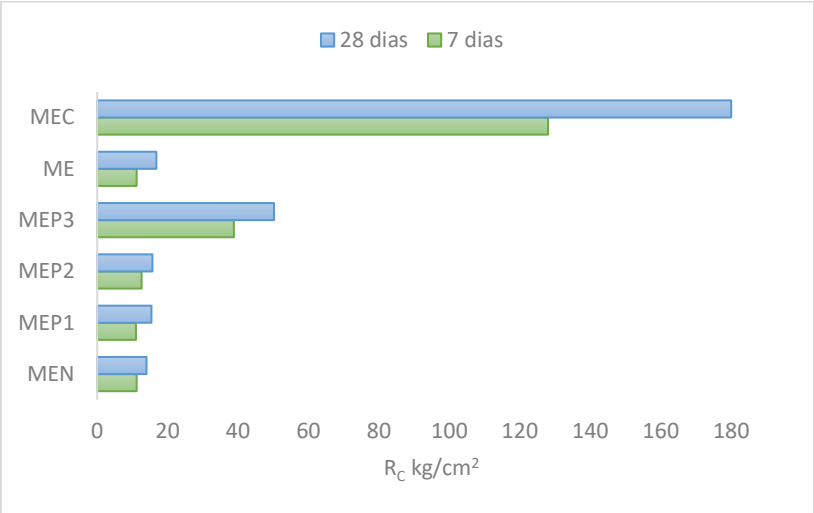


Fig. 4.36: Resultados de la resistencia a la compresion de la Serie de Mamposteria.

Tanto la Tabla 4.29 y la Figura 4.36 muestran los resultados de los ensayos a la resistencia a la compresión de la Serie de Mamposteria, donde se partio de la probeta de control MEN para ir aumentando la resistencia a la compresión para llegar a la minima propuesta por CIRSOC 202. La probeta MEP$_3$ es la de mas alto valor con 50,19 kg/cm^2, esta probeta tiene relacion de a/c= 0,42, 20 % mas de agregado EPS, 30 % mas de agregado fino y 66 kg de plastico por m^3 de mezlca que la probeta MEN. Luego viene la probeta ME con 16,8 kg/cm^2, 19% mas de agregado fino que MEN y 94 kg por m^3 de mezcla de desechos de neumaticos. MEP$_2$ con 15,68 kg/cm^2, 20 % menos de EPS, 71 kg mas de agregado de desechos plasticos que MEP$_1$, su relacion a/c es 0,4. Finalmente MEP$_1$ con 15,4 kg/cm^2 tiene la misma cantidad de EPS que MEN, 66 kg mas de cemento, 19 % mas de agregado fino y 23 kg de plastico por m^3 de mezcla.

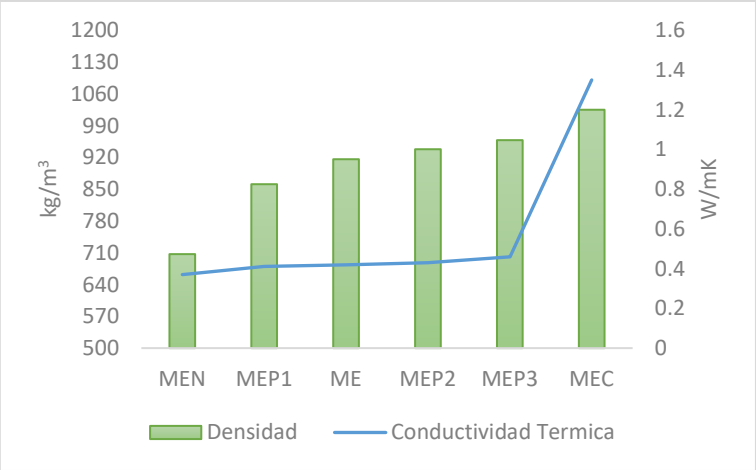


Fig. 4.37: Resultados de las densidades y la conductividad termica de la Serie de Mamposteria.

En el grafico de la Figura 4.37 se ordeno de menor a mayor las densidades de las probets perteneciente a la Serie de Mamposteria, podemos notar como la conductividad termica fue aumentando proporcionalmente con la densidad. La probeta de control MEN con EPS es la de menor conductividad termica y densidad, pero de baja resistencia a la compresion, se fue agregando desechos plasticos y EPS y tambien agregados finos lo que proporciono un aumento en la densidad y la conductividad, pero gracias a esto se logro aumentar la resistencia a la compresion. La probeta de control MEC cuya mezcla no presenta EPS ni ningun otro agrgado de desecho, es la de mayor densidad y tambien la de mayor conductivdad termica. Se partio desde las probetas de control MEN y MEC para lograr un valor intermedio bajo de conductividad termica y buena resistencia a la compresion. La Probeta MEP_3 es la que mejor resultado dio entre estas dos propiedades siguiendo como base las probetas de control. Esta probeta presento reducciones del 7 % en la densidad y un 67 % en la conductividad termica respecto a probeta de control MEC. Tambien se logro aumentar la resistencia a la compresion en un 226 % respecto a la probeta control MEN.

a)  b) 

Fig. 4.38: a) probetas de desechos plasticos y b) de caucho luego del ensayo.

En la Figura 4.38 se muestra como quedaron las probetas MEP_1 y MEN luego del ensayo de compresión axial. Con este ensayo se pudo notar la buena adhesión de los agregados y como ante compresión se comportan de manera excelente las mezclas (esto es positivo ante sismos ya que el material no presenta grietas continuas). En la Figura 4.39 se muestra el llenado de los moldes cilíndricos y de conductividad térmica. De acuerdo a la dosificación calculada el día de ensayo, se logró llenar 6 probetas cilíndricas de 10 cm de diámetro x 20 cm de alto, dos probetas de 30 cm de alto x 30 cm de ancho y 4 cm de espesor. También dos probetas prismáticas de 16 cm de largo x 4 cm de alto y 4 cm de espesor.



Fig. 4.39: Moldes de acero y arriba moldes para la conductividad térmica de la serie mampostería.

En la Figura 4.40 se detallan las curvas obtenidas de las mediciones de la conductividad térmica de las probetas MEP_3 y MEC. En el gráfico de este ensayo se muestra como el ΔT (Temperatura cara caliente – Temperatura cara fría) de MEP_3 en el estado estacionario es de 37 ºC a los 162 minutos de prendido el aparato, mientras que el ΔT de la probeta de control MEC es de 13 ºC a los 120 minutos en el estado estacionario. Esta tendencia se vio en los materiales de alta conductividad térmica donde los ΔT eran menores a los 15 ºC y los ΔT mayores a 35 ºC en las probetas de baja conductividad térmica.

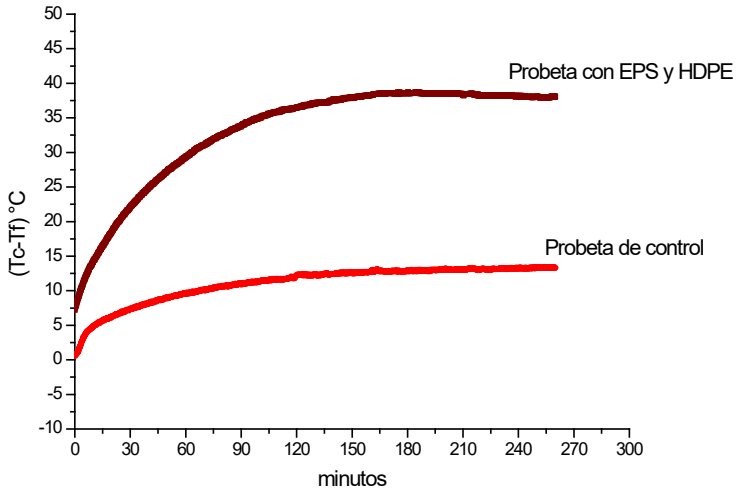


Fig. 4.40: Curvas de Δ T producto del ensayo de conductividad térmica de las probetas MEP_3 y MEC.

4.14.3 Ensayo en estado endurecido de la serie hormigón celular.

Tenemos en la Tabla 4.30 los resultados de los ensayos a los 28 días de compresión axial, conductividad térmica y densidad de la Serie Hormigón Celular.

Tabla 4.30: Resultados de los ensayos para la serie hormigón celular.

Probetas	Rc [Kg/cm^2] a los 28 días	Cond. Térmica *k* [W/mK]	Densidad [Kg/m^3]
HC_1	5,60	0,45	1100
HC_2	28,01	0,63	1359
HC_3	4,20	0,38	1051

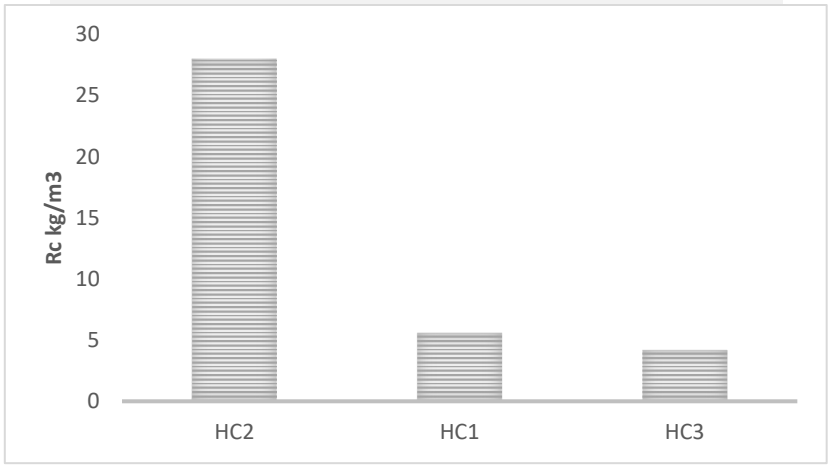


Fig. 4.41: Resultados de la resistencia a la compresion de la Serie de Hormigon Celular.

Si mostramos los resultados de la resistencia a la compresion en un grafico como el de la Figura 4.41, notaremos la gran diferencia que hay entre la probeta HC_2 que tuvo 28 kg/cm^2 y las otras dos probetas HC_1 y HC_3 con 5,6 kg/cm^2 y 4,2 kg/cm^2 respectivamente. Esto se debe principalmente a la mejora en la pistola generadora de aire, ya que se logro una consistencia homogenea y firme en el espumante.

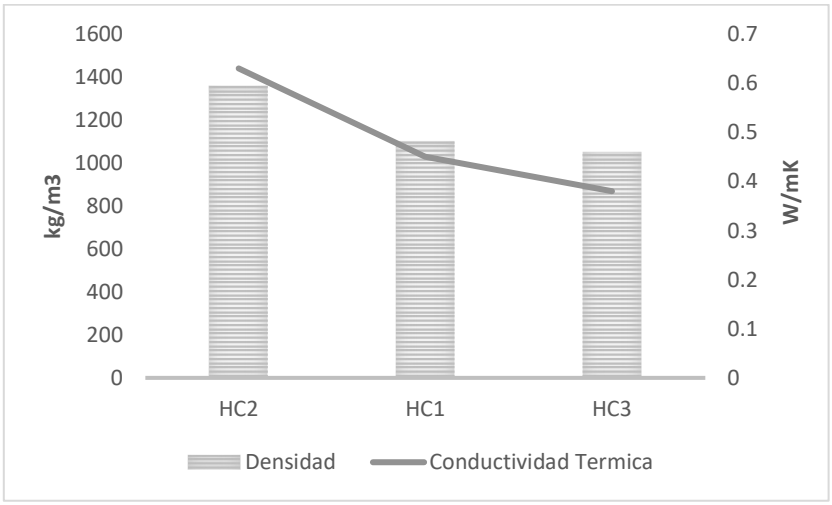


Fig. 4.42: Densidades y conductividades termicas de la Serie de Hormigon Celular.

En cuanto a las densidades de esta serie las mismas no superaron los 1400 kg/m^3 (Figura 4.42), siendo el de menor densidad la probeta HC_3 con 1051 kg/m^3 y la de mayor HC_2 con 1359 kg/m^3. La tendencia de la conductividad termica es la misma que las anteriores series, conforme fue bajando la densidad bajo la conductividad termica. La de mayor conductividad fue HC_2 con 0,63 W/mK, seguidas por HC_1 con un 29 % menos que probeta HC_2 y HC_3 con un 40% menos de conductividad termica que HC_2.

a)  b) 

Fig. 4.43: a) Probeta antes del ensayo y b) luego del ensayo de compresión de la serie hormigón celular.

En la Figura 4.43 podemos notar los poros de aire del hormigón celular. Los ensayos de compresión y conductividad mostraron resultados muy optimistas con respecto a la utilización de este tipo de hormigón. Ya sea por su baja conductividad como por su buena resistencia a la compresión. La probeta que contiene NTU no tuvo buena resistencia a la compresión ya que estuvo predispuesta por la cantidad de agua y bajo agregado espumante. Mientras que la probeta HC_3 dio buena resistencia y baja conductividad también.

4.14.4 Ensayo en estado endurecido de la Serie de Baldosas.

Finalmente tenemos la Serie de Baldosas, los resultados de los ensayos de Resistencia a la flexión, conductividad térmica, absorción y densidad se muestran en Tabla 4.31. se realizaron tres diferentes dosificaciones de esta serie. De acuerdo a los resultados de absorción de las tres probetas B_1, B_2 y B_3 todas fueron menores al 10 % con lo cual cumplen con la norma IRAM 1522.

Tabla 4.31: Resultados de los ensayos sobre la Serie de Baldosas.

Probeta	R_f [daN/cm^2]	Cond. Térmi. K [W/mK]	Densidad [Kg/m^3]	Absorción [%]
B_1	9,68	1,2	1137	6,7
B_2	7,64	0,72	1081	7,4
B_3	5,7	0,63	975	7

En la Figura 4.44 vemos como se realiza el ensayo de resistencia a la flexión de la probeta perteneciente a la Serie de Baldosa, esta pertenece a la probeta B_2 el cual dio un valor de 7,64 daN/cm^2 lo cual supera a los 5 daN/cm^2 establecidos por la norma IRAM 1522. La probeta B_3 dio 5,7 daN/cm^2 que también paso lo mínimo establecido por norma y finalmente la probeta de control B_1 que fue el valor más alto con 9,68 daN/cm^2.



Fig. 4.44: Ensayo de la resistencia a la flexión para la Serie de Baldosas.

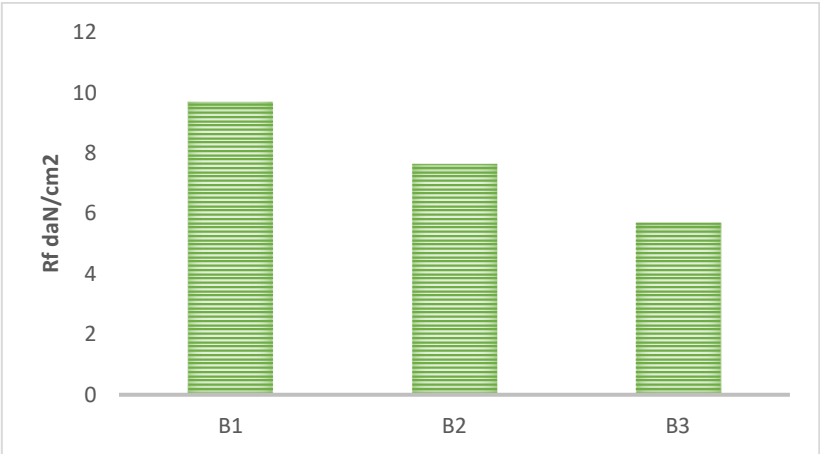


Fig. 4.45: Resultados de la resistencia a la flexión de la Serie de Baldosas.

En el grafico de la Figura 4.45 se muestra los resultados de la resistencia a la flexion, estan ordenados de mayor a menor siendo B_1 la probeta de control. B_2 tiene 9,5 % menos de agregado fino y grueso que la probeta de control,

mientras que B_3 un 12 % menos. En la Figura 4.46 se observan las probetas B_2 y B_3 luego del ensayo de resistencia a la flexion, arriba wn la foto esta la probeta B_3 y notamos como no se pudo distribuir bien el EPS dando como resultado el menor valor R_f.



Fig. 4.46: Probetas B_3 y B_2 luego del ensayo de resistencia a la flexión.

Los resultados de los ensayos de densidad y conductividad térmica fueron satisfactorios, como muestra Figura 4.47, se redujo la densidad y por consecuencia la conductividad térmica de la probeta de control B_1. La probeta B_2 obtuvo un 40 % menos de conductividad térmica y un 9 % menos de densidad, mientras que la probeta B_3 presento un 47 % menos de conductividad térmica y un 14% menos de densidad.

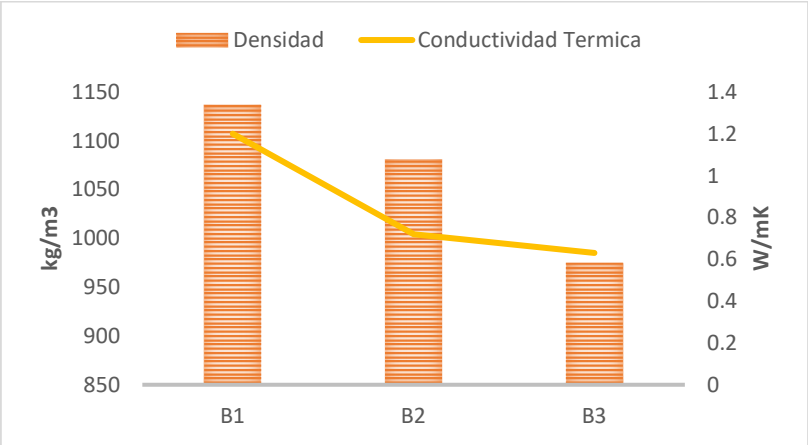


Fig. 4.47: Resultados de la densidad y la conductividad térmica de la Serie de Baldosas.

Para el ensayo de choque se utilizó una caja de 60 cm x 60 cm y 20 cm de alto, con 10 cm de alto lleno de arena mediana, Figura 4.48. Se largo la esfera de 650 gramos de hierro desde diferentes alturas hasta obtener la ruptura de las baldosas. Las dimensiones de las baldosas ensayadas son de 30 cm x 30 cm x 2 cm de espesor.

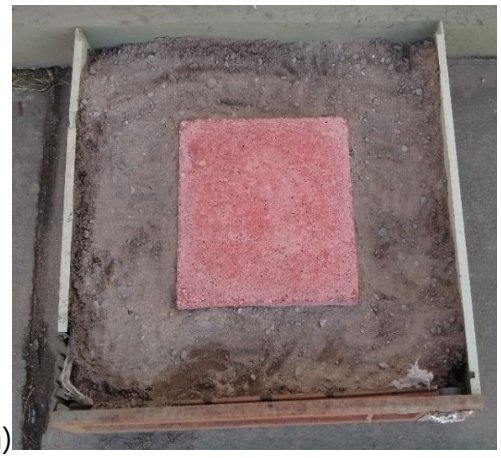
a)  b) 

Fig. 4.48: a) Caja de arena y b) Esfera de hierro para ensayo de choque.

Se largo la esfera desde 9 diferentes alturas comenzando desde los 30 cm hasta los 250 cm donde ambas baldosas se rompieron, Figura 4.49. Mediante el análisis de la Figura 4.49 podemos notar la diferencia en las grietas de las baldosas, ya que la baldosa B_2 no presento una grieta continua ante el impacto final de choque, mientras que en la baldosa B_1 la grieta fue continua y llego abarcar todo el largo de la baldosa, Figura 4.50. Esto se debe a los agregados de desechos plásticos y de EPS que fueron amortiguando al choque de la esfera de hierro.



Fig. 4.49: A la izquierda tenemos la probeta B_2 y a la derecha la probeta B_1.



Fig. 4.50: Grietas producto del ensayo de choque en las baldosas.

4.15 Ladrillo Puma Punku

De acuerdo a los resultados de los ensayos en la Serie de Mampostería, el siguiente paso fue desarrollar un ladrillo. Este tiene el nombre de Puma Punku en honor a su forma. En la Figura 4.51 se detallan las dimensiones del ladrillo en centímetros.

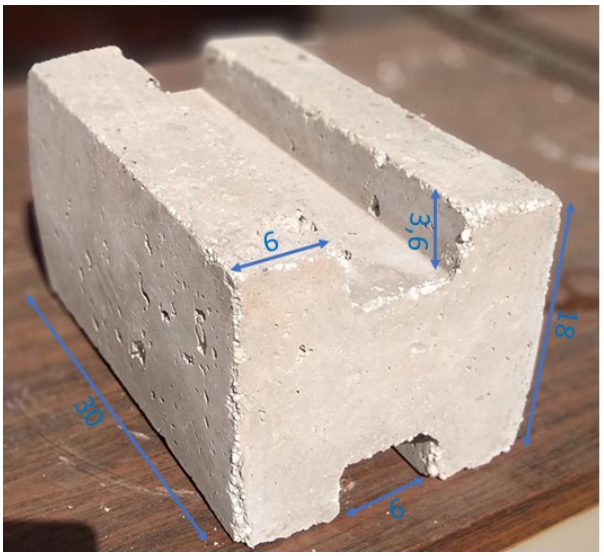


Fig. 4.51: Dimensiones del ladrillo Puma Punku.

Para el llenado y armado del ladrillo se realizaron moldes de chapa acerada. En la Figura 4.52 podemos ver como es el proceso de llenado de los moldes, es por medio de compactación. El llenado es bastante sencillo y solo se necesitó una cuchara de albañil y una barra acerada para ir compactando la mezcla.



Fig. 4.52: Llenado de los moldes para los ladrillos Puma Punku.

En la Figura 4.53 se muestra un corte de una las partes del ladrillo Puma Punku. El corte fue realizado con una amoladora y no presento ninguna dificultad. Podemos ver en la figura la buena distribución de los agregados.

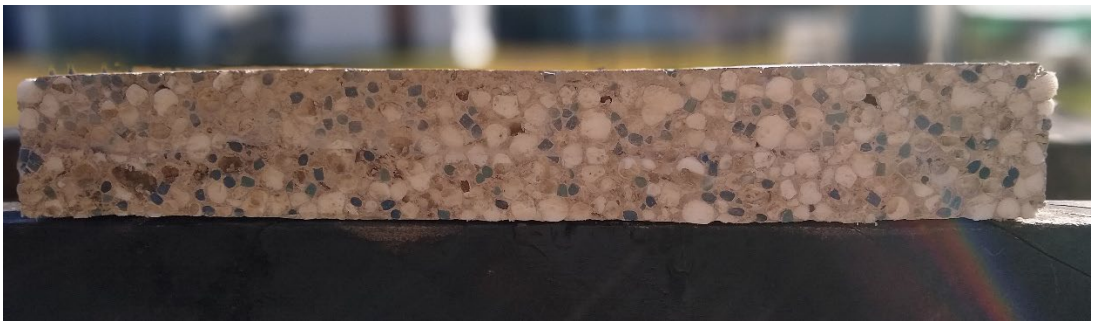


Fig. 4.53: Corte de una de las partes del ladrillo Puma Punku.

Un ensayo que se realizó bien termino el tiempo de curado de los ladrillos, fue el de flotación, podemos ver en la Figura 4.54 como los ladrillos son sumergidos en un tacho de 80 litros de agua. Podemos notar como un 10 % de los ladrillos está flotando. También se muestra cómo se apilaron varios ladrillos para el regado con agua durante una semana (curado de los ladrillos).

a)  b) 

Fig. 4.54: a) Ensayo de flotación y b) Apilado para curado de los ladrillos Puma Punku.

El ladrillo Puma Punku puede ser utilizado en viviendas de hasta dos pisos de alto, ya que tienen una buena resistencia a la compresion, como tambien en las envolventes de las viviendas sociales por su baja conductividad termica y asi aportar al ahorro eneregetico. La configuracion del ladrillo estuvo pensada tambien para la introduccion de material de cambio de fase, esto se vera en el siguiente capitulo de esta tesis.

4.15.1 Ladrillo Punku

Aprovechando los buenos resultados de la dosificacion de la Serie de Mampostería, se desarrollo otro tipo de ladrillo llamado Punku. Se utilizo la dosificacion MEP_3 para su desarrollo. En la Figura 4.55 se muestran las dimensiones del ladrillo Punku y el ladrillo macizo de arcilla.

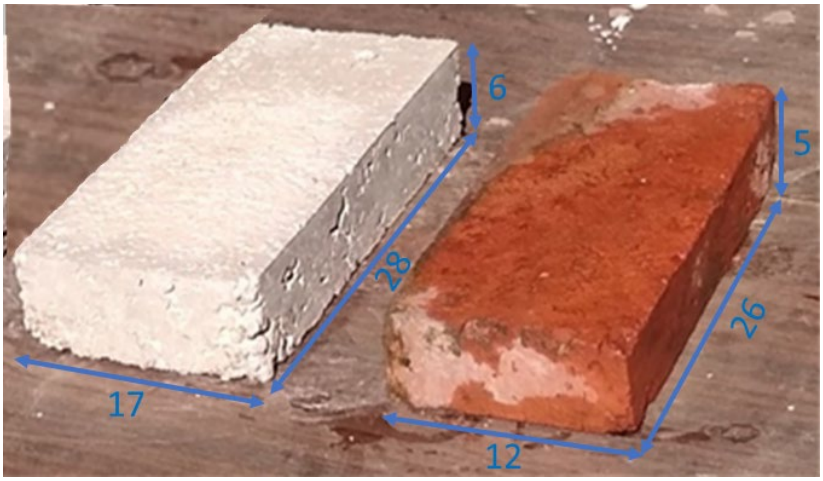


Fig. 4.55: A la izquierda ladrillo Punku y a la derecha ladrillo macizo.

Estos ladrillos por su buena resistencia a la compresión y su baja conductividad térmica, pueden ser utilizados en las envolventes o tabiques interiores de las viviendas. Como así también en medianeras.

4.15.2 Resistencia Termica

Aplicando la norma IRAM 11.601 se procedió al cálculo de la resistencia térmica. En la Figura 4.56 se detalla el esquema del ladrillo usado para el cálculo. Las dimensiones de cada parte del ladrillo se detallaron en la Figura 4.51 y son las que se utilizan en los cálculos. Primero se divide en tres partes el ladrillo, en la Figura 4.56 de color azul claro la parte superior (denominada con el subíndice 1), la parte del medio de color amarrillo (denominada con el subíndice 2), y finalmente la parte inferior de color azul claro también (denominada con el subíndice 3), ya que coincide con la parte superior.

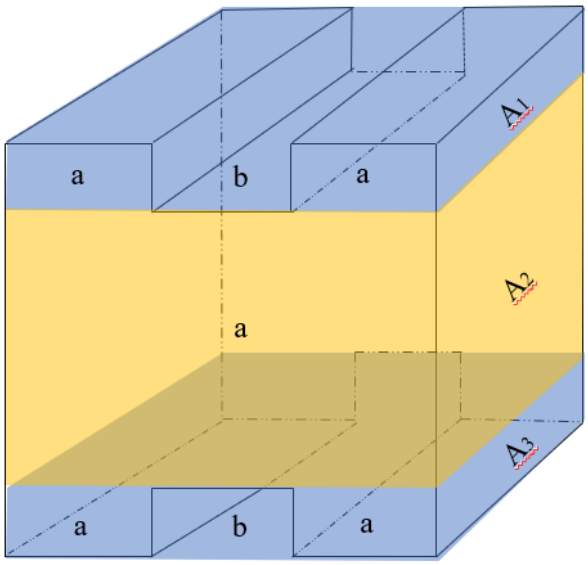


Fig. 4.56: Esquema utilizado para el cálculo de la resistencia térmica del ladrillo.

La Ecuación (4.16) hace referencia a la resistencia térmica de la parte superior:

$$R_1 = 2\frac{e_a}{K_a} + \frac{e_b}{K_b} \tag{4.16}$$

Donde:
R_1=resistencia térmica de la parte superior [m^2 K/W]
e_a=espesor sección superior "a" [m]
K_a=conductividad térmica del material de la sección superior "a" [W/mK]
e_b=espesor sección superior "b" [m]
K_b=conductividad térmica del material de la sección superior "b" [W/mK]

Lo siguiente es la resistencia térmica de la parte del medio, para ello se aplica Ecuación (4.17):

$$R_2 = \frac{e}{K} \tag{4.17}$$

Donde:
R_2=resistencia térmica de la parte media [m^2 K/W]
e=espesor sección media [m]
K=conductividad térmica del material de la sección media [W/mK]

Finalmente, la resistencia térmica de la parte inferior del ladrillo se calcula con la Ecuación (4.18):

$$R_3 = 2\,\frac{e_a}{K_a} + \frac{e_b}{K_b} \tag{4.18}$$

Donde:
R_3=resistencia térmica de la parte inferior [m^2 K/W]
e_a=espesor sección inferior "a" [m]
K_a=conductividad térmica del material de la sección inferior "a" [W/mK]
e_b=espesor sección inferior "b" [m]
K_b=conductividad térmica del material de la sección inferior "b" [W/mK]

Finalmente expresamos la ecuación final para la resistencia térmica efectiva del ladrillo. Las resistencias de las Ecuaciones (4.16) a (4.18) están en paralelo, por lo tanto, la ecuación de la resistencia térmica del ladrillo nos queda como ecuación (4.19):

$$R_T = A_T \left(\frac{A_1}{R_1} + \frac{A_2}{R_2} + \frac{A_3}{R_3}\right)^{-1} \tag{4.19}$$

Donde:
$R_{T,PP}$=resistencia térmica del ladrillo Puma Punku [m^{2}K/W]
A_T=$(A_1 + A_2 + A_3)$ [m^2]

En la Tabla 5 se presentan los valores de las variables intervinientes en las Ecuaciones (4.16), (4.17) y (4.18):

Tabla 4.32: Valores de las propiedades de cada sección del ladrillo Puma Punku.

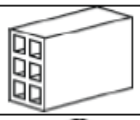
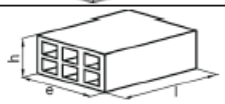
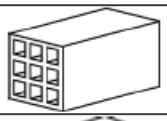
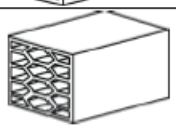
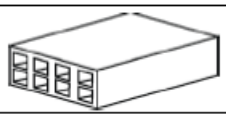
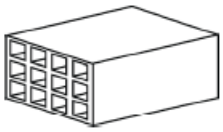
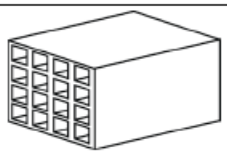
	Sección superior	Sección media	Sección inferior
Espesor [m]	e_a=0,06; e_b=0,06	e=0,18	e_a=0,06; e_b=0,06
Conductividad Térmica [W/mK]	K_a= 0,46 K_b= 0,02	K=0,46	K_a=0,46 K_b=0,02
Área [m^2]	A_1= 0,0108	A_2=0,0324	A_3=0,0108

Reemplazando los valores de la Tabla 4.32 en la Ecuación (4.19), la resistencia térmica del ladrillo Puma Punku ($R_{T,PP}$) nos da 0,60 m^{2}K/W. Algunos de

los valores de resistencias térmicas sacados de la norma IRAM 11.601 son: para mampostería de ladrillos y bloques cerámicos usados comúnmente en las viviendas, van desde 0,21 m^2K/W a los 0,50 m^2K/W. Para mamposterías de ladrillos y bloques de hormigón usados comúnmente en las viviendas, van desde 0,17 m^2K/W a los 0,31 m^2K/W. Por ende, el ladrillo Puma Punku tiene una resistencia térmica superior a la de los ladrillos y bloques convencionales.

Para el cálculo de la resistencia térmica del ladrillo Punku, utilizamos las dimensiones provistas en la Figura 4.55 y la Ecuación (4.17). reemplazando los valores nos da $R_{T,P}$=0,37 m^2K/W. Si vemos la Tabla 4.33, notamos que la resistencia térmica del ladrillo Punku es mayor que la mayoría de los ladrillos huecos de cerámicos y también mayor que las mamposterías de ladrillos y bloques de hormigón usados comúnmente en las viviendas. El ladrillo Punku puede ser utilizado como una alternativa en la mampostería de la envolvente e interior de las viviendas.

Tabla 4.33: Resistencia térmica de mampostería de ladrillos y bloques cerámicos

Esquema	Medidas (cm)			Masa (*)	R_t
	e	h	l	kg/m²	m²·K/W
	8,0	15,0	25,0	69	0,21
	8,0	18,0	25,0	69	0,23
	18,0	8,0	25,0	168	0,35
	20,0	18,0	40,0	142	0,33
	12,0	18,0	25,0/33,0	96	0,36
	15,0	18,0	33,0	106	0,40
	18,0	18,0	25,0/33,0	125	0,41
	18,0	18,0	40,0	155	0,31
	20,0	18,0	40,0	162	0,32
	13,0	18,0	25,0	104	0,37
	18,0	8,0	25,0	170	0,47
	18,0	8,0	25,0	125	0,34
	20,0	12,0	25,0	150	0,48
	20,0	18,0	25,0/33,0	144	0,50
	18,0	18,0	25,0/33,0	136	0,47

(*) Corresponde a la masa por unidad de área de la mampostería que integran.

4.15.3 Calor Especifico del ladrillo PumaPunku

La determinación del calor específico de los materiales constituye uno de los fines primordiales de la calorimetría. El procedimiento más habitual para medir calores específicos consiste en sumergir una cantidad del cuerpo sometido a medición en un baño de agua de temperatura conocida. Suponiendo que el sistema está aislado, cuando se alcance el equilibrio térmico se cumplirá que el calor cedido por el cuerpo será igual al absorbido por el agua, o a la inversa.

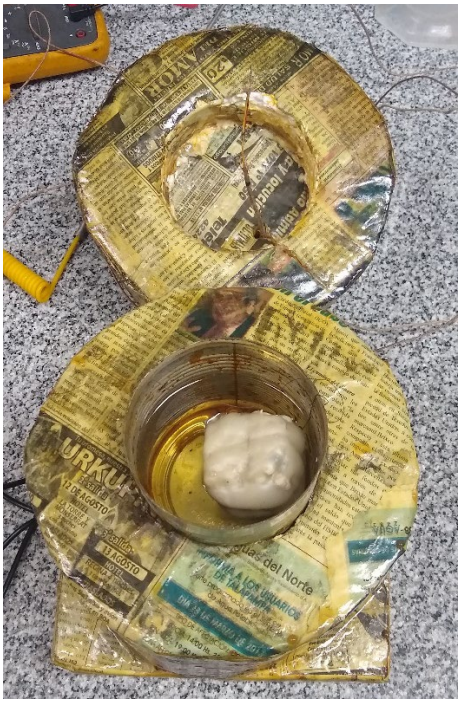


Fig. 4.57: Muestra del ladrillo colocada en el aparato de Calorimetría.

Para que se cumpla la suposición de que el sistema este aislado térmicamente, se construyó un aparato (Figura 4.57) cuyas paredes son de poliestireno expandido. En su interior tiene un recipiente, donde se coloca el agua y la muestra a medir. Al sumergir la muestra en agua de temperatura conocida, se alcanza el equilibrio térmico, el calor cedido por muestra del ladrillo es igual al absorbido por el agua.

El aparato cuenta con termocuplas tipo K que están conectadas a la muestra y al agua. Los datos son adquiridos en un Datalogger NOVUS y luego analizados (Figura 4.58).

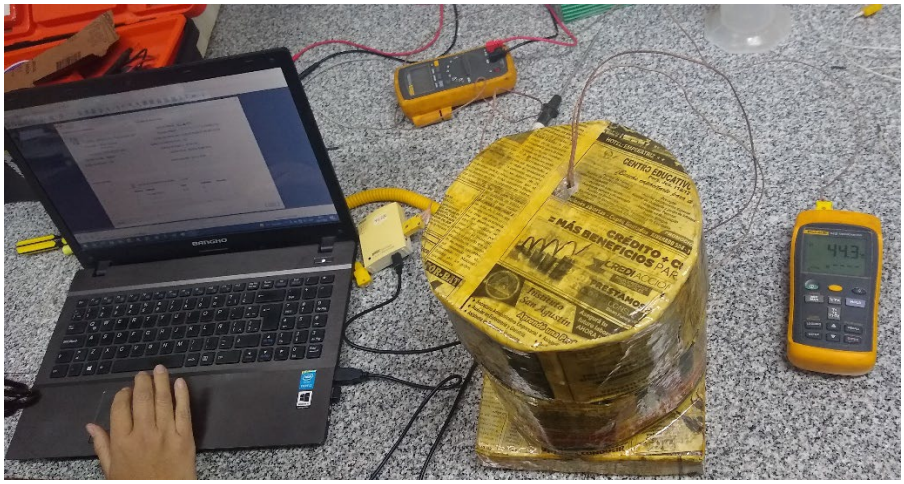


Fig. 4.58: Sistema de adquisición de datos para la Calorimetría.

Se analizo solo la muestra del material que está constituido el ladrillo PumaPunku. Se corto una muestra del ladrillo (Figura 4.59) y se la sumergió en una parafina de propiedades químicas y físicas conocidas (Figura 4.57). esto se hizo para evitar que entre agua a la muestra del ladrillo. Los resultados dieron que el Calor Especifico C_p de la muestra es igual a 850 J/kg °C.



Fig. 4.59: Pesaje de la muestra del ladrillo PumaPunku.

4.17 Conclusiones del capitulo

En este capítulo se partió de la necesidad ante dos grandes problemas, el primero es hacer algo con las toneladas de plásticos que tiran en el vertedero de nuestra ciudad y segundo aportar al ahorro energético del alto consumo de las viviendas sociales.

Se realizaron cuatro series de diferentes dosificaciones. Cada serie estuvo enfocada en un objetivo, por ejemplo: en la Serie de Hormigón Estructural, los objetivos principales eran encontrar una dosificación agregando desechos de polietileno de alta (PEAD) y baja densidad (PEBD), que superen la resistencia a la compresión mínima impuesta por la norma CIRSOC 202 para hormigón estructural y, el otro, que tenga baja conductividad térmica. Los objetivos secundarios, pero no menos importantes de la Serie de Hormigón Estructural eran que el hormigón obtenido tenga baja velocidad de exudación, buena resistencia a la tracción y un módulo de elasticidad aceptable. Tres dosificaciones cumplieron con todos estos objetivos y ellas fueron; PR_1, PP y PR_3. La probeta PP tiene finos de perlita (10 % reemplazo por agregado fino) y desechos de PEBD (8 % reemplazo por agregados gruesos) en su dosificación. PR_3 tiene 7 % de reemplazo de agregado fino por desechos de PEAD y finalmente PR_1 tiene 7 % de reemplazo de agregado grueso por desechos de PEBD.

La segunda serie es la Serie de Mampostería, cuyo objetivo era encontrar una dosificación para el desarrollo de ladrillos sustentables. Partiendo de una dosificación de control, se realizaron cuatro más con agregados reciclados de PEAD, PEBD, EPS y NTU. Estas dosificaciones estuvieron sujetas bajo normas de ensayos en estado fresco y en estado endurecido. La dosificación que cumplió con las normas fue la MEP_3, esta dio una resistencia a la compresión axial de 50 kg/cm^2, 0,46 W/mK de conductividad térmica y 958 kg/m^3 de densidad (en consecuencia, flotan). Lo siguiente fue desarrollar dos tipos de ladrillos usando la dosificación MEP_3, uno llamado Puma Punku en forma de “H” de 30 cm x 18 cm x 18 cm y otro llamado Punku de forma rectangular de 28 cm x 18 cm x 6 cm. Estos ladrillos por sus propiedades térmicas y edilicias, pueden ser usados en viviendas de hasta dos pisos. Además, son de sencilla fabricación y sus agregados se encuentran en el mercado local. La resistencia térmica del ladrillo Puma Punku

($R_{T,PP}$) nos da 0,60 m^2K/W. Algunos de los valores de resistencias térmicas sacados de la norma IRAM 11.601 son: para mampostería de ladrillos y bloques cerámicos usados comúnmente en las viviendas, van desde 0,21 m^2K/W a los 0,50 m^2K/W. Otra propiedad de importancia es el calor especifico, el mismo dio 850 J/kg °C para la probeta MEP_3.

Para mamposterías de ladrillos y bloques de hormigón usados comúnmente en las viviendas, van desde 0,17 m^2K/W a los 0,31 m^2K/W. La resistencia térmica del ladrillo Punku ($R_{T,P}$) resulto de orden de los 0,37 m^2K/W. Por ende, el ladrillo Puma Punku y el ladrillo Punku tienen una resistencia térmica superior a la de los ladrillos y bloques convencionales.

La tercera serie es la Serie de Hormigón Celular, aquí el objetivo fue desarrollar un hormigón liviano con agregados de Neumáticos Triturados Usados (NTU). Para ello se realizaron tres dosificaciones diferentes, se utilizó un espumante de bajo costo y abundante en el mercado local y se fabricó una pistola casera generadora de aire. La probeta que obtuvo mejores resultados fue HC_2, esta probeta dio 28 kg/cm^2 de resistencia a la compresión, 0,63 W/mK de conductividad térmica y 1359 kg/m^3 de densidad. El objetivo a futuro para esta Serie es desarrollar una dosificación con más resistencia a la compresión y menos densidad.

La última serie es la Serie de Baldosas, aquí como lo dice su nombre el objetivo era desarrollar baldosas de baja conductividad térmica y buena resistencia a la flexión. Para ello se utilizaron agregados reciclados de EPS y HDPE. Para darle un color firme a toda la mezcla se le agrego un pigmento rojo (ferrite rojo). Se realizaron tres dosificaciones diferentes, las mismas estuvieron bajo ensayos de resistencia a la flexión, ensayo de choque, absorción y conductividad térmica. Las probetas que cumplieron con todos los ensayos fueron B_2 y B_3, siendo B_2 la que mejor comportamiento tuvo, teniendo 7,64 daN/cm^2 de resistencia a la flexión, 0,72 W/mK de conductividad térmica, 7,4 % de absorción y 1100 kg/m^3 de densidad. En el ensayo de choque las baldosas de agrietaron cuando se les arrojo de una altura de 2,5 metros, una esfera de hierro de 650 gramos. Las dimensiones de las baldosas rojas son de 30 cm x 30 cm x 2 cm. El

ferrite rojo usado como pigmento de color en las mezclas se lo puede cambiar por otra gama de colores, ya sea azul, amarillo, etc.

Capítulo 5

COLECTOR SOLAR CALENTADOR DE AIRE CON MATRIZ POROSA CON TRATAMIENTO SELECTIVO ADAPTABLE A LA VIVIENDA DE INTERÉS SOCIAL TANTO ARQUITECTÓNICA COMO ECONÓMICAMENTE.

5.1 La Energía Renovable para Calefacción

La energía es considerada como un agente principal en la generación de riqueza y es un factor significativo en el desarrollo económico. En vista de las crecientes necesidades mundiales de energía y la preocupación por la degradación ambiental, la posibilidad de construir sistemas térmicos utilizando la energía solar, está recibiendo una atención fundamental en los últimos años. La energía solar es limpia y la más inagotable de todas las fuentes de energía conocidas. Es conveniente la utilización de la energía solar, en particular en las zonas en las que no existen redes de energías convencionales como ser electricidad o gas natural o donde sus costos asociados son relativamente altos (Hernández, 2018).

El calentamiento solar del aire ha despertado gran interés en la comunidad solarista, debido a que se trata de una aplicación de bajo costo, simple y requiere mínimo mantenimiento. A lo largo de los años, diversos prototipos de colectores fueron diseñados, modelados matemáticamente y ensayados experimentalmente. Hoy en día, existen muchas configuraciones de colectores solares calentadores de aire, diferenciadas por la manera en que circula el aire en su interior. Y en la forma y disposición del elemento de captación solar (placas planas, corrugadas, tubos cilíndricos, caños rectangulares, etc.).

En la actualidad, la energía renovable suministra aproximadamente el 9 % de la energía final utilizada para calefacción y refrigeración en edificios e industrias, la mayoría proviene de biomasa, con contribuciones menores de energía solar térmica y geotérmica. Aproximadamente las tres cuartas partes del consumo de la energía para calefacción se sustentan en combustibles fósiles (Ministerio de Energía, 2020).

5.2 Evaluación analítica de los parámetros de mayor influencia sobre la eficiencia de colección a fin de optimizar su diseño.

Básicamente, hay dos tipos de colectores solares: colectores solares de agua y colectores solares de aire. El éxito de las aplicaciones de energía solar está estrechamente relacionado con el rendimiento de los colectores. Para los colectores de agua, la transferencia térmica es admisible debido a que el agua es un buen conductor del calor. Sin embargo, para los colectores de aire solar, la transferencia de calor es baja. Su ritmo de desarrollo es lento en comparación con el colector de agua, debido a su baja eficiencia térmica. Esto se debe a las altas pérdidas de calor y al bajo coeficiente volumétrico de transferencia de calor convectivo entre la placa absorbente y la corriente de aire que fluye. Aunque, estos sistemas son baratos y fáciles de mantener.

Las mayores pérdidas de calor ocurren en la cubierta frontal, ya que los lados y la parte inferior del colector pueden ser aislados adecuadamente, mientras que la cara frontal debe estar expuesta a la radiación solar y a la temperatura ambiente. Los colectores de aire son ampliamente utilizados para aplicaciones de baja a moderada temperatura, como calefacción de espacios, secado de cultivos, sazonadores de madera y otras aplicaciones industriales.

Es ventajoso el uso de un fluido gaseoso como fluido caloportador frente a uno líquido, en sistemas de energía solar térmica. Ya que son aceptables pequeñas fugas en los circuitos de circulación, no ocurren cambios de fase en el rango de temperatura de operación y la corrosión no es un problema. Aunque los sistemas de aire implican menor capacidad volumétrica de calor y menores coeficientes de transferencia de calor. Los calentadores de aire solares normalmente forman parte de una serie de colectores solares integrados, la mayoría incorporando un tipo de circulación de aire de paso simple forzado con entrada de aire ambiente y descarga de aire caliente solar al espacio a calefaccionar (Hernández et al, 2018).

Visto de manera general, existen dos tipos diferentes de colectores de aire con diferentes características en sus diseños. Estos pueden ser: colectores de aire de

diseño convencional con una placa absorbedora plana ubicada abajo o sobre del flujo de fluido de trabajo y; colectores de aire con matriz porosa, donde el fluido de trabajo fluye a través de la matriz absorbente. Una revisión completa de ambos tipos está disponible en (Duffie y Beckman, 2006).

Se han hecho muchos intentos para mejorar el rendimiento térmico de los colectores de aire solares convencionales empleando diversas disposiciones de diseño y flujo. En este sentido se estudió la adición de superficies extendidas con grandes áreas expuestas al flujo de aire para lograr altas tasas de transferencia térmica. Los investigadores enfocaron sus estudios a la obtención de superficies absorbedoras de área extendida que resultaron efectivas para mejorar el factor de remoción de calor del colector "FR".

Los colectores de diseño convencional suelen presentar una placa de metal pintada de negro como material absorbedor de la radiación. Con el flujo de aire por debajo de la placa, recibiendo así el calor y transfiriéndolo al fluido por convección. Una amplia investigación fue hecha por (Kolb, 2017) sobre las deficiencias físicas y técnicas de los colectores calentadores de aire planos convencionales y los colectores con un elemento matricial como absorbedor.

Sin embargo, los colectores con una matriz como absorbedor, ofrecen grandes relaciones área de transferencia/volumen ocupado con altos coeficientes de transferencia de calor. Esto es consecuencia de los diámetros hidráulicos pequeños y, por lo tanto, de las altas tasas de transferencia de calor. Otra buena característica del absorbedor poroso es la menor disipación de energía térmica al medio ambiente debido a la absorción y la profundidad de penetración de la radiación solar. De este modo se reducen las temperaturas de funcionamiento del sistema, y por lo tanto las pérdidas de calor del colector, lo que da lugar a mayores eficiencias de colección solar. Una consecuencia del mejoramiento de este tipo es que va siempre acompañado por un aumento en la caída de presión, y por lo tanto de un requerimiento adicional en la potencia de forzador de flujo.

A fines de la década de los 80, (Hassab, 2011) comenzaron a analizar los efectos de los diversos parámetros de un colector de aire con matriz porosa. Ellos analizaron: el efecto de la tasa de flujo de aire y la dispersión del mismo, la variación del espesor óptico y la variación del espesor y la conductividad del aislante térmico del calentador de aire solar.

Un estudio (Chamoli et al., 2014) sobre el rendimiento térmico de colectores de aire de doble paso con matriz porosa informó que hay una mejora considerable en la eficiencia térmica cuando se utilizan materiales porosos. (Sopain et al., 2015) informó que la eficiencia de colectores solares con medios porosos es aproximadamente 10% mejor que sin medios porosos. También que la eficiencia típica de este tipo de colectores esta entre el 60-70%. El aumento de rendimiento de estos tipos de calentadores de aire depende de los parámetros geométricos de la malla de alambre (Singh. 2011).

Otra forma de mejorar el coeficiente de transferencia de calor por convección desde la placa de absorción al fluido puede hacerse mediante el aumento de la turbulencia del fluido. En este sentido, diversos estudios se hicieron con diferentes modificaciones en el conducto de flujo de aire, tales como la introducción de aletas, deflectores y rugosidad artificial en la placa absorbedora (Verma Ratna, 1991). Una revisión de la rugosidad artificial es presentada por muchos investigadores en (Gupta MK, 2009). Aunque la rugosidad artificial es un modo atractivo para mejorar la transferencia, no es económicamente factible a una gran escala de producción de calentadores de aire.

(Naphon et al., 2005) informó un aumento del 25,9% en la eficiencia térmica debido a la presencia de medios porosos. En este mismo trabajo y en el de [Ahmad et al., 1995] se reportó que la conductividad térmica de los medios porosos es la principal causa de esta mejora. Y ésta es una función de la conductividad térmica del aire, la porosidad y la conductividad térmica del material sólido.

Además, se analizaron distintos materiales que podrían ser usados como material poroso. Se consideraron las propiedades termofísicas del hierro, bronce,

cobre, aluminio y el latón y se observó que la matriz de cobre tuvo mejor rendimiento que la de bronce y la de hierro debido a su alta conductividad térmica. Según un estudio (Shariah, 1999) sobre el efecto de la conductividad térmica de la placa absorbedora, se concluye que la utilización de un absorbedor de cobre contribuye a una mejora en el rendimiento del 3% sobre el del absorbedor de aluminio. Esto se debe al hecho de que el cobre posee un alto coeficiente de conductividad térmica, seguido por el aluminio y el acero.

Aun así, el aluminio es el material preferido en las aplicaciones de calefacción, ya que la diferencia en el rendimiento entre aluminio y cobre es pequeña en comparación con el alto coste del cobre. El aluminio presenta una buena conducción térmica, mientras que el acero inoxidable tiene un buen comportamiento de almacenamiento de calor, lo que corresponde a una alta difusividad térmica. Las difusividades térmicas son de 6,4 $x10^{-6}$ m^2/s y 4,2 $x10^{-6}$ m^2/s, respectivamente.

(Singh & Panwar, 2012) reportaron que el efecto de la conductividad térmica del material del absorbedor, en el proceso de absorción de la radiación solar, es pequeño. Mientras que el rendimiento térmico depende en gran medida de la porosidad y el coeficiente de extinción de la matriz.

Muchos investigadores presentan modelos experimentales y matemáticos para diversos parámetros de la malla de alambre como el diámetro, la porosidad, el coeficiente de extinción, etc. La porosidad depende de los parámetros geométricos de la malla de alambre como el diámetro del alambre, el paso, el número de capas del lecho. (Thakur, 2003) mostró que el valor del coeficiente de transferencia de calor volumétrico aumenta con una disminución de la porosidad, debido a la mayor turbulencia creada en el flujo.

Para obtener una porosidad más baja, se puede disminuir el diámetro del alambre e incrementarse el número de capas a una profundidad fija de lecho. El aumento de las capas afecta al coeficiente de extinción. Para una matriz menos densa la radiación solar pasa sin absorción y por tanto tiene un coeficiente de

extinción bajo. [Ahmad, 1995] informó que el coeficiente de extinción es una medida de la reducción del flujo solar incidente por cada capa sucesiva de la matriz. Y que el coeficiente de extinción depende de la densidad del material, disminuyendo con el aumento del tamaño de la malla y del diámetro del alambre. Es decir, si se tiene un valor de coeficiente de extinción bajo se tendrá una eficiencia alta porque, en este caso, una mayor cantidad de radiación solar penetra dentro de la matriz absorbedora. Esto a su vez, calentará más la región inferior de la matriz y, en consecuencia, producirá una transferencia más eficaz de energía desde la matriz al aire.

(Sopian, 2009) estudiaron el efecto del caudal másico, la radiación solar y el aumento de temperatura sobre la eficiencia térmica del calentador de aire solar de doble paso con medios porosos. (Ramesh, 2011) evaluaron el rendimiento térmico de un calentador de aire solar con malla metálica a diferentes caudales másicos y concluyeron que la radiación solar no tiene ningún efecto sobre la eficiencia del colector.

(Al-Nimr, 1993) reportó que el comportamiento transitorio del colector de aire solar resulta del cambio repentino de la radiación solar y de la temperatura de entrada. En este estudio se presentan dos modelos matemáticos de las distribuciones de temperatura tanto en el fluido como en la matriz sólida en su forma adimensional. Además, se concluyó, que, en estado estacionario, la temperatura del fluido en un instante y ubicación dados no es linealmente proporcional a la radiación solar.

La investigación de los parámetros operacionales muestra que el caudal de aire (flujo másico) es un parámetro importante para cuantificar el rendimiento de un sistema. Esto implica que el número de Reynolds juega un papel importante. Por ejemplo, (Ahmad, 1995), la eficiencia de un colector plano aumentó de 34% a 42% a medida que el caudal másico de aire aumentó de 0,0138 a 0,0252 Kg/s.

(Varshney, 1998) investigaron experimentalmente las características de transferencia de calor y la fricción del flujo en un colector solar de aire con malla de

alambre y desarrollaron correlaciones para el factor de "Colburn" y el factor de fricción para el rango de porosidad de 0,89 a 0,96 y número de Reynolds entre 182 y 1168. Un tipo similar de investigaciones experimentales con malla de alambre fueron llevadas a cabo por (Thakur, 2003) y (Prasad, 2009) para porosidades entre 0,667 a 0,880 y entre 0,599 a 0,816, respectivamente. Llego a la conclusión que se puede obtener una mejora considerable en la transferencia de calor disminuyendo el valor de la porosidad. (Prasad, 2009) encontró que la eficiencia es una función fuerte del caudal másico y de la porosidad. Y que el coeficiente de transferencia de calor aumenta con un aumento del caudal másico. Con una porosidad de 0,599 obtuvo una eficiencia entre 53,3% a 68,5%.

(Nowzari, 2015) investigó experimentalmente el rendimiento de colectores de paso simple y doble con cubiertas planas y perforadas y con matriz de malla de alambre en lugar de placa de absorción. En el caso de cubiertas perforadas, el aire ambiente cumple dos funciones: enfriar la cubierta mientras que el aire penetra a través de ella y permitir el suministro de aire al calentador de aire solar. A partir de los resultados experimentales se encontró que el colector solar de cubierta perforada, de cierto tipo, produce la máxima eficiencia de 54,8% a un caudal másico de 0,032 Kg/s.

(Verma, 2015) desarrollaron un modelo matemático para investigar el efecto de varios sistemas y parámetros operativos sobre el rendimiento térmico y termo hidráulico de un colector de aire de malla metálica para un rango de porosidad alta (0,887-0,958) y para un rango de porosidad baja (0,599-0,729). Ellos desarrollaron una correlación que permite estimar el coeficiente de extinción, un parámetro importante que afecta el rendimiento del colector solar de malla porosa. Ellos comprobaron que esta correlación puede predecir su valor con una precisión razonable. También encontraron que existe un valor óptimo para la altura del conducto (0,015-0,035 m), su longitud (2,0-5,0 m) y su anchura (0,2-0,6 m) en un colector solar, para el mejor rendimiento termo hidráulico, a un caudal másico particular.

Otro modelo matemático fue desarrollado (Wijeysundera, 1982). Donde se analizó el efecto de la conductividad térmica de los medios porosos sobre las características de transferencia de calor y los resultados fueron validados luego con los resultados experimentales de (Sopian, 1999).

Se estudió diferentes formas y tipos de materiales porosos, como, por ejemplo, hojas de aluminio cortadas, redes de alambre, pedazos de vidrio, trozos de carbón, esferas huecas, de fibra sintética negra y tejido de algodón negro.

(Hasatani, 1985) propuso un calentador de aire solar de lecho compactado de materiales ópticamente semi-transparentes. En la que investigó teóricamente y experimentalmente los efectos de los materiales y el caudal sobre la eficiencia global del calentador.

(Kolb, 2016) llevó a cabo el estudio experimental de un colector solar de aire de doble paso con absorbedor de matriz metálica. En este trabajo se concluyó lo siguiente:

- El rendimiento térmico del colector mejora con el aumento del caudal másico, debido a una transferencia de calor mejorada a la corriente de aire.
- A caudales más bajos (10 g/s) la altura del canal del colector tiene poco efecto sobre su eficiencia térmica total.
- A mayores caudales (>25 g/s) recomiendan alturas bajas para el canal superior (20 mm a 30 mm) para un mejor rendimiento térmico del colector. Aunque, grandes alturas del conducto (entre 100 mm-130 mm) también producen resultados satisfactorios.
- Las bajas pérdidas por fricción, a grandes caudales másicos, requieren grandes alturas de conductos. La caída de presión a caudales más bajos (< 10 g/s) puede ser despreciada.

(Sopian, 2009) estudió teórica y experimentalmente el efecto del flujo másico y la porosidad del medio poroso sobre el rendimiento de un colector de

doble paso. El usó diferentes porosidades y notó un aumentó en el coeficiente de convección como así también en el rendimiento térmico del sistema. Desarrolló correlaciones para la transferencia de calor y el factor de fricción para el flujo de aire a través del colector.

(Gupta, 2013) realizó un experimento similar para analizar el efecto de los medios porosos (lana de vidrio y lana de acero) en colectores de doble paso. El objetivo del estudio era evaluar el rendimiento térmico producido por distintos tipos de medios porosos y medir los diferentes parámetros, como ser, la variación de temperatura, velocidad del fluido, caída de presión y el flujo másico. Encontró que los medios porosos proporcionaron una gran área de transferencia de calor que dieron como resultado un alto coeficiente de convección y un alto rendimiento térmico en el colector con material poroso.

5.3 Estilo de arte de los Colectores de Aire

La teoría desarrollada en este capítulo se puede consultar en (Duffie y Bekman, 2006) y (Sukhatme, 2008).

Un colector solar es un tipo especial de intercambiador de calor que transforma la energía radiante del sol en energía térmica trasferible al fluido. Por lo tanto, es importante conocer las características del recurso solar en el lugar donde se va a probar el dispositivo. Para ello es necesario aprender el movimiento aparente del sol sobre la bóveda celeste.

5.3.1 Definiciones de ángulos

La posición del sol en el cielo varía a lo largo del día y la estación debido al giro de la Tierra alrededor de su eje y a su órbita alrededor del Sol. Existen dos sistemas coordenados para determinar la posición del sol sobre la esfera celeste: el sistema ecuatorial (declinación y ángulo horario) y el sistema horizontal (altura solar y azimut solar).

Las especificaciones geométricas entre un plano con una orientación determinada (fijo o en movimiento respecto a la Tierra) y la radiación solar directa

entrante, puede describirse en términos de algunos ángulos y un conjunto de convenciones de signos. Estos se ilustran en la Figura 5.1.

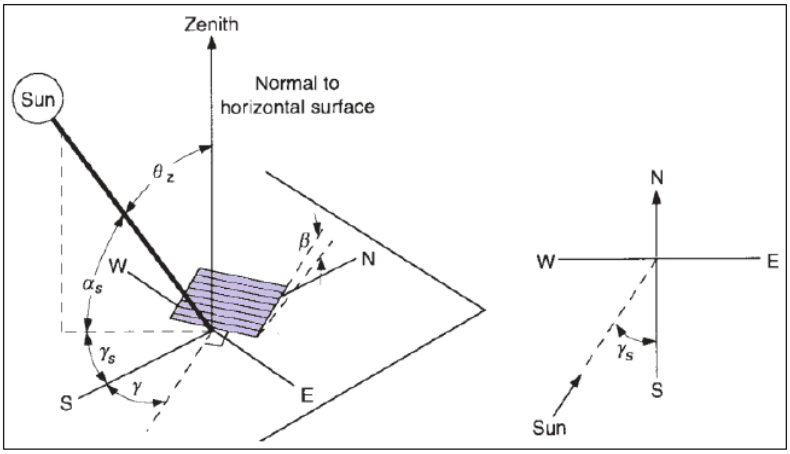


Fig. 5.1: Ángulos característicos de la posición del sol y del plano colector (hemisferio Norte).

A continuación, se listan los ángulos que definen la orientación del plano del colector con sus respectivas definiciones:

Φ Latitud: es la localización angular norte o sur desde el ecuador, es positivo norte; $-90° \leq \Phi \leq 90°$.

δ Declinación: es la posición angular del sol en el mediodía-solar (cuando el sol está en el meridiano local) con respecto al plano del ecuador, es positivo al norte; $-23.45° \leq \delta \leq 23.45°$.

β Pendiente: es el ángulo entre el plano de la superficie en cuestión y el plano horizontal; $0° \leq \beta \leq 180°$. ($\beta > 90°$ significa que la superficie tiene una componente mirando hacia abajo).

γ Azimut de la superficie: es el ángulo entre la proyección de la normal de la superficie sobre el plano horizontal y el meridiano local, considerando 0° en la dirección sur, negativo al este y positivo al oeste; $-180 \leq \gamma \leq 180°$.

ω Angulo horario: es el desplazamiento angular del sol al este u oeste del meridiano local, considerando que la rotación de la tierra sobre su eje es de 15° por hora; negativo a la mañana y positivo a la tarde.

ϑ *Angulo de incidencia*: es el ángulo entre la dirección en que incide la radiación solar directa sobre una superficie y la normal de la superficie.

Existen otros ángulos adicionales para describir la posición del sol en la bóveda celeste:

ϑ_z *Angulo cenital*: es el ángulo entre la vertical del lugar y la radiación directa del sol, es decir, el ángulo de incidencia de la radiación directa para una superficie horizontal.

α_s *Angulo de altitud solar*: es el ángulo entre la horizontal y la radiación directa del sol, es decir, el complemento del ángulo cenital.

γ_s *Angulo de azimut solar*: es el desplazamiento desde la dirección sur de la proyección de la radiación directa sobre un plano horizontal. El desplazamiento este-sur es negativo y el oeste-sur es positivo.

Otro ángulo importante es el llamado declinación solar δ, que se define como la distancia angular desde el cenit de un observador en el ecuador y el sol en el mediodía solar, o como la distancia angular del sol al norte (+) del sur (-) del ecuador celeste.

La declinación δ puede ser encontrada mediante la ecuación de Cooper (1969) (Ecuación 5.1):

$$\delta = 23{,}45 \sin\left(360 \frac{284+n}{365}\right) \tag{5.1}$$

donde n es el número de día del año juliano ($1 \leq n \leq 365$).

La relación entre el ángulo de la radiación directa del sol incidente sobre una superficie, ϑ, y los otros ángulos es:

$$\cos\theta = \sin\delta \sin\phi \sin\beta + \sin\delta \cos\phi \sin\beta \cos\gamma + \cos\delta \cos\phi \cos\beta \cos\omega + \cos\delta \cos\phi \sin\beta \cos\gamma \cos\omega + \cos\delta \sin\beta \sin\gamma \sin\omega \tag{5.2}$$

y

$$\cos\theta = \cos\theta z \cos\beta + \sin\theta z \sin\beta \cos(\gamma s - \gamma) \tag{5.3}$$

Donde el ángulo de azimut solar γ_s, está dado por:

$$\gamma_s = signo(\omega)|cos^{-1}\left(\frac{\cos\theta_z sin\Phi - sin\delta}{sin\,\theta_z cos\Phi}\right)| \quad (5.4)$$

La función signo (ω) es igual (+1) si es positivo y es igual a (-1) si es negativo.

5.3.2. Cociente entre la irradiancia solar directa sobre una superficie inclinada y sobre una superficie horizontal

Para entender esta sección, primero conocer algunas definiciones.

Radiación solar directa: es la radiación solar recibida desde el sol sin tener en cuenta la dispersión provocada por la presencia de la atmósfera.

Radiación solar difusa: es la radiación solar recibida desde el sol después de que su dirección ha sido modificada por la dispersión en la atmósfera.

Irradiancia solar [W/m$_2$]: es la razón a la cual la energía radiante incide sobre una superficie por unidad de área superficial.

Irradiación solar [J/m$_2$]: es la energía incidente por unidad de área sobre una superficie, obtenida por integración de la irradiancia solar sobre un periodo de tiempo especificado, usualmente una hora o un día, puede ser directa, difusa o total, y para superficies en cualquier orientación.

Para el diseño de sistemas solares como en los cálculos de sus eficiencias, es necesario calcular la radiación horaria sobre superficies colectoras inclinadas a partir de mediciones o estimaciones de radiación solar sobre superficie horizontal. Los datos comúnmente disponibles son la radiación horaria o diaria sobre una superficie horizontal, mientras que lo que se necesita saber es la radiación directa y difusa sobre el plano colector.

El factor geométrico, es el cociente entre la irradiancia solar directa sobre la superficie inclinada, $G_{b,T}$, y la irradiancia solar directa sobre superficie horizontal, G_b, para un instante dado, y se calcula exactamente como:

$$R_b = \frac{G_{b,T}}{G_b} = \frac{G_{b,n}}{G_{b,n}}\frac{\cos\theta}{cos\theta_z} = \frac{\cos\theta}{cos\theta_z} \quad (5.5)$$

Donde $G_{b,n}$ es la irradiancia solar directa sobre el plano normal a la dirección de propagación. La Figura 5.2 muestra el ángulo de la radiación directa sobre una superficie horizontal y sobre una superficie inclinada.

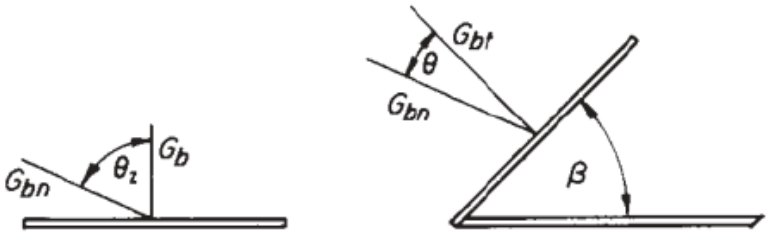


Fig. 5.2. Irradiancia solar directa sobre superficie horizontal y sobre superficie inclinada.

Así, la irradiancia solar directa sobre el plano colector resulta:

$$G_{b,T} = G_b R_b \tag{5.6}$$

5.3.3 Irradiancia solar sobre una superficie inclinada

Existen dos modelos para estimar la irradiancia solar sobre una superficie inclinada un ángulo. Un modelo desarrollado por Liu y Jordan (1963) llamado cielo difuso isotrópico, considera tres componentes: directa, *b*, difusa, *d*, y la reflejada por el suelo, *g*. El primer término de la ecuación corresponde a la irradiancia directa sobre la superficie, el segundo hace referencia a la difusa que proviene del cielo corregida por su factor de vista y el último término es el reflejado desde el suelo, que es proporcional a la fracción reflejada por él y a su factor de vista.

$$G_T = G_b R_b + G_b \left(\frac{1+cos\beta}{2}\right) + G\rho_g \left(\frac{1-cos\beta}{2}\right) \tag{5.7}$$

Donde ρ_g es el albedo o fracción de la irradiancia total reflejada por el suelo.

Otro modelo mejorado, es el modelo HDKR. En el que la irradiancia difusa se representa en dos partes, la isotrópica y la circunsolar. La irradiancia total sobre una superficie inclinada se estima con:

$$G_T = \left(G_b + G_d \frac{G_b}{G_o}\right) R_b + G_d \left(1 - \frac{G_b}{G_o}\right) \left(\frac{1+cos\beta}{2}\right) \left(1 + \sqrt{\frac{G_b}{G_o} sin^3 \left(\frac{\beta}{2}\right)}\right) + G\rho_g \left(\frac{1-cos\beta}{2}\right) \tag{5.8}$$

5.3.4 Transmisión de la radiación a través de cubiertas

La transmisión, reflexión y absorción de la radiación solar en un colector son importantes para la determinación de la eficiencia del colector. La transmitancia, reflectancia y absortancia son funciones de la radiación incidente, espesor, índice de refracción, y coeficiente de extinción del material y todas las propiedades se consideran independientes de la longitud de onda.

Para las superficies lisas, Fresnel derivó las expresiones de la reflexión de la radiación no polarizada que atraviesa un medio 1 con índice de refracción hacia un medio 2 con índice de refracción:

$$r_{\perp} = \frac{sin^2(\theta_2 - \theta_1)}{sin^2(\theta_2 + \theta_1)} \qquad Componente\ Perpendicular \qquad (5.9)$$

$$r_{\parallel} = \frac{tan^2(\theta_2 - \theta_1)}{tan^2(\theta_2 + \theta_1)} \qquad Componente\ Paralela \qquad (5.10)$$

La reflexión de la radiación no polarizada se obtiene como el promedio de las dos componentes:

$$r = \frac{I_r}{I_i} = \frac{r_{\perp} + r_{\parallel}}{2} \qquad (5.11)$$

Los ángulos y son de incidencia y refracción como se muestra en la Figura 5.3, y se relacionan mediante la ley de Snell.

$$n_1 = \sin\theta_1 = n_2 sin\theta_2 \qquad (5.12)$$

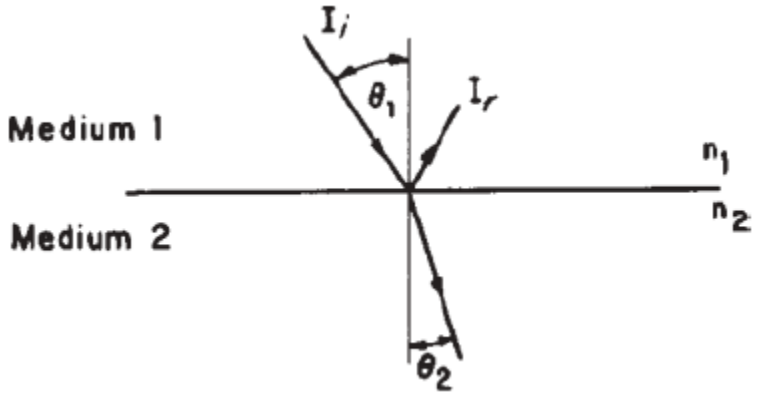


Fig. 5.3: Ángulos de incidencia y refracción en medios con índices de refracción n_1 y n_2.

El índice promedio de refracción del vidrio, n_2, es 1,526 y para el aire, n_1, es 1, por consiguiente, el ángulo refractado es:

$$\theta_2 = sin^{-1}\left(\frac{sin\theta_1}{1{,}526}\right) \quad (5.13)$$

En la siguiente Tabla 5.1 se presentan los índices de refracción de materiales típicos empleados en cubiertas de los colectores.

Tabla 5.1: Índice de refracción promedio (n) en el espectro solar para algunos materiales.

Material de la Cubierta	**Índice n**
Vidrio	1,526
Polymethyl methacrylate	1,49
Polyvinylfliuoride	1,45
Polyfluorinated ethylene propylene	1,34
Polytetrafluorethylene	1,37
Polycarbonato	1,60

La transmisión de la radiación a través del material de la cubierta ocurre entre dos interfaces aire-material que causan las pérdidas por reflexión. La radiación reflejada es diferente para cada componente de polarización, en consecuencia, se trata cada componente por separado.

Despreciando la absorción de la cubierta como se muestra en la Figura 5.4 y considerando solo la componente perpendicular, de la incidencia directa que llega a la primera interface, $(1-r_\perp)$ es lo que alcanza la segunda interface, de ésta $(1-r_\perp)^2$ pasa a través de la segunda y $r_\perp*(1-r_\perp)$ es reflejado hacia la primera y así sucesivamente.

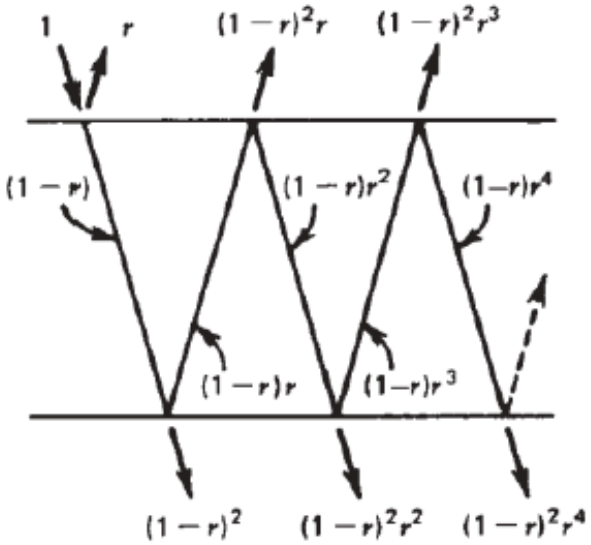


Fig. 5.4: Transmisión a través de una cubierta no absorbente.

Sumando todos los términos transmitidos, la transmitancia para la componente perpendicular es:

$$\tau_{\perp} = \frac{(1-r_{\perp})^2 \sum_{n=0}^{\infty} r_{\perp}^{2n}}{2} = \frac{(1-r_{\perp})^2}{1-r_{\perp}^2} = \frac{1-r_{\perp}}{1+r_{\perp}} \tag{5.14}$$

Exactamente la misma expresión resulta para la componente paralela. Como $r_{\perp}$ y $r_{\parallel}$ no son iguales (excepto en incidencia normal), la transmitancia es el promedio de las dos componentes;

$$\tau_r = \frac{1}{2}\left(\frac{1-r_{\parallel}}{1+r_{\parallel}} + \frac{1-r_{\perp}}{1+r_{\perp}}\right) \tag{5.15}$$

Donde el subíndice r se refiere a que solo fue considerada las pérdidas por reflexión.

En un sistema de N cubiertas del mismo material, se realiza el mismo análisis resultando:

$$\tau_{rN} = \frac{1}{2}\left(\frac{1-r_{\parallel}}{1+(2N-1)r_{\parallel}} + \frac{1-r_{\perp}}{1+(2N-1)r_{\perp}}\right) \tag{5.16}$$

La Figura 5.5 muestra la transmitancia para 1, 2, 3 y 4 cubiertas de vidrio sin absorción con índice de refracción de 1,526. Se observa que la transmitancia disminuye al aumentar el número de cubiertas.

Para una sola cubierta se tiene un valor mayor a 0,9 en ángulos de incidencia comprendidos entre 0° y 50° aproximadamente, mientras que para cuatro cubiertas el valor disminuye por debajo de 0,8 en el mismo rango de ángulos de incidencias.

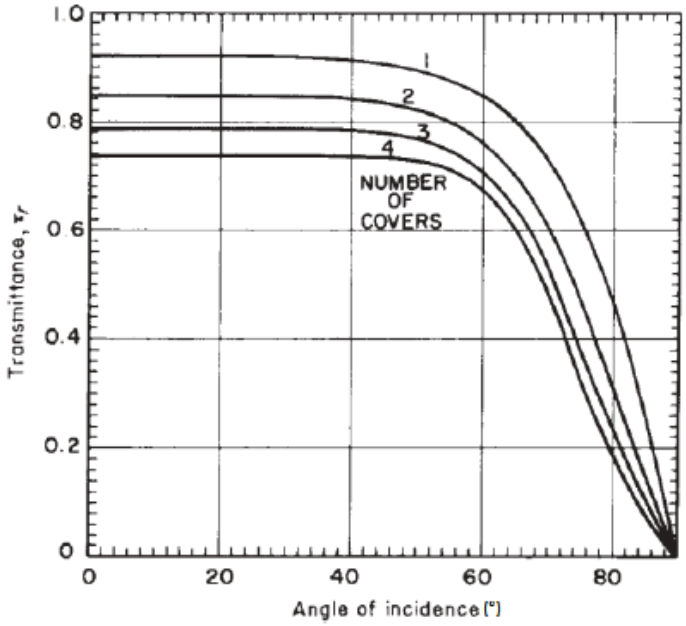


Figura 5.5: Transmitancia para sistemas de cubiertas no absorbentes con índice de refracción de 1,526.

La absorción de la radiación en un medio parcialmente transparente está descrita por la ley de Bouguer, la cual establece que la radiación absorbida es proporcional a la intensidad en el medio y a la distancia, x, que recorre en el medio.

$$dl = -IKdx \tag{5.17}$$

Donde K es una constante de proporcionalidad llamada coeficiente de extinción y se considera constante en todo el espectro solar. Integrando a lo largo de la trayectoria recorrida por la radiación en el medio, se tiene:

$$\tau_a = \frac{I_{transmitida}}{I_{incidente}} = exp\left(-\frac{KL}{cos\,\theta_2}\right) \tag{5.18}$$

Donde el subíndice a indica que se ha considerado la pérdida por absorción y L es el espesor de la cubierta.

5.3.5 Propiedades ópticas de un sistema de cubiertas

Considerando las pérdidas por reflexión y absorción en una sola cubierta, y utilizando la técnica de la marcha de rayos, se encuentra que la transmitancia, reflectancia, y absortancia para la cubierta son:

$$\tau_{\perp} = \frac{\tau_a(1-r_{\perp})^2}{1-(r_{\perp}\tau_a)^2} = \tau_a \frac{1-r_{\perp}}{1+r_{\perp}}\left[\frac{1-r_{\perp}^2}{1-(r_{\perp}\tau_a)^2}\right] \quad (5.19)$$

$$\rho_{\perp} = r_{\perp} + r_{\perp}\frac{{\tau_a}^2(1-r_{\perp})^2}{1-(r_{\perp}\tau_a)^2} = r_{\perp}(1+\tau_{\perp}\tau_a) \quad (5.20)$$

$$\alpha_{\perp} = (1-\tau_a)\left(\frac{1-r_{\perp}}{1-(r_{\perp}\tau_a)}\right) \quad (5.21)$$

Para la componente de polarización paralela las expresiones son análogas. Todas las propiedades ópticas se obtienen como el promedio de las dos componentes.

La expresión de la transmitancia puede ser simplificada dado que τa raramente es menor que 0,9 y entonces el último término de esta ecuación es cercano a la unidad.

$$\tau \approx \tau_a \tau_r \quad (5.22)$$

La absortancia de una cubierta también puede ser aproximada con el mismo criterio.

$$\alpha \approx 1 - \tau\alpha \quad (5.23)$$

La reflectancia de una cubierta simple entonces puede ser aproximada por ($\rho \approx 1-\alpha-\tau$), resultando:

$$\rho \approx \tau\alpha(1-\tau_r) = \tau\alpha - \tau \quad (5.24)$$

En la Figura 5.6 se muestran curvas de transmitancia para sistemas de cubiertas en función del ángulo de incidencia en tres clases de vidrios, caracterizados por el producto KL. Se puede observar que a medida que crece KL se tiene valores de transmitancia menores, las pérdidas crecen y aún más al aumentar el número de cubiertas.

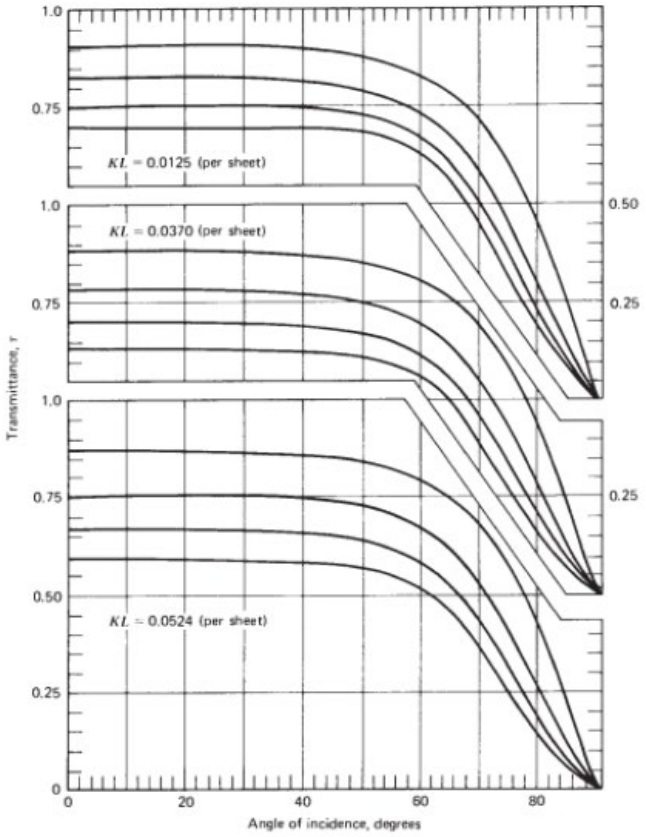


Figura 5.6: Curvas de transmitancia (considerando absorción y reflexión) de 1, 2, 3 y 4 cubiertas de tres tipos de vidrios.

Para un sistema compuesto por 2 cubiertas, no necesariamente idénticas, se pueden usar las ecuaciones de transmitancia y reflectancia propuestas por Siegel y Howell (2002), donde el subíndice 1 indica la cubierta de arriba y 2 la de abajo.

$$\tau = \frac{1}{2}(\tau_{\perp} + \tau_{\parallel}) = \frac{1}{2}\left[\left(\frac{\tau_1\tau_2}{1-\rho_1\rho_2}\right)_{\perp} + \left(\frac{\tau_1\tau_2}{1-\rho_1\rho_2}\right)_{\parallel}\right] \tag{5.25}$$

$$\rho = \frac{1}{2}(\rho_{\perp} + \rho_{\parallel}) = \frac{1}{2}\left[\left(\rho_1 + \frac{\tau_1\rho_2\tau}{\tau_2}\right)_{\perp} + \left(\rho_1 + \frac{\tau_1\rho_2\tau}{\tau_2}\right)_{\parallel}\right] \tag{5.26}$$

5.3.6. Transmitancia para la radiación difusa

La radiación solar incidente en el colector también se debe a la difusa de cielo y a la reflejada por el suelo, ambas se consideran isotrópicas. Para su tratamiento, se considera a estas radiaciones como si provinieran desde un ángulo directo equivalente que se obtiene integrando la radiación incidente sobre todos los ángulos de incidencia contenidos en una semiesfera apoyada sobre el colector. La

integración fue realizada por Brandemuehl y Beckman (1980), los resultados se muestran en la Figura 5.7 en términos de un ángulo de incidencia efectivo.

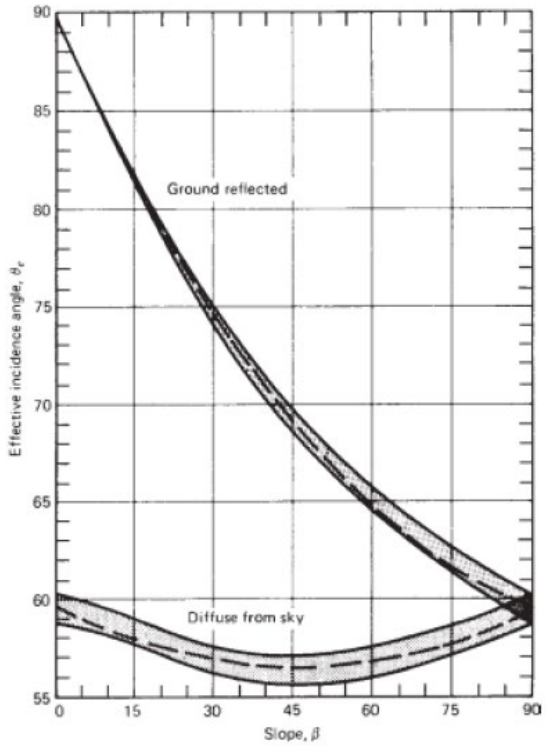


Fig. 5.7. Ángulo de incidencia efectivo para radiación difusa de cielo y reflejada del suelo sobre superficie inclinada.

El ángulo efectivo de incidencia para la radiación difusa de cielo se puede aproximar mediante el siguiente polinomio de orden 2 en la pendiente del colector:

$$\theta_{e.d} = 59{,}7 + 0{,}1388\beta + 0{,}001497\beta^2 \quad (5.27)$$

Y el ángulo efectivo de incidencia para reflexión de suelo se aproxima mediante:

$$\theta_{e.g} = 90 - 0{,}5788\beta + 0{,}002693\beta^2 \quad (5.28)$$

Con estos ángulos los cálculos de las propiedades de las cubiertas se calculan de forma análoga al ángulo incidente θ.

5.3.7. Producto transmitancia-absortancia

La radiación que llega al colector atraviesa el sistema de cubiertas e incide en la placa absorbedora, y una parte se refleja de nuevo hacia el sistema de cubiertas, se refleja nuevamente y vuelve a reincidir en la placa absorbedora.

Esta situación está representada en la Figura 5.8, donde τ es la transmitancia del sistema de cubiertas para el ángulo de incidencia de cada componente de la radiación solar y α es la absortancia de la placa absorbedora. De la energía incidente, $\tau\alpha$ es absorbido por la placa absorbedora y $(1-\alpha)\tau$ es reflejado de nuevo hacia el sistema de cubiertas. La reflexión desde la placa absorbedora es considerada como difusa, de manera que la fracción $(1-\alpha)\tau$ que llega al sistema de cubiertas es radiación difusa y $(1-\alpha)\tau\rho_d$ es reflejado de nuevo hacia la placa absorbedora. La cantidad ρ_d está referida al ángulo difuso.

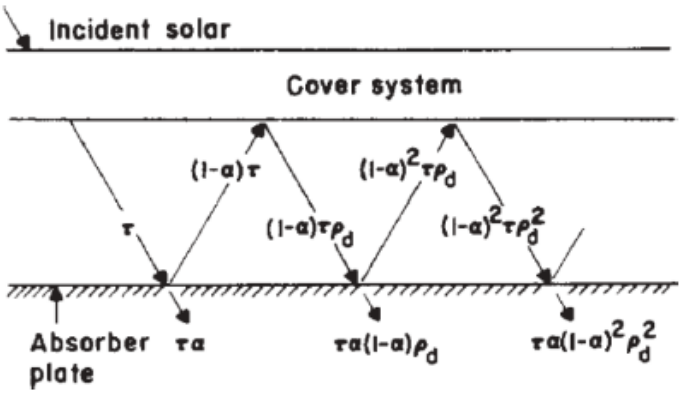


Fig. 5.8: Absorción de radiación solar por la placa absorbente bajo el sistema de cubiertas.

La reflexión múltiple de la radiación difusa continúa de tal forma que la fracción de la energía incidente finalmente absorbida es:

$$(\tau\alpha) = \tau\alpha \sum_{n=0}^{\infty}[(1-\alpha)\,\rho_d]^n = \frac{\tau\alpha}{1-(1-\alpha)\rho_d} \qquad (5.29)$$

5.3.8. Producto transmitancia-absortancia efectiva

No toda la radiación solar absorbida por un sistema de cubiertas es pérdida, ya que la energía absorbida tiende a incrementar la temperatura de las cubiertas y consecuentemente reduce las pérdidas térmicas desde la placa. Debido a esto se define un nuevo producto llamado transmitancia-absortancia efectiva $(\tau\alpha)_e$.

El producto transmitancia-absortancia efectiva se puede aproximar para colectores con absorción despreciable en las cubiertas mediante:

$$(\tau\alpha)_e \approx 1{,}01\tau\alpha \tag{5.29}$$

Y para colectores con vidrios ordinarios en las cubiertas por:

$$(\tau\alpha)_e \approx 1{,}02\tau\alpha \tag{5.30}$$

5.3.9. Irradiancia absorbida por la placa S (W/m²)

La irradiancia que la placa colectora absorbe está dada por las tres componentes de la radiación, directa, difusa de cielo, y reflejada por el suelo, multiplicadas cada una por el producto transmitancia-absortancia efectiva.

Para vidrios con absorción despreciable en la cubierta resulta:

$$S = 1{,}01(\tau\alpha)_\theta G_b R_b + 1{,}01(\tau\alpha)_{\theta_{e.d}} G_d \left(\frac{1+cos\beta}{2}\right) + 1{,}01(\tau\alpha)_{\theta_{e.g}} G\rho_g \left(\frac{1-cos\beta}{2}\right) \tag{5.32}$$

5.3.10. Cálculo del coeficiente global de pérdida de calor, U_L

La energía útil q_u generada por m² de colector resulta del balance en estado estacionario entre las ganancias de energía a través de la cubierta y las pérdidas de calor a través de su envolvente. En su forma local (para una posición dada dentro del colector) se expresa como:

$$q_u = F'\left[S - U_L\left(T_f - T_a\right)\right] \qquad [W/m^2] \tag{5.33}$$

Donde *F´* es el factor de eficiencia del colector definido como el cociente entre el calor útil real producido por el colector y el que produciría si todo el colector estuviera a la temperatura local del fluido, T_f. Su valor depende de la geometría del colector y de las condiciones de flujo dentro de él. El parámetro U_L es el coeficiente global de pérdida de calor del colector.

Cuando una cierta cantidad de radiación solar incide sobre la superficie de un colector, la mayor parte es absorbida y entregada al fluido de transporte, y se lo lleva como energía útil. Sin embargo, como en todos los sistemas térmicos, son inevitables las pérdidas de calor hacia el medio ambiente, por varios modos de

transferencia de calor. La red térmica para un colector de placa plana de cubierta única en términos de conducción, convección y radiación se muestra en la Figura 5.9a y en términos de resistencias entre placas en la Figura 5.9b. La temperatura de la placa es T_p, la temperatura de la cara externa posterior del colector es Tb y la radiación solar absorbida es S. De manera simplificada, las diversas pérdidas térmicas del colector se pueden combinar en una resistencia simple, R_L, como se muestra en la Figura 5.9c. De modo que las pérdidas de energía del colector se pueden escribir como:

$$Q_L = \frac{T_p - T_a}{R_L} = U_L A_c \left(T_p - T_a\right) \tag{5.34}$$

Dónde:

U_L=coeficiente global de pérdida de calor basado en el área del colector A_c [W/m^{2}K].

T_p=temperatura de la placa [°C].

Para el caso de un colector solar calentador de aire de placa plana, el coeficiente global de pérdida de calor desde la placa absorbedora se obtiene como:

$$U_L = U_t + U_b + U_e \tag{5.35}$$

Donde:

U_t=coeficiente de pérdida a través de la cubierta [W/m^{2}K].

U_b=coeficiente de pérdida a través del fondo del colector [W/m^{2}K].

U_e=coeficiente de pérdida a través de su sección lateral [W/m^{2}K].

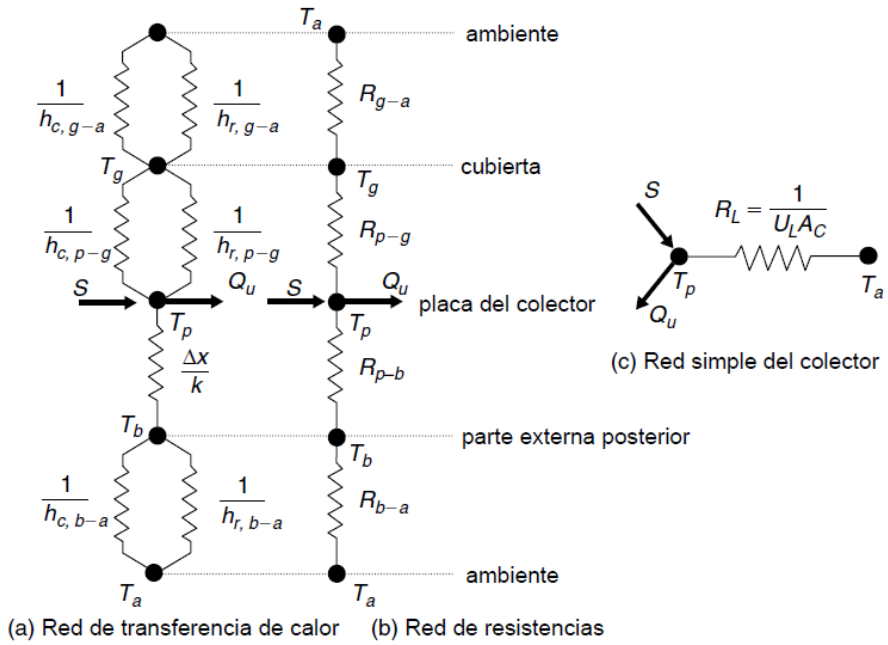


Fig. 5.9: Red térmica para un colector de cubierta simple en términos de (a) conducción, convección y radiación; (b) resistencia entre placas; y (c) una red simple del colector.

5.3.10.1 Cálculo del coeficiente U_t

El coeficiente U_t depende de la tipología del colector en sus aspectos geométricos y fluido-dinámicos. Puede ser determinado matemáticamente para cada tipo de colector empleando el símil eléctrico, considerando las transferencias de calor convectivas y radiactivas, como se muestra en la Figura 5.9.

Primero tenemos que calcular los coeficientes convectivos:

- $h_{c,g-a}$: coeficiente convectivo desde la cubierta del colector al ambiente. Está influenciado por la velocidad con que el viento lame la superficie de la cubierta.
- $h_{c,p-g}$: coeficiente convectivo desde la placa absorbedora a la cubierta. Depende de la geometría del recinto interno del colector.

Luego calcular los coeficientes radiactivos, que dependen de las temperaturas de las superficies (cubierta y absorbedor):

- $h_{r,g-a}$: coeficiente radiactivo desde la cubierta al ambiente.
- $h_{r,p-g}$: coeficiente radiactivo desde la placa absorbedora a la cubierta.

Finalmente, se podrán calcular las resistencias convectivas y radiactivas correspondientes para cada interacción, como R=1/h. Una vez conocidas las resistencias térmicas convectivas y radiactivas, se puede usar el análogo térmico–eléctrico, y plantear la resistencia equivalente.

Para el cálculo del coeficiente convectivo por viento en cubierta $h_{c,g-a}$, se utiliza la relación de Mc Addams:

$$h_{viento} = 2{,}8 + 3v_{viento} \qquad [W/m^2K] \qquad (5.36)$$

Donde v_{viento} es la velocidad del viento en m/s. Con ello, la resistencia convectiva por viento, desde la cubierta al ambiente, es:

$$R_{c,g-a} = \frac{1}{h_{c,g-a}A_c} \qquad [k/W] \qquad (5.37)$$

Donde A_c es el área del colector en m^2. Para el cálculo del coeficiente radiactivo a cielo abierto: Se calcula mediante

$$h_{r,g-a} = \epsilon_g \sigma \left(T_g + T_a\right)\left(T_g^2 + T_a^2\right) \qquad (5.38)$$

Donde ϵ_g representa la emisividad radiactiva de la cubierta, σ la constante de Stefan–Boltzmann, T_g y T_a representan las temperaturas de la cubierta, y del ambiente, respectivamente. En esta expresión, consideramos que el factor de vista de la cubierta al cielo es unitario. Vemos entonces que el coeficiente radiactivo depende de las temperaturas de las superficies involucradas (Kalogirou, 2008). Luego, la resistencia radiactiva a cielo abierto es:

$$R_{r,g-a} = \frac{1}{h_{r,g-a}A_c} \qquad (5.39)$$

Para el cálculo del coeficiente radiactivo interno vamos a suponer que el absorbedor y la cubierta se comportan como superficies infinitas y paralelas, con factor de vista unitario. Entonces nos queda:

$$h_{r,p-g} = \sigma \frac{(T_p+T_g)(T_p^2+T_g^2)}{\left(1/\varepsilon_p\right)+\left(1/\varepsilon_g\right)-1} \tag{5.40}$$

Donde ε_g representa la emisividad radiactiva de la cubierta, ε_p la emisividad de la placa absorbedora, σ la constante de Stefan–Boltzmann, T_g y T_p representan las temperaturas de la cubierta, y de la placa absorbedora, respectivamente. La resistencia térmica asociada es:

$$R_{r,p-g} = \frac{1}{h_{r,p-g}A_c} \tag{5.41}$$

Cálculo del coeficiente convectivo en el interior del colector: Si bien no conocemos el valor del coeficiente convectivo en el interior del recinto formado entre el absorbedor y la cubierta, podemos estimar su valor, mediante consideraciones geométricas. Se puede suponer que no existe flujo de aire en el recinto formado por el absorbedor, paredes y cubierta, ya que es un recinto estanco. Luego, considerando la relación entre alto (a) y ancho (A) del colector vemos que A/a = N°>>1, lo cual nos permite presuponer que el coeficiente convectivo interno será pequeño, y se puede considerar como buena aproximación: (1<$h_{c,p-g}$<5) W/m^2K. Con ello, podemos asumir que $h_{c,p-g}$=2,5 W/m^2K,y la resistencia térmica asociada es:

$$R_{c,p-g} = \frac{1}{h_{c,p-g}A_c} \tag{5.42}$$

Ahora resolvemos las resistencias equivalentes en paralelos de la Figura 5.9:

$R_{p-g} = \frac{R_{r,p-g}R_{c,p-g}}{R_{r,p-g}+R_{c,p-g}}$ resistencia equivalente desde el absorbedor a la cubierta (5.43)

$R_{g-a} = \frac{R_{r,g-a}R_{c,g-a}}{R_{r,g-a}+R_{c,g-a}}$ resistencia equivalente desde la cubierta al ambiente (5.44)

$R_{top} = R_{p-g} + R_{g-a}$ resistencia equivalente desde la placa al ambiente (5.45)

Con lo cual, el coeficiente Ut queda:

$$U_t = \frac{1}{A_c R_{top}} \qquad [W/m^2K] \tag{5.46}$$

Con ello y estimando las temperaturas del ambiente y de la placa absorbedora, podríamos conocer la perdida de calor desde el absorbedor al ambiente como:

$$\dot{Q}_t = \frac{T_{absorbedor} - T_{ambiente}}{R_{top}} \qquad [W] \tag{5.47}$$

5.3.10.2 Coeficiente global de pérdidas por detrás del absorbedor U_b

Siguiendo la red de flujos de calor de la Figura 5.9, se calcula el coeficiente de pérdida global desde la placa al ambiente, por detrás del colector U_b.

Primero se debe calcular la resistencia térmica conductiva que representa la aislación del cuerpo del colector, y luego, el intercambio radiactivo y convectivo desde la cara externa del cuerpo del colector hacia el ambiente. La resistencia térmica conductiva $R_{p\text{-}b}$ se expresa según la Ley de Fourier como:

$$R_{p-b} = \frac{\Delta x}{k A_t} \tag{5.48}$$

Donde A_t representa el área transversal al flujo de calor, Δx el espesor de la aislación y k su conductividad térmica.

Intercambio convectivo por el fondo del colector: Si bien la tapa posterior del colector se encuentra sometido a la acción del viento, hay factores geométricos relacionados con la orientación relativa del colector, su instalación y pendiente, que permiten disminuir los efectos del viento en la tapa posterior. Se sigue utilizando la expresión de Mc Addams, pero corregida por un factor de ajuste C, donde 0<C<1. Lo que nos queda:

$$h_{c,b-a} = C(2{,}8 + 3v_{viento}) \tag{5.49}$$

Donde v_{viento} es la velocidad del viento en m/s. La resistencia convectiva por viento, desde la cara externa del colector es:

$$R_{c,b-a} = \frac{1}{C * h_{c,b-a} A_c} \tag{5.50}$$

Intercambio radiativo fondo–ambiente: de manera similar a la pérdida de calor por radiación desde la cubierta al cielo, se calcula mediante:

$$h_{r,b-a} = \varepsilon_b \sigma (T_b + T_a)(T_b^2 + T_a^2) \tag{5.51}$$

Donde ε_b representa la emisividad radiativa de la cubierta, σ la constante de Stefan–Boltzmann, T_b y T_a representan las temperaturas de la cara externa posterior y del ambiente, respectivamente. En esta expresión, consideramos que el factor de vista de la cubierta al cielo es unitario. Suponemos que $\varepsilon_b = \varepsilon_g$. Luego, la resistencia radiativa desde el fondo del colector hacia el ambiente es:

$$R_{r,b-a} = \frac{1}{h_{r,b-a} A_c} \tag{5.52}$$

El equivalente paralelo convectivo – radiativo es:

$$R_{b-a} = \frac{R_{r,b-a} R_{c,b-a}}{R_{r,b-a} + R_{c,b-a}} \tag{5.53}$$

Equivalente serie total:

$$R_{bottom} = R_{p-b} + R_{b-a} \tag{5.54}$$

Con lo cual, el coeficiente U_b nos queda:

$$U_b = \frac{1}{A_c R_{bottom}} \qquad [W/m^2K] \tag{5.55}$$

Para estimar la pérdida de calor por el fondo del colector seria:

$$\dot{Q}_b = \frac{T_{absorbedor} - T_{ambiente}}{R_{bottom}} \qquad [W] \tag{5.56}$$

La resistencia de conducción del aislamiento detrás de la placa colectora gobierna la pérdida de calor de la placa absorbedora a través de la parte posterior de la carcasa del colector. La pérdida de calor por la parte posterior de la placa rara vez supera el 10% de la pérdida hacia arriba. Los valores típicos del coeficiente de pérdida de calor de la superficie posterior son 0,3–0,6 W/m^{2}K (Kalogirou, 2008).

5.3.10.3 Coeficiente global de pérdidas por los laterales del colector U_e

De manera similar a lo anterior, el coeficiente de transferencia de calor para la pérdida de calor de los bordes del colector se puede obtener de la siguiente manera:

$$U_e = \frac{1}{\frac{\Delta x_e}{k_e} + \frac{1}{h_{c,e-a}}} \qquad [W/m^2K] \tag{5.57}$$

Donde Δx_e es el espesor de aislación de los laterales del colector [m], k_e es la conductividad térmica de la aislación [W/mK] y $h_{c,e-a}$ el coeficiente térmico de perdidas convecticas desde los laterales del colector al ambiente [W/m^{2}K]. Los valores típicos de U_e son 1,5-2,0 W/m^{2}K (Kalogirou, 2008).

Finalmente, para el caso de un colector solar calentador de aire de placa plana, el coeficiente global de pérdida de calor desde la placa absorbedora se obtiene con la Ecuación (5.35) $U_L = U_t + U_b + U_e$.

5.3.11. Cálculo del Factor de Remoción de Calor F_R

Debido a que por lo general se desconoce la temperatura del fluido en cada punto dentro del colector, resulta conveniente determinar un coeficiente que refiera el calor útil generado a una temperatura del fluido conocida. Se define entonces el coeficiente de remoción de calor del colector F_R como el cociente entre el calor útil generado y el que se generaría si todo el colector estuviera a la temperatura de entrada del fluido, T_{fi}, valor que generalmente se conoce en cualquier aplicación:

$$F_R = \frac{\dot{m} C_p (T_{fo} - T_{fi})}{A_c [S - U_L (T_{fi} - T_a)]} \tag{5.58}$$

Donde ṁ es el flujo másico de aire en Kg/s, C_p el calor específico del aire a su temperatura media dentro del colector, Ac el área de colección, T_{fo} la temperatura de salida del fluido y T_a la temperatura ambiente exterior.

Su expresión se obtiene a partir de un balance de energía local en un elemento de fluido que permite, por integración, determinar la distribución de temperatura del fluido a lo largo del colector. Evaluando dicha distribución en la

posición correspondiente a la salida se obtiene T_{fo} y se reemplaza su valor en la Ecuación (5.59), obteniéndose la siguiente expresión:

$$F_R = \frac{\dot{m}C_p}{A_c U_L}\left[1 - exp\left(-\frac{A_c U_L F'}{\dot{m}C_p}\right)\right] \tag{5.59}$$

Según se observa en esta ecuación, para la evaluación del factor F_R es necesario determinar previamente los coeficientes F' y U_L los cuales dependen de la geometría del colector, de las características superficiales de la placa absorbedora (emitancia IR), de las temperaturas media de placa y del fluido y de las condiciones de flujo interior.

5.3.12. Cálculo de la energía útil generada por el colector

De acuerdo a la Ecuación (5.59), la energía útil puede expresarse en función del flujo másico y de las temperaturas de entrada y salida del aire como:

$$Q_u = \dot{m}C_p\left(T_{fo} - T_{fi}\right) \qquad [W] \tag{5.60}$$

Asimismo, la cantidad de energía útil generada por el colector solar en función de la temperatura de entrada y del factor F_R queda expresada mediante:

$$Q_u = A_c F_R\left[S - U_L\left(T_{fi} - T_a\right)\right] \qquad [W] \tag{5.61}$$

Esta es la ecuación fundamental del colector solar ya que con ella se puede determinar no sólo la energía útil producida sino también la temperatura de salida del aire T_{fo} y la eficiencia de colección solar η:

$$T_{fo} = \frac{Q_u}{\dot{m}C_p} + T_{fi} \tag{5.62}$$

5.3.13. Eficiencia instantánea de colección solar

La eficiencia instantánea de colección solar se define como el cociente entre la energía útil generada por el colector, Q_u, y la irradiancia solar total incidente sobre el plano del colector antes de atravesar la cubierta transparente, G_p.

$$\eta = \frac{Q_u}{A_c G_p} \tag{5.63}$$

O también puede definirse en función del flujo másico de aire como:

$$\eta = \frac{\dot{m} C_p (T_{fo} - T_{fi})}{A_c G_p} \tag{5.64}$$

También es posible obtener la eficiencia instantánea a partir del balance de calor entre ganancias y pérdidas:

$$\eta = F_R(\tau\alpha)_{av} - \frac{F_R U_L (T_{fi} - T_a)}{G_p} \tag{5.65}$$

Donde $(\tau\alpha)_{av} = \frac{S}{G_p}$

Todas las variables que figuran en la Ecuación (5.65) son datos conocidos o se miden durante el ensayo. Graficándolos en función de la variable medible $(T_{fi} - T_a)/G_p$ se obtienen pares de puntos, que pueden ser ajustados por una recta realizando una regresión lineal, donde la pendiente negativa $(-F_R U_L)$ es y cuya ordenada al origen es el factor $F_R(\tau\alpha)_{av}$.

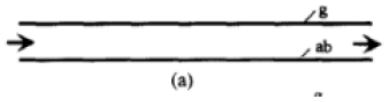
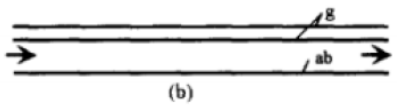
5.3.14. Clasificación de colectores solares calentadores de aire

Básicamente, los colectores de aire pueden ser clasificados de diferentes formas de acuerdo al diseño y la configuración de sus componentes. A continuación, se presenta una clasificación de los colectores de aire de placa plana según tres criterios (López, 2018).

5.3.14.1. Según el número de cubiertas

Los colectores solares pueden tener una cubierta o doble cubierta sobre la placa absorbedora. La cubierta permite reducir las pérdidas convectivas del colector había el ambiente, pero también disminuye la radiación absorbida por el elemento absorbedor. La Tabla 5.2 muestra estas dos diferencias.

Tabla 5.2: Tipo de colector solar de aire según número de cubiertas transparentes. a) colector de cubierta simple, b) colector de cubierta doble.

Clasificación	Tipología
Cubierta simple	
Cubierta doble	

5.3.14.2. Según la configuración del flujo

El paso de flujo de aire por el colector, puede ser simple, doble o de múltiple paso. Los colectores solares de doble paso son los más estudiados ya que permiten una amplia posibilidad de variación de diseño. En la Figura 5.10 se muestra las distintas configuraciones:

- Paso simple, entre la cubierta y la parte superior de la placa absorbedora, Figura 5.10(a);
- Paso simple, entre la parte de la placa absorbedora cubierta y la base del colector, Figura 5.10(b);
- Paso doble, entre la cubierta y la placa absorbedora (como precalentamiento del aire) y después entre la placa absorbedora y la base del colector, Figura 5.10(c).

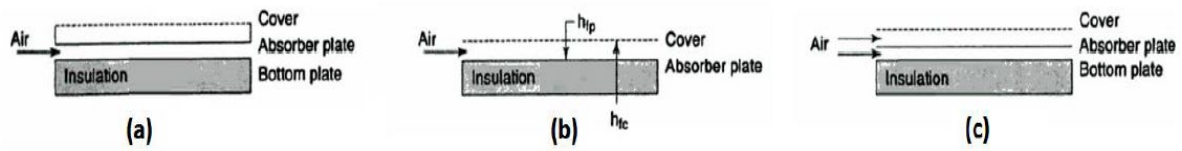


Fig. 5.10: Tipo de colector solar de aire según el tipo de flujo de aire. (a) Colector solar de paso simple con flujo por debajo de la placa absorbedora; (b) Colector solar de paso simple con flujo por debajo de la cubierta transparente y encima de la placa absorbedora; (c) Colector solar de aire de paso doble con el primer paso entre la cubierta y la placa absorbedora y el segundo paso entre la placa absorbedora y la base del colector.

5.3.14.3. Según la configuración del material absorbedor

El colector puede tener un material absorbedor poroso o no poroso. El primer tipo tiene un absorbedor poroso, que incluye aletas o extensiones metálicas, el aire fluye a través del absorbedor. En el segundo tipo el aire fluye o por debajo y/o por encima del absorbedor.

La porosidad del material aumenta la transferencia de calor convectiva entre el absorbedor y el fluido de trabajo. Según la forma que adquiera la placa absorbedora mediante el agregado de altas, nervaduras o algún material poroso. Este cambio produce un incremento en el coeficiente convectivo con el aire y además aumenta la superficie disponible para la transferencia de calor. La Figura 5.11 muestra los tipos de placa absorbedoras:

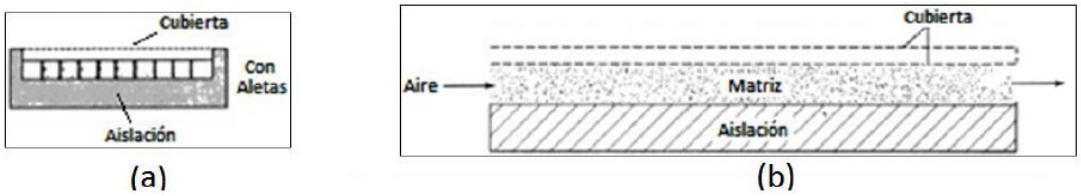


Fig. 5.11: Tipos de placa absorbedora a) placa absorbedora con aletas longitudinales b) placa absorbedora de matriz porosa.

- *Absorbedor con aletas* (Figura 5.11 (a)): Se colocan aletas longitudinales que pueden ocupar todo el alto del canal formando varios canales o puede ponerse aletas con diferentes direcciones. Esto permite incrementar la superficie de contacto e incrementar e incrementar la turbulencia.
- *Absorbedor con medio poroso o lecho relleno* (Figura 5.11 (b)): se utiliza un material con alto grado de porosidad que se coloca en uno de los canales de aire, a través del cual se produce la circulación del aire. Esto aumenta la superficie de transferencia y el tiempo de contacto entre la placa y el flujo de aire. El medio poroso incrementa el rango del ángulo de incidencia en que se absorbe la radiación solar.

5.3.14.4 Otros diseños

En la Figura 5.12 se pueden ver otras configuraciones de colectores solares de aire con matriz porosa. Las mismas tienen la particularidad de tener un doble paso de flujo aire a través del cuerpo del colector.

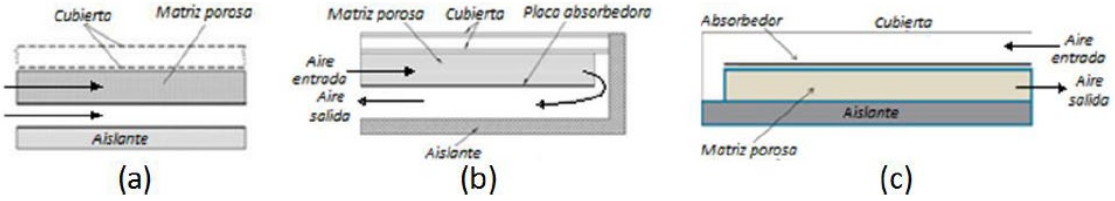


Fig. 5.12: Colector solar de doble paso con matriz porosa. (a) De flujo paralelo con material poroso arriba del absorbedor, (b) De flujo en contracorriente con material poroso arriba del absorbedor, y (c) flujo en contracorriente con material poroso abajo del absorbedor.

5.4 Descripción del prototipo de colector

El colector de aire desarrollado en esta Tesis corresponde a un colector solar de doble paso y flujo en contracorriente con material poroso abajo del absorbedor, con una cubierta de policarbonato alveolar en la parte superior. En la Figura 5.13, se muestra un esquema del colector indicando el recorrido del aire en su interior.

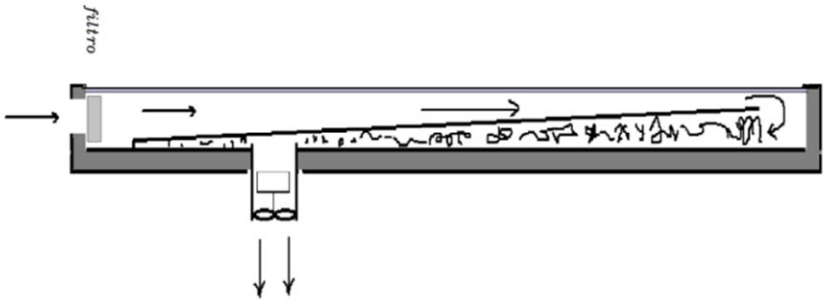


Fig. 5.13: Esquema del colector calentador de aire de matriz porosa.

Por el tipo de colector elegido, el flujo debe necesariamente ser forzado. El ingreso del aire se realiza a través de tres entradas rectangulares. El egreso se realiza mediante un ducto de sección circular, según se aprecia en el esquema.

En cuanto la radiación solar atraviesa la cubierta transparente es absorbida por la placa absorbedora en forma de cuña, calentando el aire por convección de

acuerdo con la velocidad del flujo que circula dentro del colector. Luego este aire se topa con una curva ubicada en el extremo del colector y es impulsado hacia la matriz porosa. Esta matriz porosa se ubica entre la placa absorbedora y la base del colector. El fluido caloportador, es impulsado mediante un ventilador axial que funciona en modo de "extracción de aire". Este aparato se encuentra ubicado en el ducto de salida del colector. Entonces, el aire ingresa al colector (Figura 5.14), lo recorre longitudinalmente y aumenta su temperatura gracias a la transferencia de calor desde la placa absorbedora en forma de cuña y la matriz porosa que actúa como acumulador de aire.

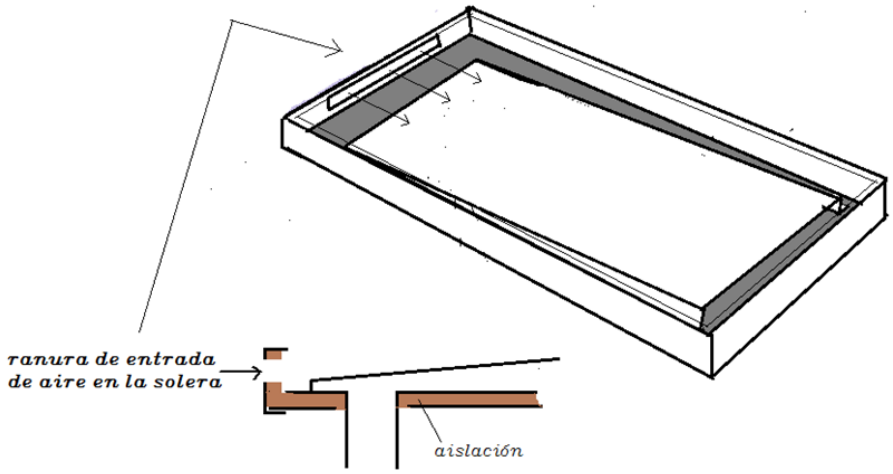


Fig. 5.14: Esquema de la entrada de aire en el colector.

5.4.1. Descripción del prototipo construido

El colector solar calentador de aire ensayado en esta Tesis fue construido en el taller del INENCO-CONICET-UNSa. Para su fabricación se emplearon materiales de fácil adquisición en los comercios locales.

Con el fin de aumentar la transferencia de calor desde el absorbedor al aire, el diseño de colector propuesto fuerza al fluido a circular a través de un material poroso caracterizado por una alta relación *área de transferencia/volumen ocupado*. Esta matriz porosa es de acero oscuro y no fue pintada de negro a fin de aprovechar su baja emitancia infrarroja para disminuir la transferencia de calor al ambiente. Al poseer una emitancia baja (por ser metálica) se incrementa la transferencia de calor

hacia el aire circulante al calentarse a temperaturas superiores a las que alcanzaría si su emitancia fuera mayor.

El prototipo tiene las siguientes dimensiones: 0,97 m de ancho, 1,95 m de largo y 0,1 m de alto. Cuenta con una cubierta en la parte superior de policarbonato alveolar de 6 mm. En su interior, contiene el absorbedor en forma de cuña y debajo de este la matriz porosa de viruta reciclada. Los cierres entre los distintos elementos están hechos mediante remaches y tornillos auto perforantes.

5.4.1.1 Caja de soporte

La caja soporte aloja todos los elementos componentes del colector. Es una caja rectangular de chapa (Figura 5.15). Está construida con chapa galvanizada calibre 27 (27 chapas/pulgada). Sus dimensiones son 1,95 m de largo; 0,97 m de ancho y 0,10 m de alto. Los laterales que forman la caja son de soleras de 10 cm de alto en forma de perfil C (unidas con remaches a la placa base). Esto presenta dos ventajas, la primera es su bajo precio y la segunda es reducirle drásticamente el peso al colector. La caja soporte se encuentra aislada térmicamente en su fondo y lateralmente con poliestireno expandido de 2,5 cm de espesor y densidad 35 kg/m^3.

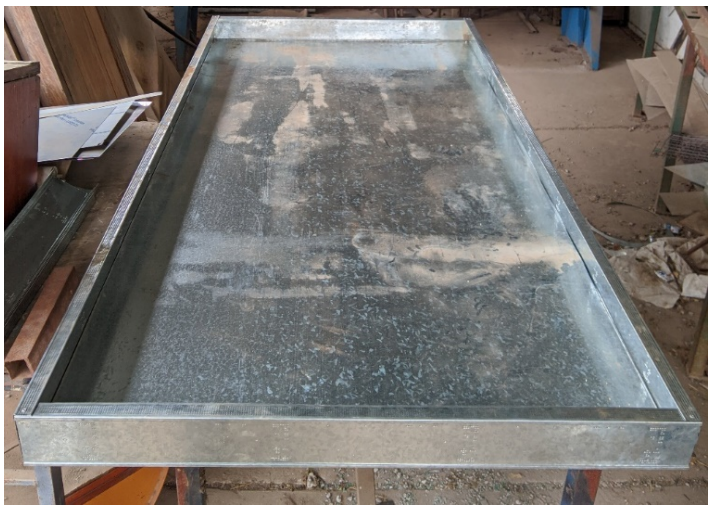


Fig. 5.15: Caja soporte del colector.

5.4.1.2. Matriz Porosa

Es el elemento acumulador del colector. Esta puede ser de distintos materiales. En este trabajo se usó, como material poroso, viruta de acero reciclada

de distintos talleres de tornería de la ciudad de Salta. El material recolectado se compone de distintos tipos de aceros. Por ello, se hizo una cuidadosa selección con el objetivo de dejar el material más homogéneo posible. La matriz porosa quedo conformada, en su mayoría, por acero al carbono SAE 1045, de color azul oscuro, buena dureza; con un pequeño porcentaje de acero al Cromo Molibdeno SAE 4140, de color plateado y mayor dureza que el anterior. Ambos tipos de acero provienen de una producción siderúrgica vía hornos Siemens-Martin.

Gracias a la forma que posee la matriz, el área de transferencia de calor en contacto con el aire circulante, se ve incrementada y acumulada. El espacio que ocupa de es de 1,98 m de largo aproximadamente, 0,92 m de ancho y su alto va de 3 cm a 6 cm (por que la forma del absorbedor es una cuña). Gracias a la forma que posee la matriz, el área de transferencia de calor en contacto con el aire circulante, se ve incrementada y acumulada. El espacio que ocupa de es de 1,98 m de largo aproximadamente, 0,92 m de ancho y su alto va de 3 cm a 6 cm (por que la forma del absorbedor es una cuña). En la Figura 5.16 se muestra la distribución, debajo de la placa absorbedora, de la viruta.



Fig. 5.16: Viruta reciclada distribuida en el colector.

5.4.1.3. Placa absorbedora

A la placa absorbedora se le dio una forma de cuña (Figura 5.17). El objetivo de esta forma es para aprovechar más la radiación solar y debajo de la placa

acumular aire mediante la matriz porosa de virutas. Como se dijo anteriormente la placa cuña tiene 3 cm de un extremo y 6 cm en el otro extremo de alto. Su ancho es de 92 cm y su largo es 198 cm.

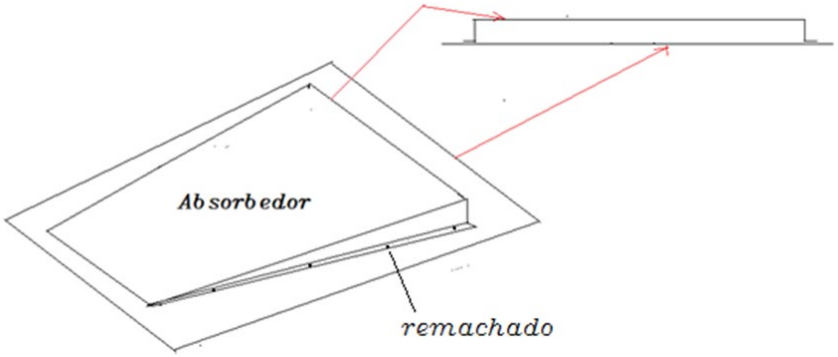


Fig. 5.17: Esquema de la configuración del absorbedor utilizado.

Para mantener la distribución de la viruta debajo de la placa cuña, producto del movimiento del colector, se procedió a colocar varillas dentadas remachadas a la placa absorbedora (Figura 5.18).

5.4.1.4 Cubierta transparente

Reduce las pérdidas de calor proveniente del elemento absorbente mediante dos mecanismos, minimizando las perdidas por radiación que emite el absorbedor y reduciendo las perdidas por convección al evitar que el aire exterior esté en contacto con el absorbedor.

La cubierta está ubicada a 3 y 6 cm de la placa absorbente (forma de cuña por eso las diferentes alturas).

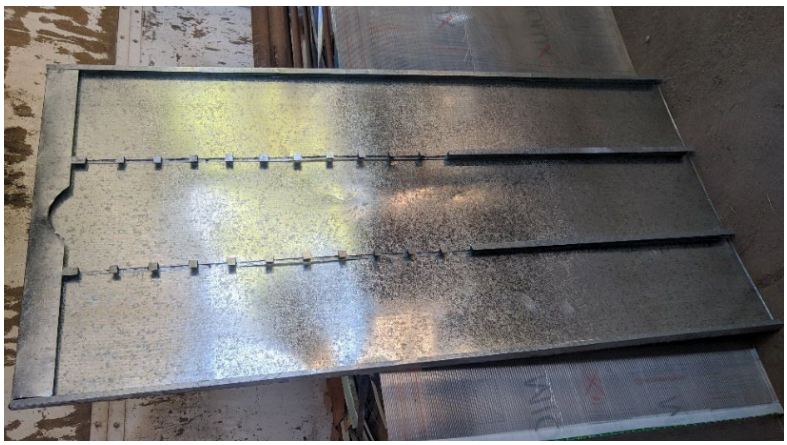


Fig. 5.18: Varillas dentadas remachadas a la placa absorbedora.

La cubierta es de policarbonato alveolar de 6 mm de espesor, constituido por una doble capa de policarbonato con una delgada cámara de aire entre ellas. Está puede ser de vidrio u cualquier otro material transparente que permita el paso de la luz solar. En este caso se optó por este material, aun a pesar de poseer una menor transmitancia con respecto al vidrio, debido a las numerosas reflexiones originadas por el tabicado interior de los alvéolos. Esta elección se debe a las ventajas que ofrece el policarbonato frente al vidrio, ya que la doble superficie con cámara de aire en su interior permite disminuir el coeficiente de pérdida de calor hacia el ambiente.

Este tipo de cubierta presenta la ventaja de que una de las caras del policarbonato se fabrica con protección a la radiación ultravioleta, lo que le brinda durabilidad ante la exposición al sol. La cara sin protección UV se colocó hacia abajo. Por último, el policarbonato tiene mayor resistencia a las precipitaciones de granizo, golpes accidentales y menor peso por m^2. En la Figura 5.19 se muestra la cubierta utilizada.

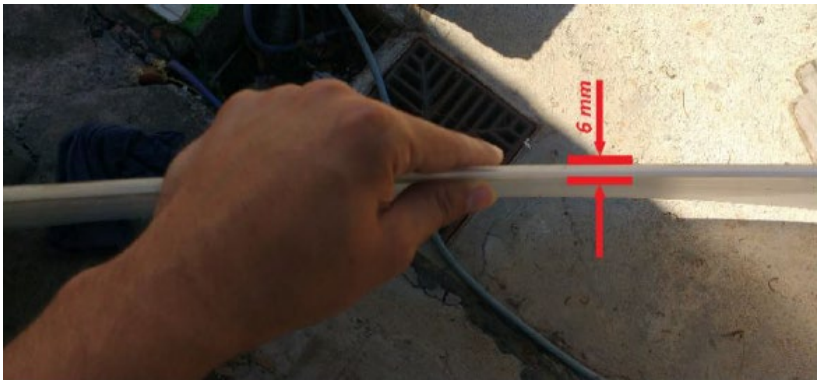


Fig. 5.19: Cubierta de policarbonato utilizada, cortesía (López, 2018).

Se instaló la cubierta transparente sobre una tira de goma con adhesivo (burlete) para evitar el contacto directo del policarbonato con la chapa de la caja de soporte y garantizar la estanqueidad del colector. Para su fijación a la caja soporte se usó silicona transparente para asegurar un cierre lo más hermético posible.

5.5.1.5 Aislante térmico

Se usó un conjunto de asistentes térmicos, el primero es de poliestireno expandido de alta densidad. Con un espesor de 2,5 cm. El segundo es una espuma de polietileno aluminizada de 10 mm espesor. Este tipo de aislante es el apropiado debido a que los aislantes plásticos derivados de los hidrocarburos se deterioran a temperaturas superiores a 70 °C.

La temperatura de los colectores expuestos al sol puede superar este límite, sobre todo cuando no se encuentran en funcionamiento (temperatura de estancamiento). En especial el medio poroso en condiciones de estancamiento puede alcanzar este límite térmico y producir la destrucción del aislante. En las Figura 5.20 y 5.21 se muestran el colector con el conjunto de aislación.

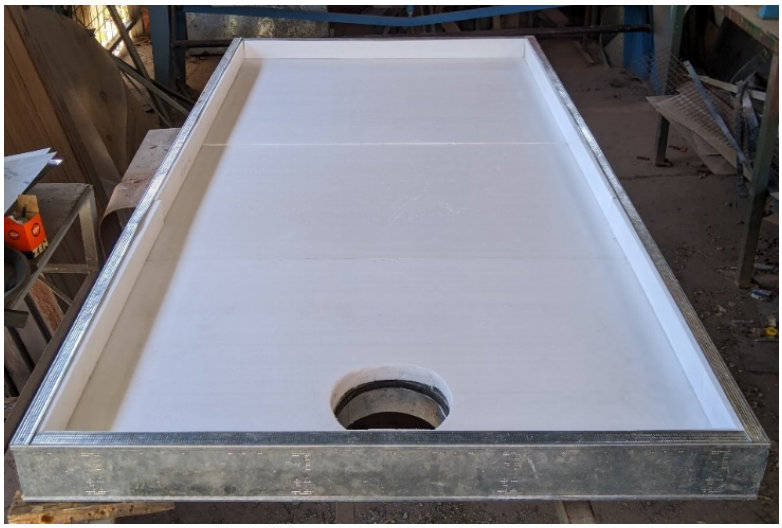


Fig. 5.20: Aislación térmica de poliestireno expandido de alta densidad.

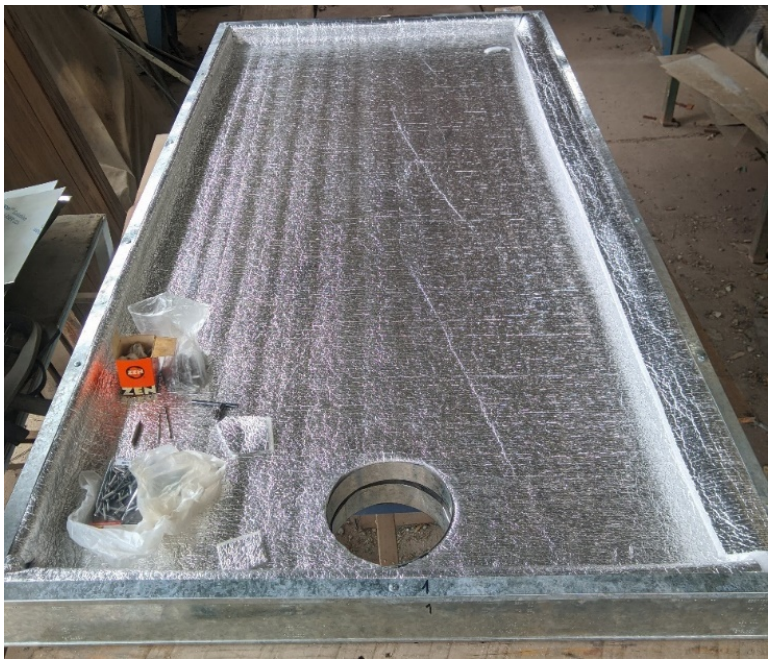


Fig. 5.21: Aislación térmica de espuma de polietileno aluminizada.

5.4.1.6 Ventilador axial

Como se dijo anteriormente, para el funcionamiento del colector se requiere forzar la corriente de aire por el colector. Para ello fue necesario el uso de un ventilador axial. Sus características son: potencia 30 W y 1800 rpm, con una paleta de 0,17 m diámetro. Este ventilador se utiliza en el condensador de cámaras frigoríficas comerciales.

Su funcionamiento fue en modo de "succión" sobre el ducto de salida. En la Figura 5.22 se puede apreciar una vista del ventilador. En la Figura 5.22 (a) se muestra una vista en perspectiva y en la Figura 5.22 (b) se observa como quedó instalado en un ducto, que se fabricó para el sostén del ventilador y a la vez la salida del aire caliente del colector.



Fig. 5.22: Ventilador axial y a la derecha la instalación en el ducto de salida.

5.4.1.7 Resistencia variador de velocidad del motor del ventilador

En la Figura 5.23 se muestra el variador de velocidad eléctrico (Dimmer) que fue utilizado para variar las revoluciones del ventilador a fin de obtener distintas velocidades de flujo de aire.

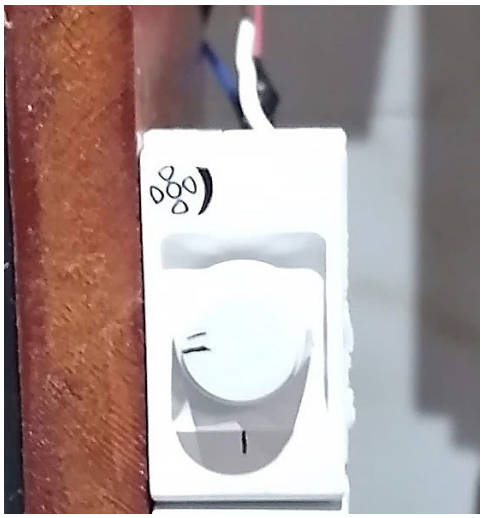


Fig. 5.23: Dimmer utilizado para regular velocidad del ventilador axial.

5.4.1.8 Aire de entrada

Para incrementar la temperatura del aire de entrada a fin de obtener la curva de eficiencia instantánea, fue necesario realizar un sombreado de la termocupla colocada en la entrada (Figura 5.24). Al realizar esto la temperatura de entrada es diferente a la temperatura ambiente y así se pudo obtener distintos puntos de trabajo y determinar su curva de eficiencia.



Fig. 5.24: Sombreado de la termocupla de entrada del colector.

5.4.1.9 Ubicación de las termocuplas en el cuerpo del colector

En la Figura 5.25 se muestra un esquema de la ubicación de las termocuplas en el colector. Se instalaron 12 sensores enumerados del 1 al 12. El número 2 mide la temperatura de entrada del aire (ubicada en el borde de la caja de soporte); los sensores 4, 3 y 6 las temperaturas de la placa absorbedora. El sensor 5 la temperatura en la curva, el sensor 11 aire circulante en la matriz porosa y el sensor 12 la temperatura entre placa absorbedora y la cubierta. Para medir las perdidas térmicas se colocaron los sensores 9 y 10 en la cubierta, mientras que para medir perdidas en la parte inferior del colector se puso los sensores 7 y 8. Finalmente el sensor 1 es la salida del colector.

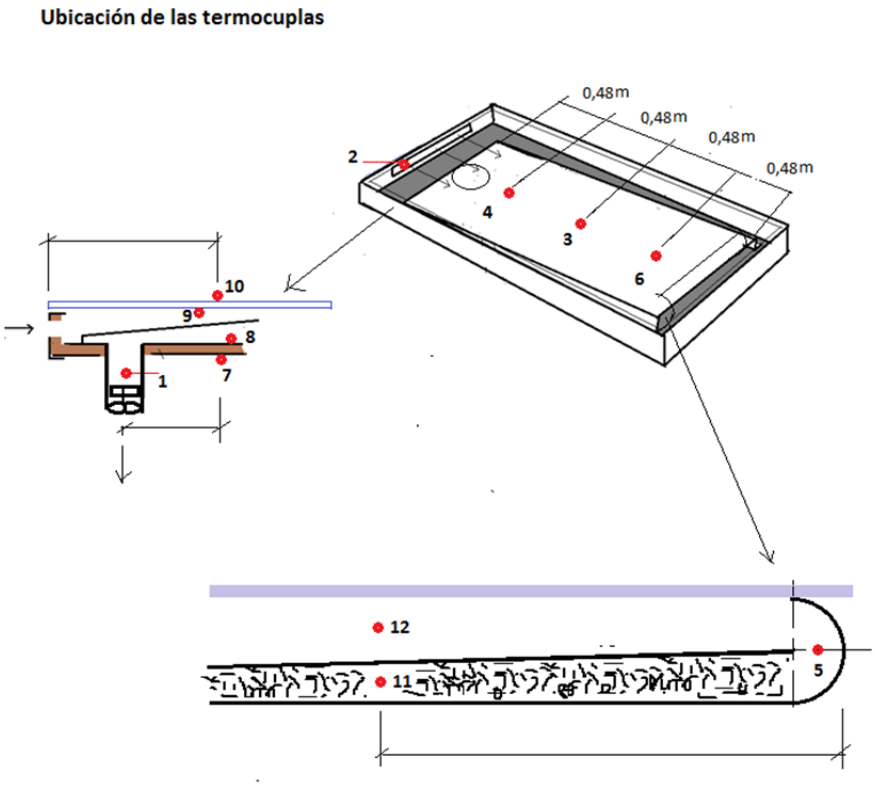


Fig. 5.25: Ubicación de las termocuplas en el colector.

5.5 Metodología de evaluación del desempeño termo-energético

En este inciso se detalla la metodología aplicada en los ensayos realizados en esta Tesis, como así también, las fechas y periodos en que se llevaron a cabo los mismos. Se exponen los lineamientos de la norma ASHRAE 93-2003 empleada para determinar la curva de eficiencia instantánea del equipo. Además, se describe el sistema de calentamiento del aire de entrada desarrollado para cumplir con dicha norma.

Para poder caracterizar un colector solar se debe poner en funcionamiento al mismo y realizar las medidas necesarias para conocer su performance térmica. Un colector de aire se puede operar ya sea en un ambiente interior o exterior. Cuando se ensaya en un ambiente interior se necesita contar con una fuente que simule la radiación solar, y las condiciones de trabajo no reflejan un entorno de funcionamiento real. Por esta razón, en esta tesis, el colector fue ensayado en un

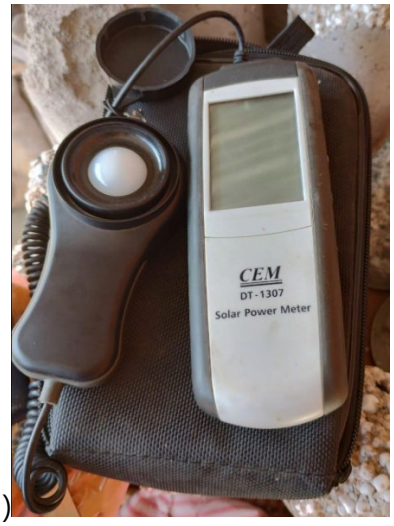
ambiente exterior, donde se refleja el funcionamiento del colector solar bajo condiciones reales. Para una correcta determinación de la curva de eficiencia se cumplió con las exigencias establecidas en la norma ASHRAE 93-2003 para colectores calentadores de aire.

Hay que tener en cuenta que la curva de eficiencia obtenida durante el ensayo, corresponde a una pendiente y época del año particular, y es solo aplicable a este colector, con ese ángulo de inclinación y en esa época del año. Esto se debe a que el ángulo de incidencia directa, θ, varia a lo largo de un día y del año, por lo que los valores de transmitancia, τ, y absortancia, α, también se ven afectados. De esta manera, se modifican los parámetros que caracterizan a la curva de eficiencia. Entonces a la hora de evaluar la performance térmica del colector se tiene en cuenta que el equipo está destinado a la calefacción de edificios, por tanto, la inclinación elegida es la óptima para la colección de energía solar en la época invernal. Es por ello, que el colector en este trabajo, se ensayó ubicado mirando al Norte con una inclinación de unos 40° (latitud+15°).

El colector fue montado en el campo experimental del INENCO ubicado en la Universidad Nacional de Salta (24° 43,7´ de Latitud Sur, 65° 24,6´ de Longitud Oeste y 1.190 m.s.n.m.). Se lo instaló mirando hacia el Ecuador de forma que el eje mayor se encuentre en la dirección este-oeste. El ensayo puede ser realizado a circuito cerrado o a circuito abierto. En cerrado se toma aire de la vivienda a calefaccionar, se lo calienta y se lo vuelve a inyectar en la vivienda a través de ductos. En circuito abierto el aire es tomado del ambiente exterior, calentado y devuelto, a mayor temperatura, al mismo ambiente exterior. Esta última metodología fue la escogida en esta Tesis.

Para evaluar la performance térmica del colector es preciso medir las variables meteorológicas locales, junto con las temperaturas indicadas en la Figura 5.25. Para medir la radiación solar sobre el plano del colector se empleó un solarímetro digital fotovoltaico CEM modelo DT-1307, Figura 5.26a. Los datos de

temperaturas del colector fueron tomados por un dataloggers NOVUS modelo fieldLogger, Figura 5.26b.

a) 

b) 

Fig. 5.26: a) Solarímetro fotovoltaico y b) Datalogger utilizados para la toma de datos.

La campaña de medición fue realizada durante la época e invernal, bajo un régimen de funcionamiento continuo durante las horas de sol. En la Tabla 5.3 se detallan los días ensayados. Sólo los días con cielo despejado fueron considerados en la obtención de la curva de eficiencia del colector mientras que los días restantes fueron desechados.

Tabla 5.3: Días de ensayo del colector en el invierno de 2022.

Mes	Días
Junio	1,6,8,13,15,21,30
Julio	1,7,12,15,19,25
Agosto	1,2,18,19

Durante los días de ensayo, la hora de inicio de operación del equipo fue aproximadamente las 9:30 hs. cuando el colector recibía suficiente radiación solar, finalizando el monitoreo cuando el colector no producía energía útil a las 17:30 hs, dependiendo de las condiciones climáticas del día en particular.

Las variables monitoreadas durante los ensayos fueron las siguientes:

- Temperatura ambiente.
- Radiación solar sobre el plano del colector y sobre plano horizontal.
- Presión atmosférica.
- Temperatura en la entrada del colector.
- Temperatura en la salida del colector.
- Temperaturas en 10 posiciones dentro del colector.
- Velocidad del aire en los ductos.
- Temperatura en la salida del ducto que coincide con la de entrada al prototipo habitacional.

5.5.1 Periodo de ensayo del colector

Se monitoreó el funcionamiento del colector de dos maneras, primero sin estar conectado a una vivienda, es decir, tomando aire del ambiente y devolviéndolo a él a mayor temperatura. Segundo conectado a un prototipo habitacional En la Figura 5.27 se puede ver una vista del colector en operación.



Fig. 5.27: Colector en operación y toma de datos de las temperaturas.

Se realizaron 4 campañas de medición, diferenciadas por la velocidad del aire circulante. Las mismas se detallan en la Tabla 5.4.

Tabla 5.4: Periodo de medición según la velocidad de aire circundante.

Velocidad del flujo [m/s]	Días de duración
1,71	01/06 al 30/06
2,05	01/07 al 27/07
2,23	01/08 al 19/08

Para poder medir la velocidad del flujo de aire, se usó un anemómetro digital marca TSI. Para ello se escogieron algunos días representativos para cada flujo y se determinó su valor promedio.

5.5.2 Criterios para evaluar la eficiencia del colector

Como se mencionó anteriormente, para conseguir la curva de eficiencia, se operó el colector en horas alrededor del mediodía solar. Esto se hizo así para cumplir con las especificaciones exigidas por la norma ASHRAE 93-2003. Dichas especificaciones se detallan a continuación:

Generales (para colectores de agua)

- Se debe proporcionar medios para alimentar el colector con líquido a una temperatura de entrada controlada; realizar las pruebas en un intervalo específico de temperaturas de entrada.
- Se debe medir la radiación solar sobre el plano del colector.
- Se debe proporcionar medios para la medición de la velocidad de flujo, temperaturas de entrada y salida del fluido y temperatura ambiente.
- Se debe proporcionar medios para la medición de la presión ambiente y la caída de presión a través del colector.

Para colectores de aire

Se adicionan especificaciones detalladas relativas a las condiciones de flujo de aire, de mezcla de aire, las mediciones de temperatura del aire y caída de presión.

Se debe siempre operar el colector en el lugar de ensayo bajo condiciones de régimen. Medir G_p, T_{fi} y T_a, que se necesitan en el análisis basado en la ecuación 5.60 y calcular Q_u (con ecuación 5.63). Esto implica llevar a cabo el ensayo en las horas centrales del día, en días claros, cuando la radiación directa es alta y casi normal al plano del colector.

Las pruebas deben realizarse en un intervalo de temperatura de entrada. También, y para minimizar el efecto de capacidad calorífica de los colectores, las pruebas se hacen en parejas casi simétricas, media hora antes y media hora después del mediodía solar, con resultado de pares de puntos promediados.

En los periodos del 13/06 al 30/06 se varió la temperatura del aire de entrada mediante el encendido de caloventor en cuatro diferentes potencias, Figura 5.28a), del 12/07 al 19/07 y del 01/08 al 02/08 se varió la temperatura del aire de entrada mediante el encendido de las velas de cuarzo en cuatro diferentes potencias, Figura 5.28b). Los niveles de potencia disipada para el caloventor fueron: 500, 700 y 900 W, mientras que los niveles de potencia disipada para las velas de cuarzo fueron: 600, 900 y 1.200 W (López, 2019).

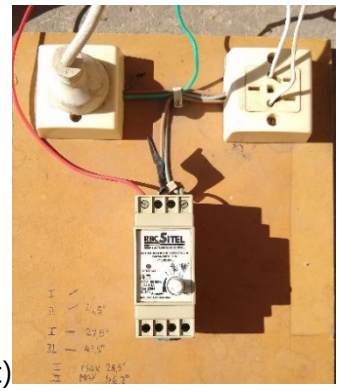
a)  b)  c) 

Fig. 5.28: Aumento de la temperatura de entrada al colector mediante a) Caloventor y b) Velas de cuarzo. c) Sistema de variación de Potencia.

En la Tabla 5.5 se muestran las temperaturas de entrada (Tf_i), para flujo 1,71 m/s (caloventor) y 2,23 m/s (velas de cuarzo) y de salida (Tf_o) del aire alcanzadas con esas potencias.

Tabla 5.5: Posiciones del Dimmer en el circuito de calentamiento auxiliar del aire durante los ensayos.

Posición	Potencia velas curzo [w]	Tf_i [°C]	Tf_o [°C]	Potencia caloventor [w]	Tf_i [°C]	Tf_o [°C]
0	Apagada	-	-	Apagado	-	-
1	600	34	62	1	38	60
2	900	42	67	2	41	64
3	1200	43	69	3	43	65

5.6 Descripción y manejo del equipo de monitoreo

En este inciso se detallan los instrumentos usados para realizar el ensayo. Cabe destacar que su instalación, programación y funcionamiento son relativamente sencillos, permitiendo la adquisición de datos necesarios para la determinación de la eficiencia del colector en forma automática y confiable.

En el colector se realizaron mediciones de temperaturas del aire a la entrada y salida y en 10 posiciones interiores. Los monitoreos se realizaron a intervalos de 30 segundos mediante termocuplas tipo K conectadas a un datalogger NOVUS fieldLoggers. En la Figura 5.29, se aprecia la disposición de algunas de las termocuplas en el interior del colector. La ubicación de los sensores en diferentes posiciones tiene por objeto analizar la distribución de temperatura en el canal de flujo.

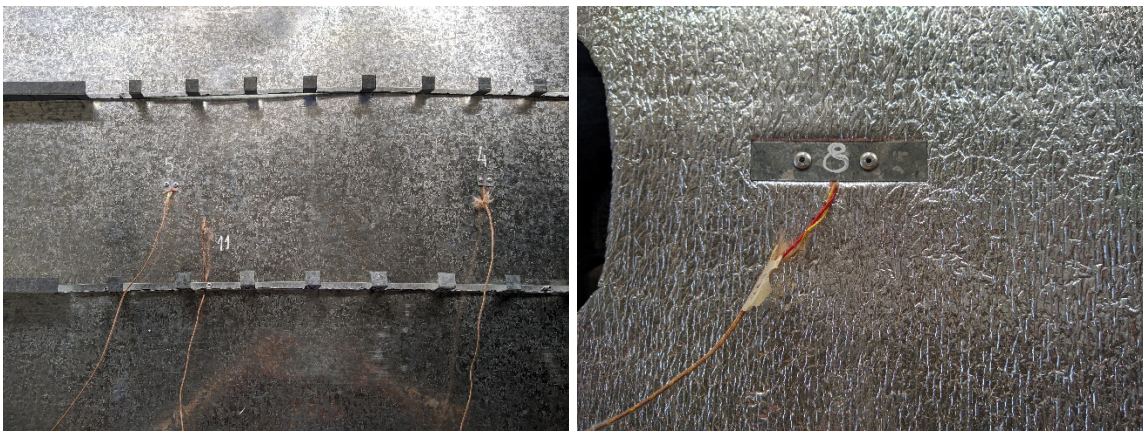


Fig. 5.29: Colocacion de las termoculplas interiores.

Sensor de velocidad de aire: Se midió la velocidad del aire a través del colector para la estimación del flujo másico circulante. Fue censada a través de un anemómetro manual de hilo caliente marca TSI modelo 8345, con un rango de operación de 0 a 30 m/s y apreciación de 0,01 m/s. Las mediciones se realizaron durante los días de ensayo en tres momentos, elegidos convenientemente, a lo largo del funcionamiento diario. En la Figura 5.30 se aprecia el instrumento de medición.



Fig. 5.30: Anemómetro digital de hilo caliente y punta telescópica.

La velocidad del aire fue medida en el conducto de salida, en 5 puntos distintos a lo largo de una línea diametral. Luego, estos valores fueron promediados para finalmente encontrar un valor único, representativo de la corriente de aire a través del colector.

Sensores de Temperatura: en vista de los valores de temperatura que se pueden alcanzar en el interior del colector, se utilizó como sensor térmico termocuplas tipo K fabricadas de cromel (cromo-aluminio) y alumel (aluminio-niquel). Con un rango de funcionamiento de -40 a 1.200 °C aproximadamente y sensibilidad de 3,6 mV/100 °C. En la Figura 5.27 se muestra este tipo de termopar.

Medición de la presión atmosférica, radiación sobre plano horizontal y temperatura ambiente: Estas variables meteorológicas se midieron con la estación

meteorológica DAVIES PRO, ubicada en el techo del edificio del INENCO. Los datos fueron registrados cada 5 minutos. La Figura 5.31 muestra una foto del aparato de medida.



Fig. 5.31: Estación meteorológica DAVIES.

El dato de presión atmosférica es necesario para la determinación de la densidad del aire ambiente, a las distintas condiciones (presión, temperatura) ambientales a lo largo de un día. Con la densidad se puede calcular el flujo másico de aire, a través de la siguiente Ecuación (5.66):

$$\dot{m} = \rho_{(P,T)} v A_t \tag{5.66}$$

Donde, v es la velocidad del flujo de aire; A_t es el área de sección trasversal del ducto de salida y $\rho_{(P,T)}$ es la densidad del aire en la entrada del colector. Esta última se calcula con la siguiente Ecuación (5.67), válida según el modelo de la (U.S. Standard Atmosphere, 1976).

$$\rho_{(P,T)} = \rho_{ref} \left(\frac{P}{P_{ref}}\right)\left(\frac{T_{ref}}{T}\right) \tag{5.67}$$

Siendo P la presión del lugar, ρ_{ref}=1,2929 Kg/m^3 a T_{ref}=273,13 K y a P_{ref}=101325 Pa.

5.7 Determinación de la porosidad de la matriz porosa

Se determino la porosidad siguiendo los pasos de (López, 2018). Cuando se trabaja con matrices porosas hay tres parámetros importantes a determinar a fin de

caracterizar la matriz. Estos son: la porosidad o factor de huecos, ε, el área transversal efectiva de transferencia de calor por conducción, A_{tc} y el área lateral efectiva de transferencia de calor por convección, A_m (Hernández et al., 2012).

El factor de huecos ε se determina experimentalmente mediante un procedimiento que consiste en determinar el volumen de agua que llena los intersticios de una muestra del material poroso. Este es el volumen de huecos V_h. Si V es el volumen contenedor de la matriz y el agua, entonces la porosidad se calcula como:

$$\varepsilon = \frac{V_h}{V} \tag{5.68}$$

y el volumen sólido de la matriz porosa como:

$$V_s = (1 - \varepsilon)V \tag{5.69}$$

Para encontrar la porosidad se necesitan los siguientes materiales: una muestra representativa del material poroso, un vaso de precipitado, una balanza de precisión y agua destilada hasta completar el aforo. Se procede como sigue:

I. Se extrae del colector la muestra del material poroso.
II. En el vaso de precipitado se ubica ésta de manera que llegue justo hasta un nivel graduado de volumen conocido (V).
III. Se pesa el vaso de precipitado con la muestra en su interior.
IV. Se agrega el agua lentamente, hasta tapar los huecos existentes en la matriz.
V. Se completa con agua hasta el aforo.
VI. Se pesa el conjunto. La diferencia de peso es el peso de agua agregada que representa el peso del volumen de huecos (V_h).

El peso del agua encontrado fue de:

$$P_h = (2392 \pm 1) \quad [g] \tag{5.70}$$

Una vez terminado este procedimiento, estimamos el volumen (V_h) dividiendo el peso medido entre la densidad del agua ($\boldsymbol{\rho}$=1.000 Kg/m^3):

$$V_h = \frac{P_h}{\rho} = \frac{2{,}392\ kg}{1000\ kg/m^3} = 0{,}002392 m^3 = 2{,}392\ litros \quad (5.71)$$

El volumen total (V) elegido en el vaso de precipitado fue de:

$$V = (2500 \pm 500) cm^3 \quad (5.72)$$

Por último, se encuentra la porosidad de la ecuación (5.46):

$$\varepsilon = \frac{V_h}{V} = \frac{2{,}392\ litros}{2{,}500\ litros} = 0{,}9568 \quad (5.73)$$

La porosidad encontrada es aproximadamente del 96%. Para conocer la incerteza de este resultado se realiza un análisis de propagación de errores de acuerdo a las apreciaciones de los instrumentos de medida utilizados durante el procedimiento.

La ecuación que permite estimar el error relativo de la porosidad es la siguiente:

$$\frac{\Delta\varepsilon}{\varepsilon} = \frac{\Delta V_h}{V_h} + \frac{\Delta V}{V} \quad (5.74)$$

Donde se suman los erros relativos de las magnitudes involucradas. Puesto que, en realidad se midieron los pesos y no los volúmenes, y considerando a la densidad como una constante, la representamos sin error. Entonces, la ecuación (5.75) se puede volver a escribir como:

$$\frac{\Delta\varepsilon}{\varepsilon} = \frac{\Delta P_h}{P_h} + \frac{\Delta V}{V} \quad (5.75)$$

Reemplazando:

$$\frac{\Delta\varepsilon}{\varepsilon} = \frac{1\ gr}{2392 gr} + \frac{500\ cm^3}{2500\ cm^3} = 0{,}2 \quad (5.76a)$$

$$\therefore \Delta\varepsilon = 0{,}2\varepsilon = 0{,}9568 x 0{,}2 = 0{,}19 \approx 0{,}2 \quad (5.76b)$$

Finalmente, la porosidad con su error es:

$$\varepsilon = (0{,}96 \pm 0{,}2) \quad (5.77)$$

5.8 Resultados de las mediciones

En esta sección se presentan los resultados de las mediciones realizadas durante los ensayos y el análisis de los mismos. Los días de ensayo ya fueron

presentados en la Tabla 5.4. En primer lugar, se presentan los valores medidos de las variables meteorológicas temperatura ambiente y radiación solar dado que con ellos se pueden distinguir los días soleados de los días nublados. Seguidamente se presentan los datos de temperaturas de entrada y salida del colector, la energía útil generada, y las temperaturas del aire en el interior del colector.

5.8.1 Datos obtenidos durante el ensayo

La instalación del equipo se concretó el día 26 de mayo de 2022. La campaña de medición comenzó el 01 de junio, y finalizo el 19 de agosto del mismo año. Se obtuvieron datos casi continuos, debido a que sólo se puso en operación al equipo del lunes a viernes de cada semana y a que hubo días nublados en los que no se operó el equipo. La hora de inicio, en los días del ensayo, estuvo limitada por los obstáculos existentes hacia el este de la instalación del colector y por la cantidad de horas de luz solar, dando inicio aproximadamente a las 9:30 hs cuando el colector recibía suficiente radiación solar, y finalizando el monitoreo cuando el colector no producía energía útil, aproximadamente a las 17:30 hs, dependiendo de las condiciones climáticas del día en particular.

El dispositivo fue operado en forma manual. Es decir, el ventilador fue encendido por la mañana cuando el sol estaba suficientemente alto y la radiación era lo suficientemente buena como para que el colector produjera aire más caliente que el aire del ambiente. Fue apagado por la tarde con los últimos rayos de sol incidiendo sobre él.

Primero se hizo funcionar al sistema por algunos días (durante las horas de sol) para comprobar que todo estaba en su correcto funcionamiento. Luego de verificar que estaba operando normalmente, se puso en marcha la campaña de medición. Este primer periodo fue fundamental para ajustar el sistema "sensores-datalogger", mencionado en la sección 5.7.

Durante el periodo de medición hubo días destinados a la determinación de la curva de eficiencia del colector. Para ello se instaló, en la entrada del colector, un tubo de chapa galvanizada que en su parte inferior se colocó un caloventor. Luego

en otros ensayos se extrajo el caloventor y se colocó un soporte para ubicar dos velas de cuarzo, y así poder calentar el aire de entrada al colector. Se observó que la velocidad del flujo de aire, en presencia de las velas de cuarzo (con su respectivo soporte) y el caloventor, no cambiaron apreciablemente su valor. Los periodos de medición a cada velocidad de flujo y el valor del flujo másico asociado, se detallan a continuación:

I. Periodo del 01 de junio al 30 de junio: El valor promedio de la velocidad del aire medido en el colector fue de 1,7 m/s. Multiplicando este valor por el área transversal del ducto de salida y por la densidad del aire se obtuvo un valor promedio de flujo másico de 0,021 Kg/s.

II. Periodo del 1 de julio al 27 de julio: El valor promedio de la velocidad del aire medido fue de 2,05 m/s con un flujo másico promedio de 0,025 Kg/s.

III. Periodo del 01 de agosto al 19 de agosto: El valor promedio de la velocidad del aire medido fue de 2,23 m/s con un flujo másico promedio de 0,027 Kg/s.

5.8.2. Medición de las variables meteorológicas

Periodo del 01 de junio al 30 de junio: En la Figura 5.32 se presentan los valores de irradiancia solar global medidos sobre el plano del colector y los de temperatura ambiente. Se observa que en todos los días los valores de irradiancia no superaron los 850 W/m^2 al medio día solar (hora oficial 13:25, aproximadamente, en esta época del año). Los valores de temperatura ambiente máxima, estuvieron por debajo de los 21 °C. En la mayoría de los días las amplitudes térmicas alcanzaron los 13°C registrándose los valores máximos de temperatura ambiente aproximadamente a las 15:30 hs. La temperatura del 1 de junio tuvo mínimas de 7,2 °C y máxima de 11 °C.

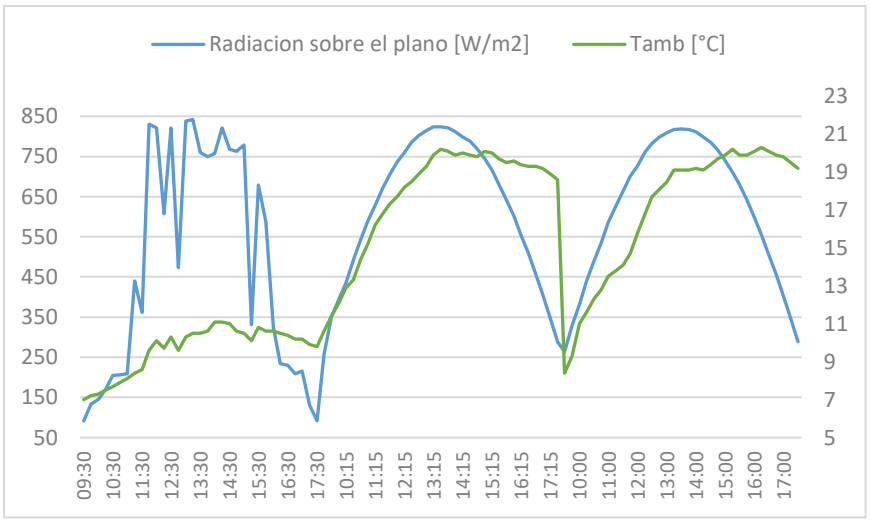


Fig. 5.32: Valores de irradiancia solar global, G_p y de temperatura ambiente, T_a para los días 1,6 y 8 de junio.

En los primeros días, del 01 a 08 de agosto, las condiciones de funcionamiento fueron las convencionales, es decir, sin el encendido de energía auxiliar. En los siguientes días, desde el 13 al 30 de junio se encendió el caloventor. En la Figura 5.33 se muestran los valores de Irradiancia y temperatura ambiente del 13, 15 y 30 de junio.

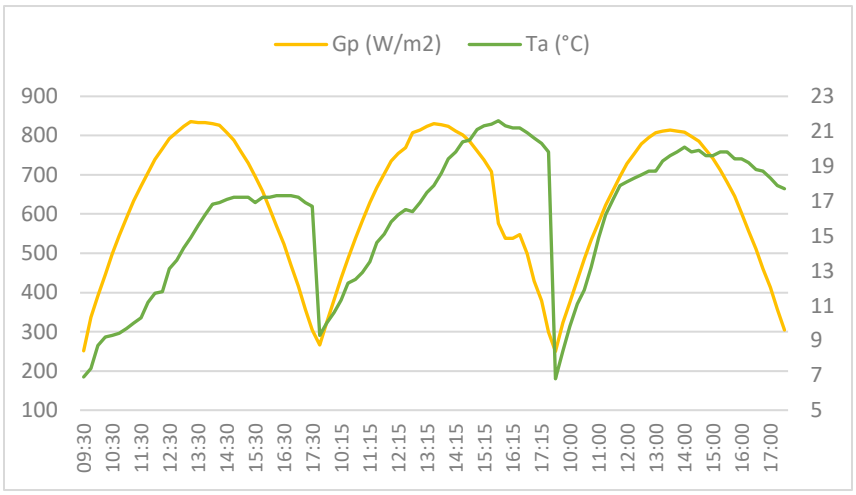


Fig. 5.33: Valores de irradiancia solar global, G_p y de temperatura ambiente, T_a para los días 13,15 y 30 de junio.

Periodo del 1 de julio al 27 de julio: En este periodo se presentaron condiciones similares a la del periodo anterior, Figura 5.34. Con valores de

temperatura ambiente de 23 °C para el 1 de julio, para los demás días no sobrepaso los 19 °C.

En el periodo del 01 al 19 de julio se operó la temperatura de entrada del colector alrededor del mediodía solar, según lo exigido por la norma ASHRAE 93-2003. Los días 26 y 27 de julio se operó el colector de forma convencional sin proporcionar energía auxiliar a la entrada. La radiación no supero los 750 w/m^2 el 27 de julio ya que era un día con mucha nubosidad, mientras que la temperatura ambiente llego hasta los 27,8 ºC de máxima.

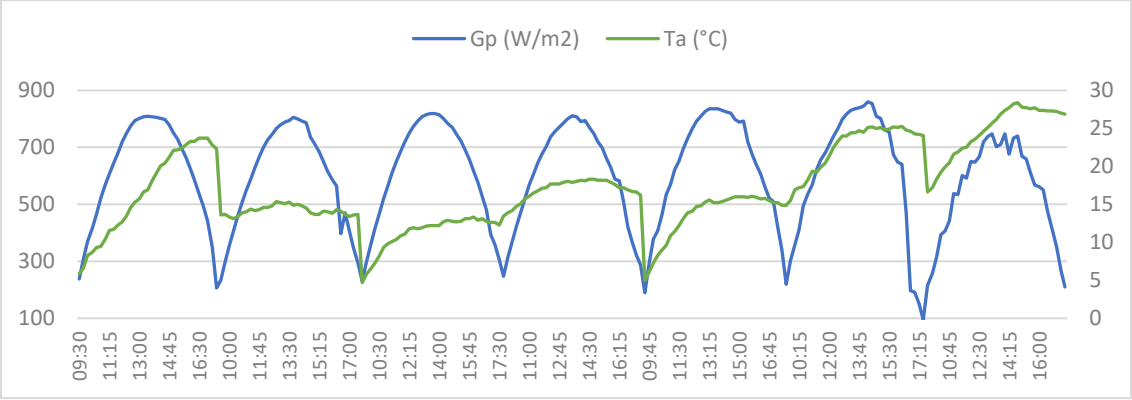


Fig. 5.34: Valores de irradiancia solar global, G_p y de temperatura ambiente, T_a para los días 1, 7, 12, 15, 19, 26 y 27 de julio.

Periodo del 01 de agosto al 19 de agosto: En la Figura 5.35 se presentan los valores registrados. La temperatura ambiente, durante las horas de operación, nunca estuvo por debajo de los 5 °C. Sin embargo, en estos días la temperatura máxima no superó los 23,8 °C. La radiación sobre el plano del colector supero del 900 W/m^2 los días 18 y 19 de agosto.

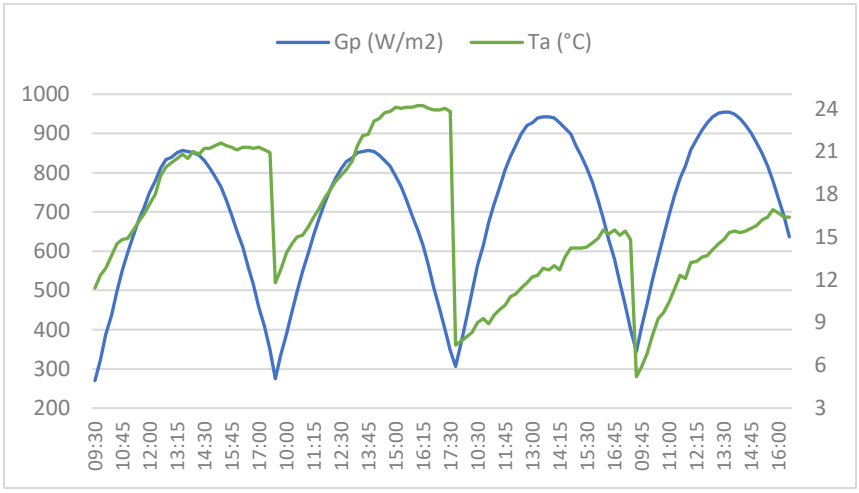


Fig. 5.35: Valores de irradiancia solar global, G_p y de temperatura ambiente, T_a para los días 1, 2, 18 y 19 de agosto con un flujo másico de 0,027 kg/s.

Los días 1 y 2 de agosto se operó la temperatura de entrada del colector alrededor del mediodía solar, según lo exigido por la norma ASHRAE 93-2003. Los días 18 y 19 de agosto se realizó la calefacción con el colector del prototipo habitacional. Estos días hubo una máxima de 16,7 °C y mínima de 5,2 °C.

5.8.3 Medición de la temperatura en entrada y salida del colector

Periodo del 01 de junio al 30 de junio: En la Figura 5.36 se grafican las curvas de temperaturas del aire medidas en la entrada, T_{fi}, y en la salida, T_{fo}, del colector. El encendido del caloventor se puede apreciar claramente en casi todo el periodo de medición, ya que la temperatura de entrada al colector superó los 38 °C. El flujo másico del aire en este periodo fue de 0,021 Kg/s.

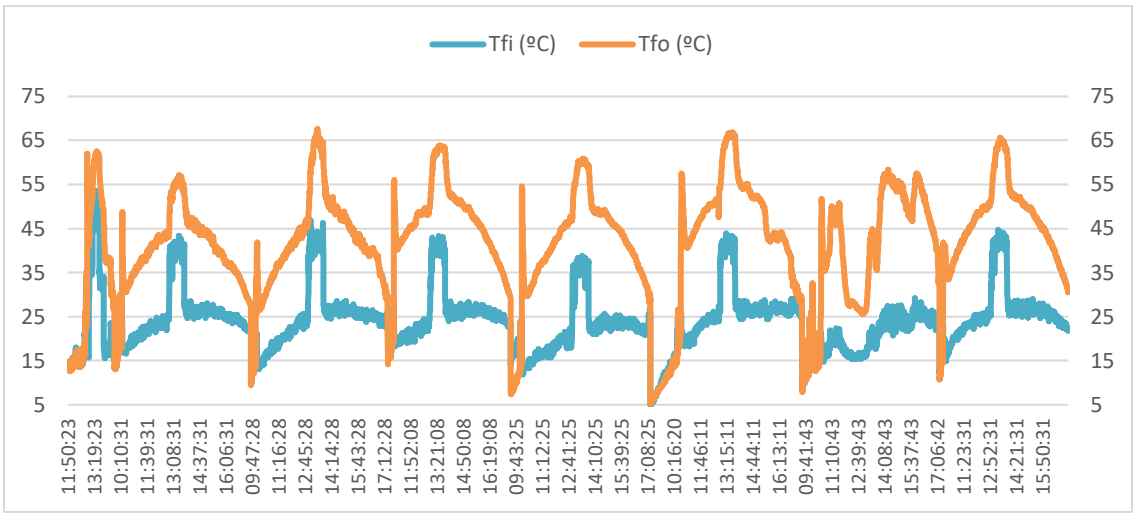


Fig. 5.36: Evolución temporal de las temperaturas de entrada, T_{fi}, y salida, T_{fo}, del colector. Con un flujo másico de 0,021 Kg/s.

En la Figura 5.36 se puede observar que, en el primer día de ensayo, la temperatura de entrada aumento hasta los 50 °C, en comparación con los demás días ensayados con energía auxiliar. Esto se debe a que se estaba calibrando ese día el caloventor para una adecuada utilización. El máximo de la temperatura de entrada se produce aproximadamente 13:20 hs. El máximo de la temperatura ambiente Ta se produce después del medio día solar debido a la inercia térmica de la atmósfera.

Considerando el día sin calentamiento auxiliar, el valor máximo alcanzado por el aire a la salida del colector fue de 55 °C cuando la temperatura de entrada era de 26 °C. Bajo las condiciones climáticas del ensayo, este prototipo logró aumentar la temperatura del aire circulante entre 24 °C y 27 °C.

Periodo del 1 de julio al 27 de julio: En los primeros días del período (01 al 25 de julio), se operó el colector media hora antes del mediodía solar y media hora después, con energía auxiliar en la entrada del colector. Del 26 al 27 de julio se volvió al funcionamiento convencional del equipo, encendiéndose por la mañana y apagándose por la tarde sin energía auxiliar en la entrada del colector. En la siguiente grafica de la Figura 5.37, se presentan los valores de temperatura del aire en la entrada y en la salida del colector en este nuevo periodo. El flujo másico del aire en este periodo fue de 0,025 Kg/s.

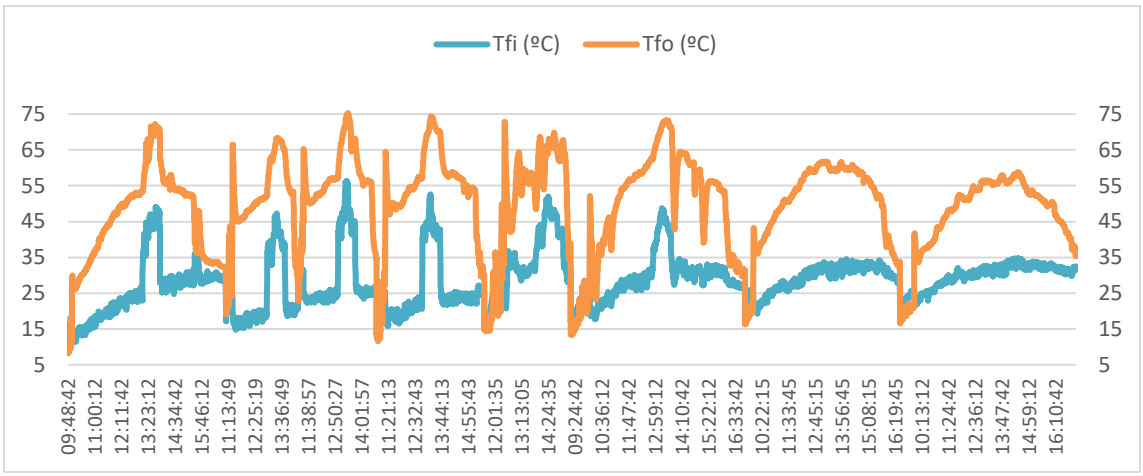


Fig. 5.37: Evolución temporal del segundo periodo de las temperaturas de entrada, Tfi, y salida, Tfo, del colector. Con un flujo másico de 0,025 Kg/s.

Los máximos valores del aire a la salida del colector fueron de 58,1 °C y 74,5 °C cuando las temperaturas de entradas fueron de 33,7 °C y 57 °C, respectivamente. Con un aumento de la temperatura del aire de 17,5 °C y 24,4 °C promedios.

Los últimos dos días del periodo, 26 ºC y 27 ºC de julio, la temperatura de salida estuvo por encima de los 57 °C, llegando a los 60 ºC el 26 de julio. El 21 de julio se estuvo haciendo mantenimiento de los aparatos de medición y del caloventor, por eso las curvas se muestran de esa forma.

Periodo del 01 de agosto al 19 de agosto: A partir del día 01 de agosto, se ensayó con el último flujo másico (de 0,027 Kg/s). Este nuevo flujo se mantuvo hasta finalizar el ensayo el día 19 de agosto. En este periodo se utilizó como energía auxiliar para la temperatura de entrada, dos velas de cuarzo. En la Figura 5.38 se muestran las temperaturas medidas. Los días 1 y 2 de agosto se realizaron las medidas conectando las velas de cuarzo a la entrada del colector. La temperatura de salida llego hasta los 67,3 ºC cuando la entrada media 47,2 ºC. Con un promedio de salto térmico de 27,1 °C.

Para los días 18 y 19 de agosto, los máximos en la temperatura de salida medida se mantuvieron por encima de los 50,4 °C. Con temperaturas de entrada de hasta 21,5 °C. Con un promedio de salto térmico de 24,8 °C para ambos días.

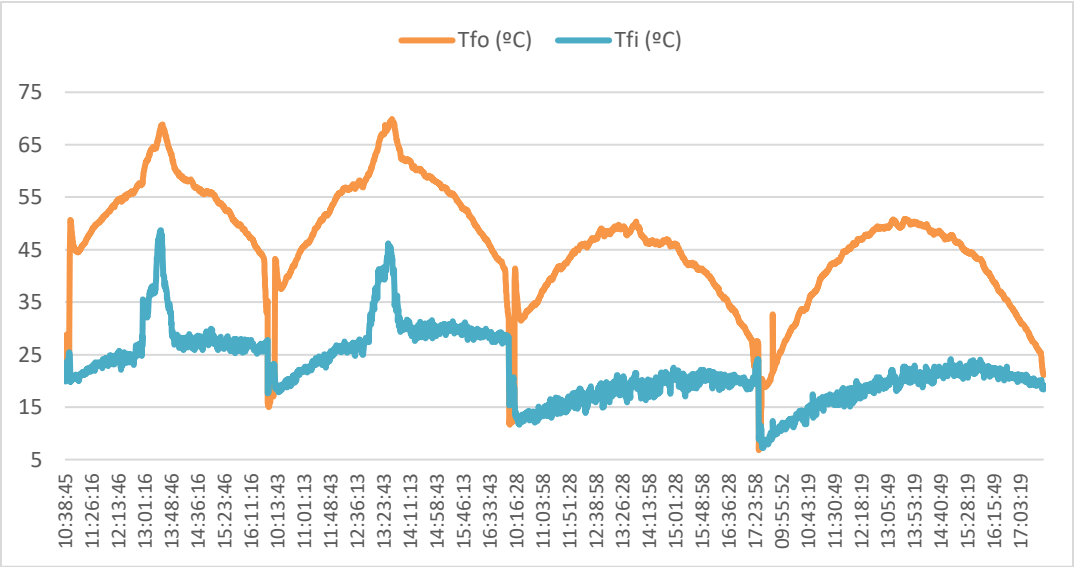


Fig. 5.38: Evolución temporal del tercer periodo de las temperaturas de entrada, Tfi, y salida, Tfo, del colector. Con un flujo másico de 0,027 Kg/s.

El flujo masico, en comparación con el caloventor, no tuvo cambios apreciables a la hora de usar la energía auxiliar provistas por las velas de cuarzo.

5.8.4 Obtención de la energía útil generada por el colector

Periodo de 01 de junio al 30 de junio: En la Figura 5.39 se presentan los valores instantáneos calculados de la energía útil, Qu, generada por el colector con los de irradiancia solar global, Gp, sobre el plano del colector. Estos valores fueron obtenidos mediante la Ecuación (5.60).

El comportamiento de la energía útil generada el primer día, va de la mano con la radiación incidente, ya que ese día estuvo parcialmente nublado. El segundo día de ensayo nos percatamos que el flujo había bajado por una caída de tensión en la red. El día 16 de agosto estuvo parcialmente nublado. Los demás días de ensayos fueron claros.

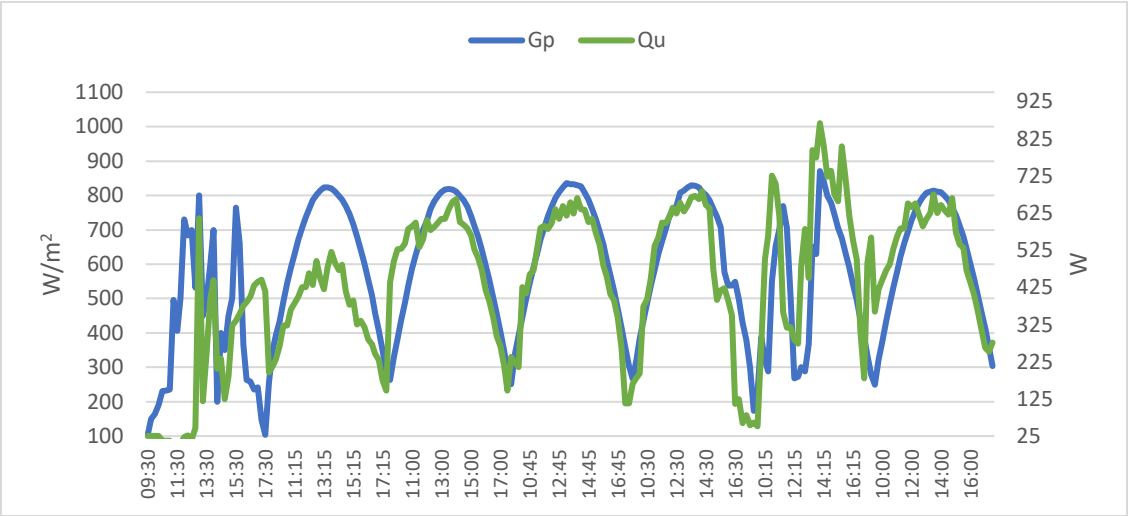


Fig. 5.39. Valores medidos de energía útil, Qu, producida por el colector y de irradiancia solar global, Gp, sobre el plano del colector para el primer periodo. Con un flujo másico de 0,021 Kg/s.

Analizando sólo los días de funcionamiento sin calentamiento convencional, desde las 9:30 hs. y hasta las 17:30 hs. se obtuvieron los siguientes valores:

El día 01 la energía útil alcanzó un máximo de 611 W cuando la irradiancia solar era de 800 W/m^2, generando durante el día una energía térmica total de 6,06 MJ.

El día 06 la energía útil alcanzó un máximo de 521 W cuando la irradiancia solar era de 811 W/m^2, generando durante el día una energía térmica total 10,6 MJ.

El día 08 la energía útil alcanzó un máximo de 663 W cuando la irradiancia solar era de 790 W/m^2, generando durante el día una energía térmica total de 15,2 MJ.

El día 13 la energía útil alcanzó un máximo de 666 W cuando la irradiancia solar era de 820 W/m^2, generando durante el día una energía térmica total de 14,3 MJ.

El día 15 la energía útil alcanzó un máximo de 684 W cuando la irradiancia solar era de 825 W/m^2, generando durante el día una energía térmica total de 13,2 MJ.

El día 16 la energía útil alcanzó un máximo de 867 W cuando la irradiancia solar era de 840 W/m^2, generando durante el día una energía térmica total de 15,6 MJ.

El día 30 la energía útil alcanzó un máximo de 676 W cuando la irradiancia solar era de 810 W/m^2, generando durante el día una energía térmica total de 15,4 MJ.

Periodo de 01 de julio al 27 de julio: En la Figura 5.40 se presentan los valores instantáneos calculados de la energía útil, Qu, generada por el colector con los de irradiancia solar global, Gp, sobre el plano del colector. Estos valores fueron obtenidos mediante la Ecuación (5.60) con un flujo masico de 0.025 kg/s.

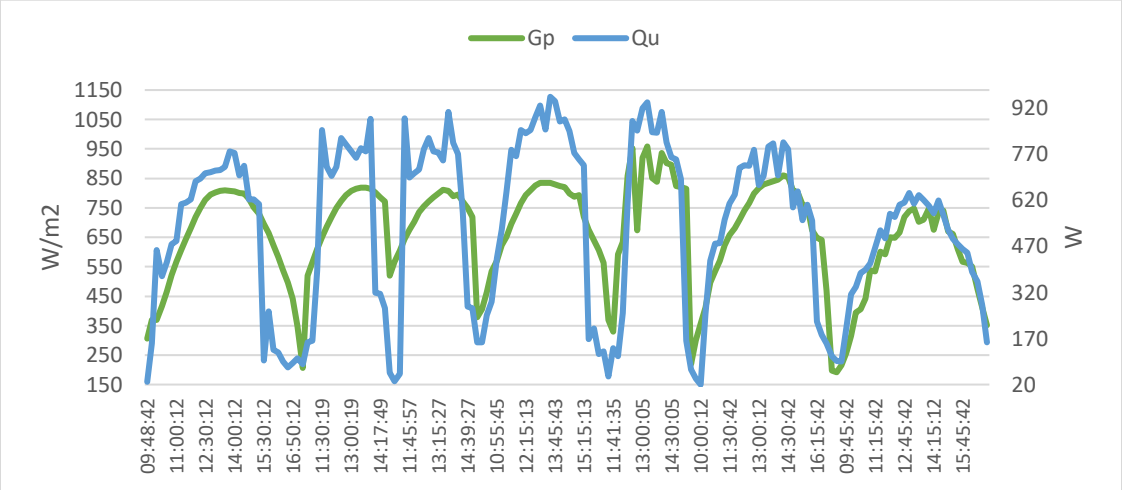


Fig. 5.40. Valores medidos de energía útil, Qu, producida por el colector y de irradiancia solar global, Gp, sobre el plano del colector para el segundo periodo. Con un flujo másico de 0,025 Kg/s.

Los días 12 y 15 las medidas comenzaron pasadas las 11 hs y hasta las 14:30 hs. El 21 estuvo parcialmente nublado, mientras que el 19 hubo viento cálido lo que hizo que se reduzcan las perdidas por la temperatura ambiente. El día 01 desde las 15:30 hs hubo un inconveniente con la conexión de las termocuplas por eso la curva de energía útil presenta esa caída brusca. Los días 26 y 27 estuvieron nubosos, esto hizo que baje la producción de energía útil del colector.

El día 01 la energía útil alcanzó un máximo de 775 W cuando la irradiancia solar era de 801 W/m^2, generando durante el día una energía térmica total de 13,6 MJ.

El día 12 la energía útil alcanzó un máximo de 886 W cuando la irradiancia solar era de 817 W/m^2, generando durante el día una energía térmica total 9,1 MJ.

El día 15 la energía útil alcanzó un máximo de 908 W cuando la irradiancia solar era de 808 W/m^2, generando durante el día una energía térmica total de 18,8 MJ.

El día 19 la energía útil alcanzó un máximo de 958 W cuando la irradiancia solar era de 836 W/m^2, generando durante el día una energía térmica total de 24,4 MJ.

El día 21 la energía útil alcanzó un máximo de 810 W cuando la irradiancia solar era de 848 W/m^2, generando durante el día una energía térmica total de 15 MJ.

El día 26 la energía útil alcanzó un máximo de 867 W cuando la irradiancia solar era de 840 W/m^2, generando durante el día una energía térmica total de 14 MJ.

El día 27 la energía útil alcanzó un máximo de 644 W cuando la irradiancia solar era de 702 W/m^2, generando durante el día una energía térmica total de 13,02 MJ.

Periodo de 01 de agosto al 19 de agosto: En la Figura 5.41 se presentan los valores instantáneos calculados de la energía útil, Qu, generada por el colector con los de irradiancia solar global, Gp, sobre el plano del colector. Estos valores fueron obtenidos mediante un flujo masico de 0.027 kg/s.

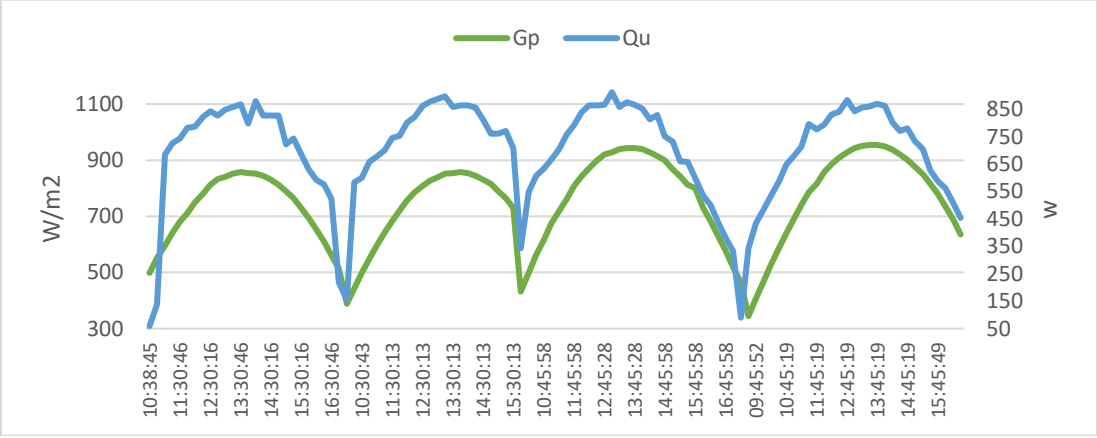


Fig. 5.41.: Valores medidos de energía útil, Qu, producida por el colector y de irradiancia solar global, Gp, sobre el plano del colector para el tercer periodo. Con un flujo másico de 0,027 Kg/s.

El día 01 la energía útil alcanzó un máximo de 880 W cuando la irradiancia solar era de 845 W/m^2, generando durante el día una energía térmica total de 16,05 MJ.

El día 02 la energía útil alcanzó un máximo de 898 W cuando la irradiancia solar era de 838 W/m^2, generando durante el día una energía térmica total 15,55 MJ.

El día 18 la energía útil alcanzó un máximo de 912 W cuando la irradiancia solar era de 940 W/m^2, generando durante el día una energía térmica total de 18,15 MJ.

El día 19 la energía útil alcanzó un máximo de 883 W cuando la irradiancia solar era de 912 W/m^2, generando durante el día una energía térmica total de 18,14 MJ.

Calefacción del prototipo habitacional: Durante el 18 y 19 de agosto se realizó la calefacción con el colector, de un prototipo habitacional cito en el campus de INENCO-UNSa. El colector solar calentador de aire fue instalado horizontalmente sobre la fachada norte de un prototipo habitacional. El local es edificio construido con envolventes de ladrillo cerámico de 0,15 m de espesor revocado hacia el interior, el techo es de chapa galvanizada y el piso de platea de hormigón de 0,10 m de espesor sobre suelo de tipo sedimentario. No posee aislación térmica en paredes, ni piso, ni en techo. Estos materiales son los que comúnmente se utilizan en la construcción de viviendas. En la Figura 5.42 se muestra el colector en operación. El mismo está tomando aire del ambiente exterior y calefacciona el prototipo habitacional.



Fig. 5.42: colector calefaccionando el prototipo habitacional.

En la Figura 5.43 se muestra la evolución de las temperaturas de entrada al colector T_{fi}, temperatura salida del colector que coincide con la entrada de la habitación T_{fo}, la temperatura ambiente T_a y la temperatura interior T_{int} de la habitación.

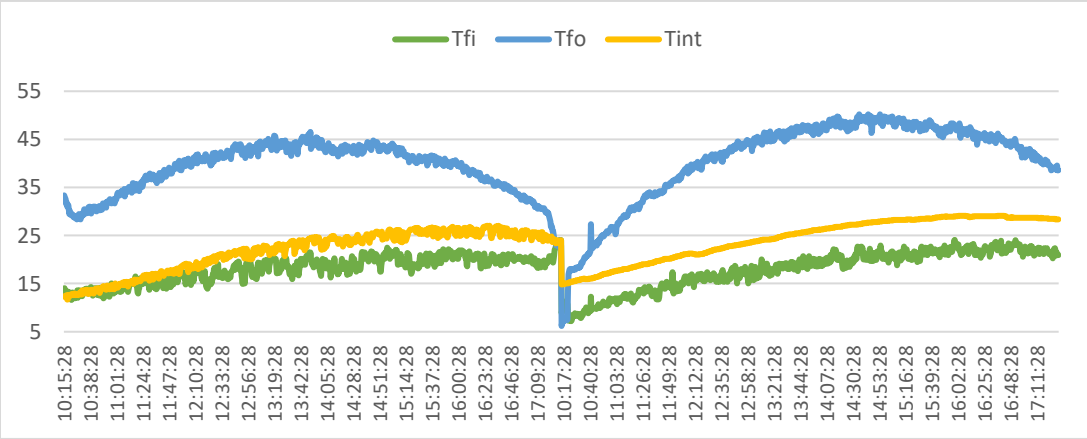


Fig. 5.43: Evolución de las temperaturas del colector y del prototipo habitacional.

Por lo visto en el gráfico de la Figura 5.43, el prototipo habitacional se mantuvo dentro de la temperatura de confort durante las horas en que se estuvo habitando el edificio. Las temperaturas interiores estuvieron entre 18 °C y 28 °C para el segundo día, mientras que el primer día estuvo entre los 15 °C y 25 °C. En los dos días de este ensayo la temperatura ambiente estuvo entre 7 °C y 23 °C de máxima.

5.8.5 Rendimiento diario del colector de matriz porosa

Considerando los días de funcionamiento bajo condiciones normales (sin las velas de cuarzo ni el caloventor que disipen calor en la entrada), se elaboró la Tabla 5.6. En ella se detallan, para cada día, los valores de la eficiencia diaria del colector (η_d).

Tabla 5.6: Eficiencia diaria del colector en porcentajes para los 3 periodos de monitoreo.

Dia	η_d [%]	Dia	η_d [%]	Dia	η_d [%]
1-jun	29.3	1-jul	43.0	1-ago	54.9
6-jun	33.3	12-jul	47.0	2-ago	60.0
8-jun	48.0	15-jul	60.9	18-ago	51.1
13-jun	44.4	19-jul	51.4	19-ago	52.1
15-jun	41.5	21-jul	74.8		
16-jun	58.7	26-jul	45.9		

30-jun	48.8	27-jul	47.7

Se muestra en un gráfico combinando los valores integrados de la energía térmica e irradiación solar sobre el plano del colector. En las Figuras 5.44, 5.45 y 5.46 se comparan la energía disponible sobre el plano del colector frente a la energía generada. Notamos que a medida que el flujo másico va aumentando los valores de energía producidos diariamente son más altos.

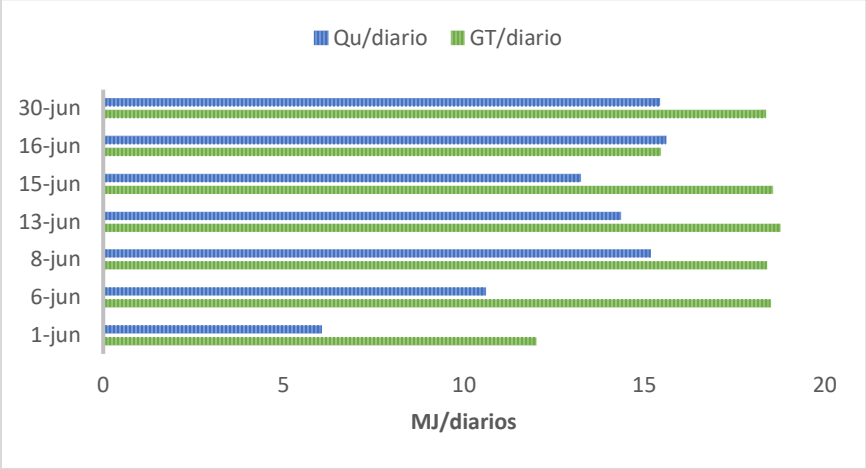


Fig. 5.44: Comparación entre la energía disponible y la energía generada por el colector, correspondiente a un flujo másico de 0,021 Kg/s.

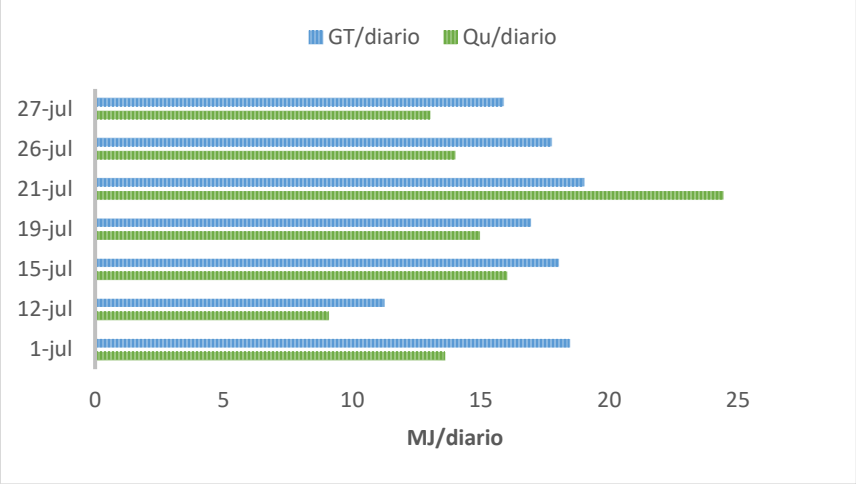


Fig. 5.45: Comparación entre la energía disponible y la energía generada por el colector, correspondiente a un flujo másico de 0,025 Kg/s.

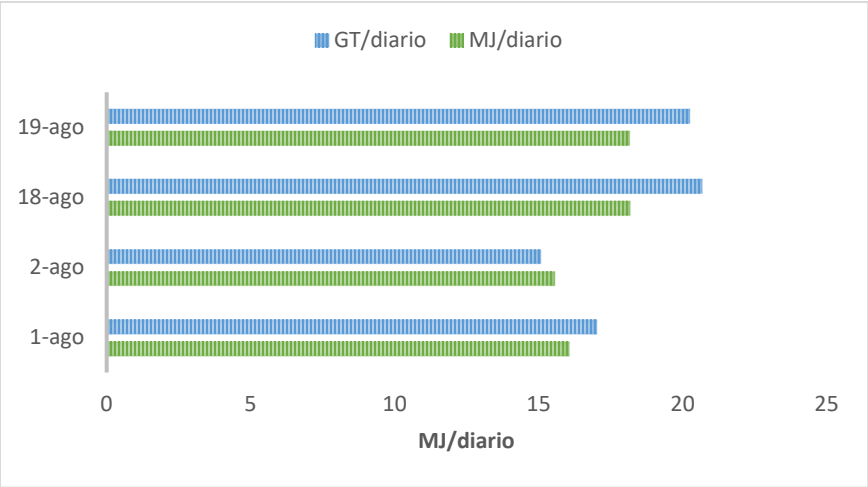


Fig. 5.46: Comparación entre la energía disponible y la energía generada por el colector, correspondiente a un flujo másico de 0,027 Kg/s.

De las figuras anteriores se observa que la energía térmica producida por el colector es cercana al 70 % de la disponible sobre un plano sobre la cubierta del mismo. Además, se ve como esta energía va creciendo ligeramente conforme los días del ensayo van transcurriendo. La energía disponible también cambia en el mismo sentido, casi a la misma tasa de cambio.

Se mejoro la eficiencia de colección al incrementar el flujo másico del aire circulante y sumado a la doble aislación se disminuyeron las perdidas.

5.8.6 Clasificación del sistema de calentamiento

Se analiza cómo se clasifica el sistema solar ensayado según la fuente de energía convencional utilizada para impulsar el aire dentro del colector. Para ello, se realiza el siguiente cociente:

$$\frac{Energía\ auxiliar\ consumida}{Energía\ manejada\ por\ el\ sistema}$$

Cuando esta razón es muy pequeña el sistema es Híbrido y; si es muy grande, el sistema se clasifica como Activo.

Con un consumo de potencia eléctrica de 30 W (consumo del extractor de aire), resulta que, durante las horas de operación del equipo (10 hs a 17 hs), se consumió una cantidad de energía eléctrica de:

$$30\ \frac{J}{s}\ x\ 7\ hs\ x\ 3600\frac{s}{hs} = 756.000\ J = 0{,}76\ MJ$$

Con una energía Qu promedio generada de los tres periodos invernales (junio-julio-agosto) de 15 MJ, el cociente antes presentado da:

$$\frac{0{,}76\ MJ}{15\ MJ} = 0{,}05$$

Este es un valor muy pequeño, que corresponde a una utilización de energía auxiliar del 5 %. Por tanto, el sistema de calentamiento solar ensayado es un Sistema Hibrido.

5.8.7 Evolución de la temperatura en un día nublado

Para el día 25 de febrero del 2022 se realizó la toma de las medidas de las temperaturas del colector. Este día presento radiaciones solares por debajo de los 130 W/m^2, temperaturas ambientes promedio de 22 °C, Figura 5.47. El día estuvo completamente nublado durante las mediciones, pero aun así la temperatura del colector llego a los 61 °C en la curva y unos 57 °C en la placa absorbedora. Mientras que la matriz porosa se mantuvo entre los 30 °C y los 36 °C.

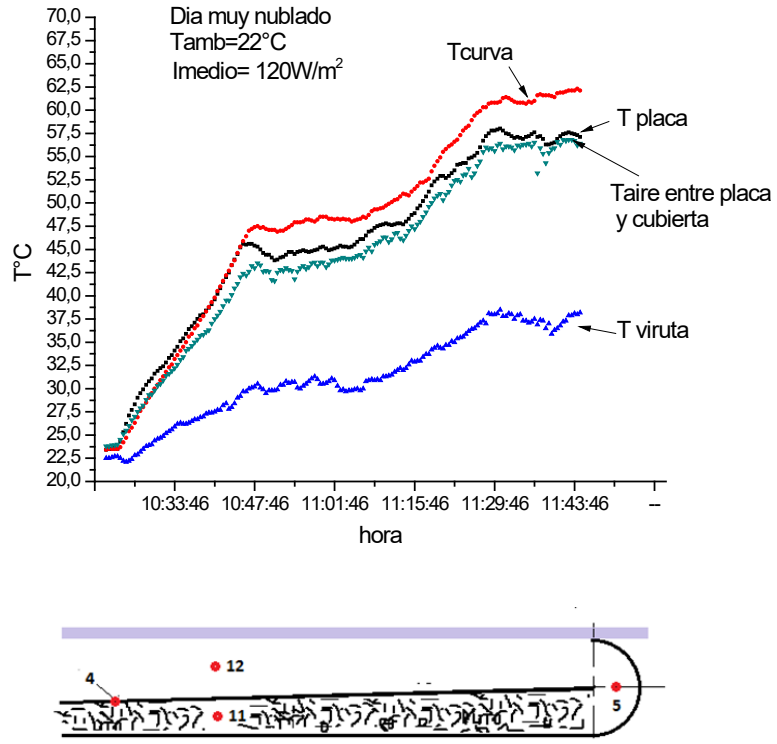


Fig. 5.47: Mediciones de un día totalmente nublado y ubicación de las termocuplas.

5.8.8 Variación de la temperatura del aire a lo largo del colector

Con el objeto de evaluar la variación de la temperatura del aire a lo largo del colector, se representaron gráficamente los valores medidos por 4 termocuplas en función de la distancia desde la entrada hasta la salida del colector. Observando la Figura 5.48, a los 0,1 m esta la termocupla de entrada T_1, a los 0,96 m esta la termocupla entre la placa absorbedora y la cubierta T_{12}, a los 2,88 m la termocupla donde está la matriz porosa T_{11} y finalmente la termocupla a la salida del colector T_2.

Cada curva presentada corresponde a un día distinto en el período 05/08-19/08 y al mediodía solar a fin de comparar el cambio en la temperatura de salida con el cambio en el movimiento aparente del sol sobre la bóveda celeste. Como sólo se cuenta con medidas a distancias discretas, se generó una curva logarítmica de tendencia potencial, para representar el posible comportamiento de la temperatura.

En la Figura 5.48 se pueden observar las curvas de tendencia obtenidas de las evoluciones de las temperaturas de aire.

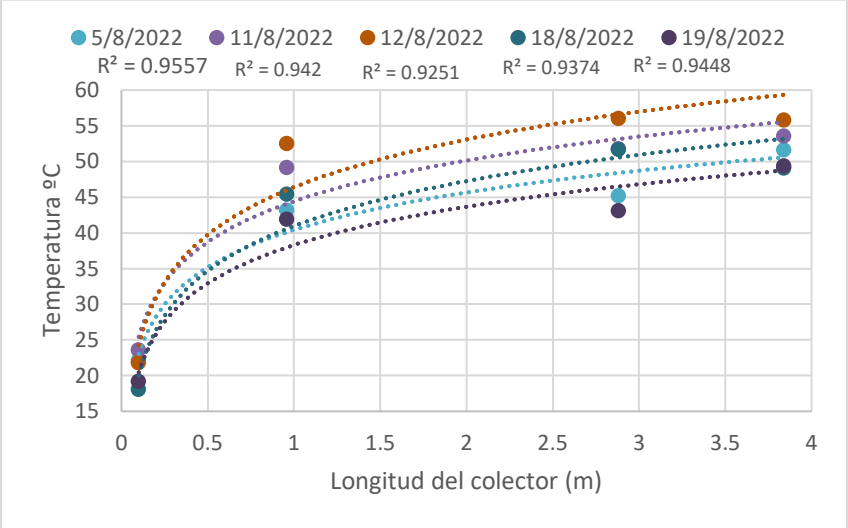


Fig. 5.48: Evolución de la temperatura del aire dentro del colector. Para un flujo másico de 0,027 Kg/s.

Se puede observar que los coeficientes R^2 de todas las curvas logarítmicas son mayores a 0,93.

5.9 Determinación de la curva de eficiencia instantánea

Para estimar la energía útil que puede generar un colector es necesario determinar la curva de eficiencia del mismo. Esto implica conocer la ubicación geográfica y las condiciones meteorológicas del lugar donde ha de ser instalado. La obtención de esta curva permite estimar el calor útil generado por el equipo y la temperatura del aire en la salida del mismo (López, 2018).

Para obtener la curva de eficiencia de un colector solar, primero, se debe poner en operación el equipo durante todo un día (durante las horas de Sol). Luego, se construye una gráfica con los valores de eficiencia instantánea en el eje de las ordenadas en función de la variable $(T_{fi}-T_a)/G_p$. Una vez realizado esto, se obtiene una distribución de puntos en el plano cartesiano. Dichos datos no son suficiente para obtener una curva representativa y el ensayo debe extenderse a varios días de mediciones. Para aumentar la dispersión de estos puntos, se utiliza calentamiento

auxiliar en el aire de entrada del colector, esto aumenta el valor del cociente $(T_{fi}-T_a)/G_p$, permitiéndonos mover hacia la derecha del eje de las abscisas.

El colector de esta Tesis se ensayó según lo exigido por la norma ASHRAE 93-2003. Los datos para la construcción de dicha gráfica fueron extraídos del funcionamiento del dispositivo en horas alrededor del mediodía solar. Es decir, comenzando media hora antes del mediodía solar y finalizando media hora después del mismo (se tomaron cada 10 minutos los valores). Esto debe ser así, ya que la norma exige que la radiación sea lo más constante posible durante la prueba del equipo. Debido al cambio continuo de la trayectoria del sol durante el año, la hora del mediodía solar fue alterándose en el transcurso del ensayo.

El posicionamiento del Sol también va modificándose durante el trascurso de un día, es por ello que se genera una dispersión en los datos medidos a causa de las variaciones de los parámetros U_L, F_R y $(\tau\alpha)$. Por tanto, para obtener la curva de eficiencia instantánea del colector se debe aplicar un ajuste por regresión lineal a los datos en la nube de puntos medidos. La intersección de esta recta con el eje de las ordenadas representa al producto $F_R(\tau\alpha)$ mientras que la pendiente de la curva representa al producto F_RU_L. Estos dos parámetros "describen" el funcionamiento del colector, ya que FR $(\tau\alpha)$ es un indicador de la energía solar absorbida y F_RU_L un indicador de las pérdidas de energía térmica hacia el exterior (López, 2018).

Hay que tener en cuenta que los paramentos que definen la curva de eficiencia ($F_R(\tau\alpha)$ y F_RU_L), tienen un valor particular para las condiciones de ensayo e intervalo del año en los que se los obtiene. Por tanto, es óptimo operar el equipo, en lo posible, durante días consecutivos. En el ensayo realizado en esta Tesis se trató de hacer esto último.

Debe también considerarse que algunos puntos como la radiación de algunos días, se deben a la presencia de nubes aisladas, que provocaron un descenso de la radiación incidente por breves intervalos de tiempo. Sin embargo, por la inercia térmica del sistema esta disminución de la potencia de entrada no influyó de manera significativa en el salto de temperatura del aire al a través el colector. Esto implica que, durante el intervalo de tiempo dentro del cual se presentaron las anomalías en

la radiación, el calor útil entregado por el colector varió en forma continua mientras que la energía de entrada presentó disminuciones abruptas, por lo cual la eficiencia en esos instantes pareciera tener valores mucho mayores que los presentados en el resto del intervalo, estos puntos se descartaron.

Por último, podemos mencionar que la eficiencia puede decrecer con el tiempo (suficientemente largo) debido al deterioro de la superficie del absorbedor y al desgaste de la cubierta.

5.9.1 Curva de eficiencia obtenida

Periodo del 01 de junio al 30 de junio: En la Figura 5.49 se grafican los puntos obtenidos. Los puntos elegidos para trazar la recta de eficiencia fueron los pertenecientes a días claros, el coeficiente de determinación (R^2) tiene un valor aproximado de 0,82. La curva de ajuste, para este prototipo y para este periodo, dio un valor máximo de eficiencia del 45 % con pérdidas térmicas globales aproximadamente de 5,795 W/m^2 por cada °C de diferencia entre la temperatura del aire de entrada y del ambiente exterior.

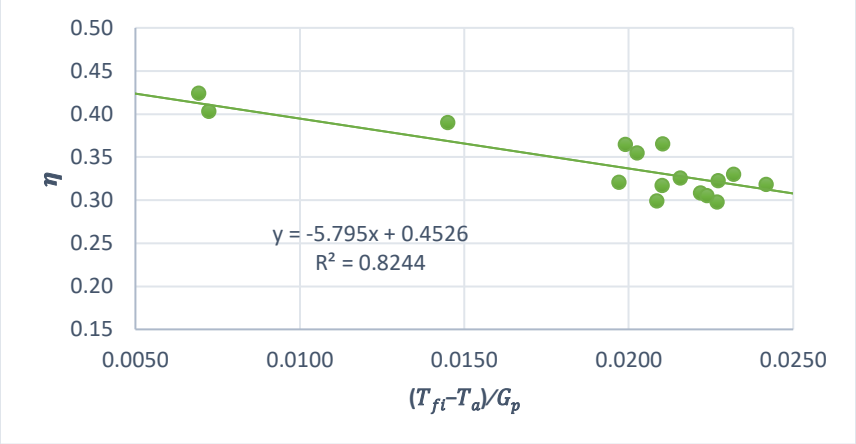


Fig. 5.49: Curva de eficiencia instantánea del colector cuña de malla porosa para el flujo másico de 0,021 Kg/s.

La ecuación de la curva de eficiencia instantánea de este periodo es la siguiente:

$$\eta_i = 0{,}4526 - 5{,}795\left(\frac{T_{fi}-T_a}{G_p}\right) \tag{5.78}$$

Periodo del 01 de julio al 27 de julio: En este periodo también se ensayó el colector según lo exigido por la norma ASHRAE. El caudal fue mayor (un 19 %) que en el periodo anterior y el ángulo de incidencia igual. Como consecuencia se obtuvo un coeficiente $F_R(\tau\alpha)$ un poco mayor.

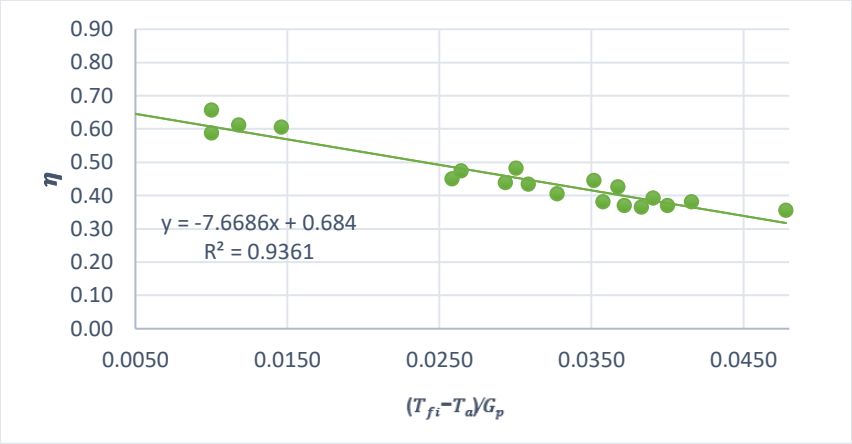


Fig. 5.50: Curva de eficiencia instantánea del colector cuña de malla porosa para el flujo másico de 0,025 Kg/s.

El valor de F_RU_L también resulto mayor en este caso, Figura 5.50. Una posible explicación para esto se encuentra en el factor F_R el cual depende directamente del flujo másico. Además, dado el avance en la época del año (una mayor radiación sobre el plano de la cubierta) es razonable este aumento. Por lo tanto, es de esperar un aumento tanto en la pendiente como en la ordenada de la curva. El valor de ajuste R^2 en este caso nos dio del orden de 0,94, mejor que la del periodo anterior. La ecuación obtenida es la siguiente:

$$\eta_i = 0{,}684 - 7{,}6686\left(\frac{T_{fi}-T_a}{G_p}\right) \tag{5.79}$$

Periodo del 01 de agosto al 19 de agosto: Por último, se ensayó con un flujo másico de 0,027 Kg/s (28 % más que primer periodo) durante un total de cuatro días de medidas alrededor del mediodía solar. La Figura 5.51 muestra la curva de ajuste encontrada.

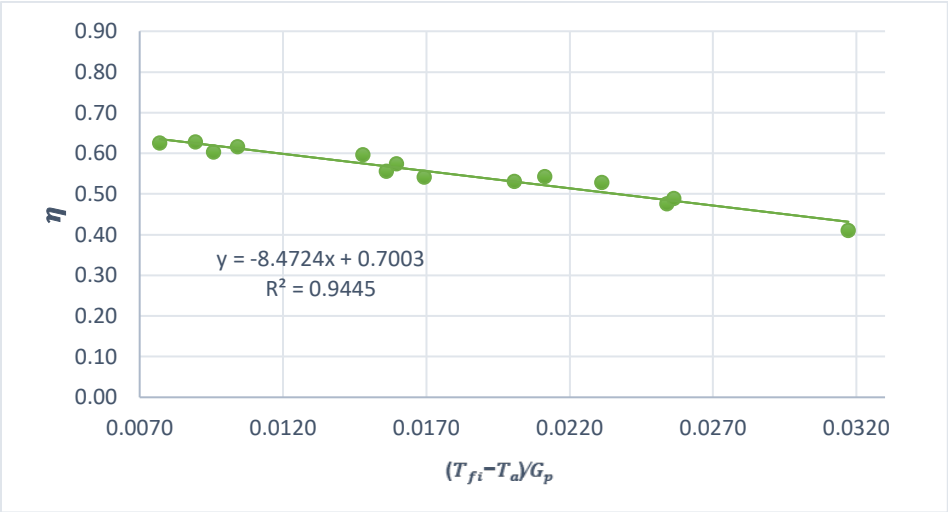


Fig. 5.51: Curva de eficiencia instantánea del colector cuña de malla porosa para el flujo másico de 0,027 Kg/s.

En este caso el ajuste por el R^2 tiene el mejor valor encontrado, de aproximadamente 0,95. Se observa que ordenada y pendiente aumentaron respecto al caso anterior. Una explicación del aumento en la ordenada se debe al aumento del flujo másico para estos días. Como F_R también aumenta al mismo tiempo como consecuencia directa. La ecuación de la recta se presenta a continuación:

$$\eta_i = 0{,}7003 - 8{,}4724\left(\frac{T_{fi}-T_a}{G_p}\right) \tag{5.80}$$

En conclusión, encontramos las tres curvas (rectas) de eficiencia para los tres flujos de aire presentados, con valores del coeficiente de determinación R^2 superiores a 0,83, es decir, con una tendencia claramente lineal. Podemos decir que estas tres curvas deberían predecir con buena precisión el comportamiento termo energético de este colector para condiciones similares a las ensayadas.

5.10 Conclusiones del capitulo

En este trabajo se presentó el diseño y evaluación termo-energética de un nuevo prototipo de colector solar calentador de aire que posee como elemento absorbedor una placa negra en forma de cuña y una matriz porosa selectiva de acero reciclado con factor de huecos o porosidad del 96 %, determinada experimentalmente (López, 2018).

Este trabajo tenía como principal objetivo proponer una alternativa para la reducción del consumo de la energía convencional destinada a la calefacción de viviendas de interés social. Esta alternativa consiste en la utilización del colector solar calentador de aire de flujo en contracorriente de matriz porosa metálica debajo del absorbedor, presentado en esta Tesis. Para ello, se ha diseñado, construido y puesto en marcha un prototipo de dicho colector en el cual se han estudiado en detalle los parámetros operativos más relevantes. El ensayo consistió en el monitoreo de un proceso de calentamiento solar de aire ambiente a diferentes flujos de aire el cual arrojó resultados positivos.

El valor de eficiencia obtenido en esta Tesis es conservativo, ya que el colector está pensado como un módulo de un sistema cerrado incluyendo un edificio en donde las condiciones reales de funcionamiento serán más favorables que las ensayadas a circuito abierto según lo demostraron (Quiñonez y Hernández, 2012).

En este capítulo se diseñó, ensayó y caracterizó un novedoso prototipo de colector calentador de aire de matriz porosa y absorbedor en forma de cuña. El material poroso fue reciclado de distintos talleres de tornería de la cuidad de Salta. El flujo de aire fue forzado a circular por el equipo mediante un ventilador de 30 W de potencia ubicado a la salida del mismo, circulando el aire dentro del colector por succión. Se evaluó su comportamiento térmico operándolo durante la época invernal en la cuidad de Salta. Estuvo orientado hacia el Norte con una inclinación de 39°.

El prototipo desarrollado fue monitoreado por medio de adquisidores de datos especializados para la complejidad de esta tarea. El colector fue operado a tres velocidades de aire diferentes (1,7; 2,05 y 2,23 m/s). Se encontró que la eficiencia térmica instantánea máxima, para un flujo másico de 0,027 Kg/s (2,23 m/s), es del 70 %, valor muy aceptable y alto para un colector calentador de aire. Para los flujos másicos de 0,025 Kg/s y 0,021 Kg/s (2,03 y 1,7 m/s) la eficiencia térmica instantánea máxima encontrada fue del 68 % y 45 % aproximadamente.

En condiciones normales de funcionamiento el incremento de temperatura a lo largo del colector fue entre 19 °C y 33 °C, la temperatura máxima alcanzada por el aire a la salida del colector fue de 55,8 °C para una temperatura de entrada de 21,8 °C. En cuanto a la energía útil, el valor máximo alcanzado fue de 958 W cuando la irradiancia solar era de 836 W/m^2. Los distintos puntos de trabajo obtenidos durante el ensayo determinaron que la curva de eficiencia instantánea limita su valor máximo al 70 % con pérdidas térmicas globales del orden de 8,47 $W/m^2°C$ para el flujo másico de 0,027 Kg/s.

El calor útil diario generado fue de 24,4 MJ; 18,2 MJ y 15,6 MJ, para los flujos de aire ensayados de 0,025 kg/s, 0,027 kg/s y 0,021 kg/s respectivamente. La eficiencia diaria obtenida, en promedio, fue del orden del 55 % para el mayor flujo y del 53-44 % para los flujos menores.

Se graficó el cambio de la temperatura del aire desde la entrada hasta la salida del colector. De acuerdo a los resultados obtenidos se puede optimizar el comportamiento del colector incrementando la longitud el mismo manteniendo el mismo flujo de aire.

El prototipo habitacional calefaccionado estuvo con temperatura de confort en todas las horas de trabajo que se la ocupo. Los valores de eficiencia térmica instantánea encontrados, indican una muy buena performance termo-energética del prototipo desarrollado, siendo conveniente operarlo con un flujo másico superior a 0,025 Kg/s. En cuanto al mecanismo de energía auxiliar para el aumento de la temperatura de entrada del colector, no hubo una diferencia significativa en el uso, entre en el caloventor y las velas de cuarzo. Finalmente, cabe destacar la fabricación de la caja soporte del colector, las cuales fueron fabricadas con soleras galvanizadas de bajo costo y muy bajo peso. La doble aislación contribuyo enormemente a reducir las pérdidas térmicas que dieron entre 5 y 8 $W/m^2°C$.

Capítulo 6

SIMULACION DEL COMPORTAMIENTO TERMO-ENERGÉTICO DE UNA VIVIENDA SOCIAL

6.1 La influencia del ambiente sobre la vivienda y el hombre: confort térmico

Una de las primeras razones por las cuales una vivienda debe ser una protección a la acción del clima exterior es para mantenerse en el interior condiciones de confort. El confort es uno de los objetivos de la arquitectura bioclimática.

Existen interconexiones entre el cuerpo humano, la vivienda y el clima de tal manera que es necesario conocer el intercambio de energía del cuerpo humano, el confort térmico y luego las estrategias que se adaptan a cada clima (Esteves, 2017). Las personas siempre generamos calor corporal que debemos eliminar al medio ambiente. Para ello este calor atraviesa 3 capas entre nuestro cuerpo y el medio ambiente: 1º nuestra piel, 2º la vestimenta, y si estamos en el interior, la envolvente de la vivienda sería la tercera capa. Una definición del confort es un "sentimiento de bienestar". Sin embargo, la experiencia más común en el confort térmico es no siendo conscientes de cómo estamos entregando calor al ambiente que nos rodea. Hay tres categorías de factores que afectan al confort: personales, ambientales medibles y psicológicas. Los factores personales son aquellos que podemos modificar personalmente como la vestimenta, metabolismo y migración. Los factores ambientales medibles son temperaturas superficiales, humedad relativa, velocidad de aire, nivel de iluminación, etc. Los factores psicológicos no son tan fáciles de medir como el color, textura, aroma, humor entre otros. El confort térmico se refiere a situar a la persona en un interior con factores ambientales medibles dentro de lo que se denomina rangos de confort térmico (para la temperatura interior de la vivienda entre 18 ºC a 25 ºC).

6.1.1 Producción de energía del ser humano

La tasa a la cual generamos calor o dicho de otra manera tasa de metabolismo, depende fundamentalmente de nuestro nivel de actividad muscular,

ya que no serán las mismas condiciones de confort para una oficina, para un hospital o para un gimnasio. El calor producido es medido en unidades de metabolismo o *met* (1 met=58,2 W/m^2), que es la energía que entrega una persona sentada en reposo al ambiente que la rodea, por unidad de superficie de piel (Miranda, 2007). En la Tabla 6.1 se detallan los niveles de metabolismos de diferentes actividades.

Tabla 6.1: Nivel de metabolismo en función de la tarea realizada.

Actividad	**Nivel de actividad**	
	[met]	[W/m^2]
Durmiendo	0,7	40
Reclinado	0,8	46
Sentado quieto	1,0	58,2
Parado, relajado	1,2	69,89
Caminando 3,2 km/h	2,0	116,4
Caminando por una pendiente 15% a 1,6 km/h	2,9	170
Ídem 25% a 3,2 km/h	6,7	390
Trabajo en panadería, atendiendo	1,4-2,0	82-116
Cervecería (llenando botellas)	1,2-2,4	70-140
Carpintería: accionando una máquina de aserrar	1,8	105
Carpintería: serruchando	4-4,8	116-280
Taller mecánico	2,2-2,9	128-168
Laboratorio trabajo general	1,6	92
Trabajo doméstico: limpieza	2-3,4	116-200
Cocinar	1,5-2	70-116,4
Trabajo de oficina: tipiado eléctrico	0,9	53
Lavarse, afeitarse, vestirse	1,7	100
Bailar	2,4-4,3	140-250

Mientras más activos estamos mayor cantidad de calor genera nuestro cuerpo y debemos eliminar al medio ambiente. En la Figura 6.1 se muestra un esquema de como interactúan las diferentes formas de transferencia de calor en una persona.



Fig. 6.1: Balance térmico de un ambiente térmico donde esta una persona interactuando. Fuente: www.dspace.uazuay.edu.ec

Si llamamos (M) a la cantidad de calor producida por la actividad metabólica de nuestro cuerpo durante una unidad de tiempo dada tendremos confort o bienestar térmico cuando se satisfaga la siguiente Ecuación (6.1):

$$M = \pm C \pm K \pm R \pm E \tag{6.1}$$

Nuestro cuerpo cede calor al entorno de diversas formas:

- Al aire por convección (C), dependiendo de la temperatura y velocidad del aire;
- Por conducción (K) con cuerpos sólidos con los que está en contacto directo, como el suelo, y esto depende de las temperaturas de los cuerpos con los que está en contacto;
- Por radiación (R) del cuerpo a las diversas superficies "vistas" (o sea, en contacto visual), dependiente de la temperatura de dichas superficies;
- Por intercambio de calor por evaporación y transpiración (E), dependiente de la temperatura y de la humedad del aire.

- +o- indican que todos los intercambios pueden producirse por ganancia o pérdida. En la Figura 6.2 se detallan el balance energético del cuerpo humano.

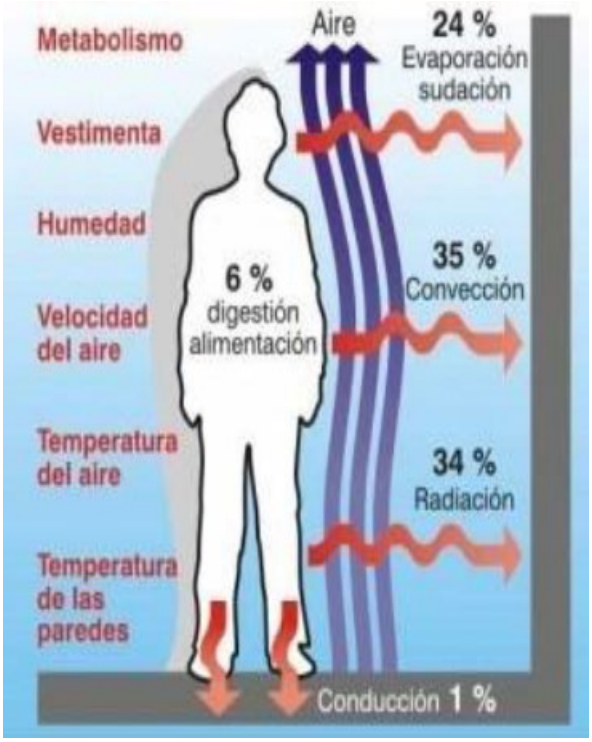


Fig. 6.2: Confort: balance energético del cuerpo humano.

El cuerpo humano, debido a su actividad metabólica, produce constantemente calor. Nuestro organismo necesita permanecer a una temperatura casi constante para conservarse saludable. En consecuencia, el calor producido debe ser cedido al ambiente con el mismo ritmo con que se genera. Si nuestro cuerpo pierde más calor que el que genera nos enfriamos; en cambio, si perdemos menos calor que el que generamos, la temperatura de nuestro cuerpo subirá.

6.1.2 Vestimenta

El nivel de vestimenta afecta a confort térmico generando conservación de energía y permitiendo que la transferencia de calor al medio se realice más lentamente. El nivel de vestimenta se mide en unidades de resistencia térmica *cló* (1 cló=0,155 $°Cm^2/W$) y corresponde a vestimenta de oficina: traje con camisa, ropa interior, medias y zapatos (Esteves, 2013). La Tabla 6.2 muestra los valores de niveles de vestimenta para cada prenda.

Tabla 6.2: Resistencia térmica del nivel de vestimenta para distintas situaciones.

Nivel de vestimenta	Valor [cló]
Sin ropa	0,0
Con malla	0,1
Con sandalias, bermudas y remera	0,3
Con zapatos, pantalón y remera	0,5
Con zapatos, traje y camisa	1,0
Con zapatos, traje, camisa y campera	1,5
Con ropa polar	3,0

La cantidad de ropa que viste un individuo afecta proporcionalmente a la sensación de confort.

6.1.3 Diagramas de confort

La humedad relativa es de menor importancia en condiciones de clima frio, donde las pérdidas de calor por conducción, convección y radiación son dominantes, pero es fundamental en los climas cálidos (dominan los intercambios evaporativos). El confort térmico de la persona en una vivienda es definido a partir de la temperatura de bulbo seco del aire que nos rodea y de la humedad relativa, aunque también hay factores como la temperatura de los elementos que nos rodean y la velocidad del aire.

La condición de las temperaturas superficiales de un espacio puede ser considerada a través de la temperatura media radiante (TMR). Su cálculo involucra las temperaturas de todas las superficies y la posición de la persona dentro del espacio, luego se determina el ángulo solido que ellas forman entre la posición de la persona y los ejes exteriores de cada superficie. Estos valores son promediados para obtener TMR (Esteves, 2017). Los diagramas indican valores de confort utilizando 2 o 3 variables que pueden estudiarse por cada clima. El confort depende también del nivel de actividad, y del nivel de vestimenta, estos diagramas se adoptan para cada conformación de vestimenta y actividad. Los diagramas son indicativos de estrategias que puedan utilizarse en el edificio cuando las condiciones exteriores no

son las del confort térmico, para alcanzarlo utilizando ya sean sistemas naturales o mecánicos (artificiales). Los edificios deben adaptarse al clima para tener un menor gasto energético, menor impacto ambiental (IPCC, 2021), pero a la vez, no dejar de generar ambientes confortables, dada la importancia de estos tienen para el trabajo productivo (Mascaró, 1998).

6.1.3.1 Diagramas bioclimático de Givoni-Milne

Para trazar este diagrama, se utiliza el climograma que es un diagrama psicométrico en el que se indica la zona de confort que varía del invierno al verano por el uso de diferente vestimenta y se agregan los valores de la temperatura y humedad del aire exterior del lugar para los distintos meses del año. Esto indica el apartamiento del aire exterior del lugar de la zona de confort. Givoni en 1969 desarrollo una carta bioclimática que ha sido posteriormente actualizada y perfeccionada (Givoni, 1981; Givoni, 1994; Milne et al. 2009). La forma propuesta se basa en la carta psicométrica del aire-húmedo. En ella se definen los límites de las técnicas de calentamiento y enfriamiento pasivo que pueden utilizarse en una vivienda en un clima determinado. Posteriormente Milne actualiza las estrategias posibles de utilizar en ese clima (Milne, 2009). Las estrategias más apropiadas al clima local, actualizadas por Milne, se resumen en :

Zona de confort

- Zona de confort: temperatura interior entre 18°C a 24°C (condición de invierno para 1,2 cló y 1 met) y entre 23°C y 27°C (condición de verano para 0,5 cló y 1 met), con 20% y 80% de humedad relativa en ambos casos.

Sistemas de enfriamiento para las condiciones exteriores siguientes:

- Zona de sombreado de ventanas (desde temperaturas de 21°C a mayor)
- Zona de alta masa térmica (desde 18,3°C a 32°C y de 4 mm de Hg a 15 mm Hg).
- Zona de masa térmica + enfriamiento convectivo nocturno (de 18,3°C a 40°C y de 4 mm de Hg a 15 mm Hg).

- Zona de enfriamiento evaporativo (de 18,3°C a 40°C y de 0 mm de Hg a 15 mm Hg).
- Ventilación natural, de 18°C a 27°C hasta 20 mm Hg.
- Ventilación forzada interior con ventilador de techo, pie u otro (de 18,3°C hasta 28°C) y hasta 20 mm Hg.
- Aire acondicionamiento mecánico con deshumidificación si fuera necesario.

Sistemas de calefacción

- Ganancias internas: producidas por la presencia de personas, iluminación artificial y equipamiento de la vivienda (13°C a 24°C).
- Ganancia directa con baja masa térmica (de 6°C a 24°C), es decir, elementos macizos de 10 cm de espesor mínimo y <1,8 m^2 de masa térmica /m^2 superficie cubierta.
- Ganancia directa con alta masa térmica (-5°C a 21°C) es decir, elementos macizos de 10 cm de espesor mínimo y >1,8 m^2 de masa térmica/m2 superficie cubierta.
- Protección de viento en exteriores (por debajo de 10°C).
- Calefacción artificial con humidificación si fuera necesario.

De todas las estrategias indicadas la ventilación natural y la ventilación artificial, son prácticamente iguales, salvo 1°C adicional para ventilación artificial, que, si se ajusta a la alta masa interior, este límite de 28°C podría ampliarse, sobre todo si esta la posibilidad de tener velocidad moderada de modo de permitir la evo-transpiración de la piel, que produzca el enfriamiento y genere bajas temperaturas de la piel. Tenemos que por encima de los 26°C el mecanismo de enfriamiento por evaporización desde la piel cobra mucha importancia y es una estrategia muy importante de utilizar en ambientes cálidos. Otra estrategia interesante es que las ganancias internas pueden actuar desde los 13°C. Por debajo de esto deberíamos tener calentamiento solar. Estas estrategias están ligadas también a la conformación de la envolvente que disponemos, si es térmicamente eficiente o no (Esteves, 2017). En la Figura 6.3 se muestra el esquema general del diagrama de Givoni

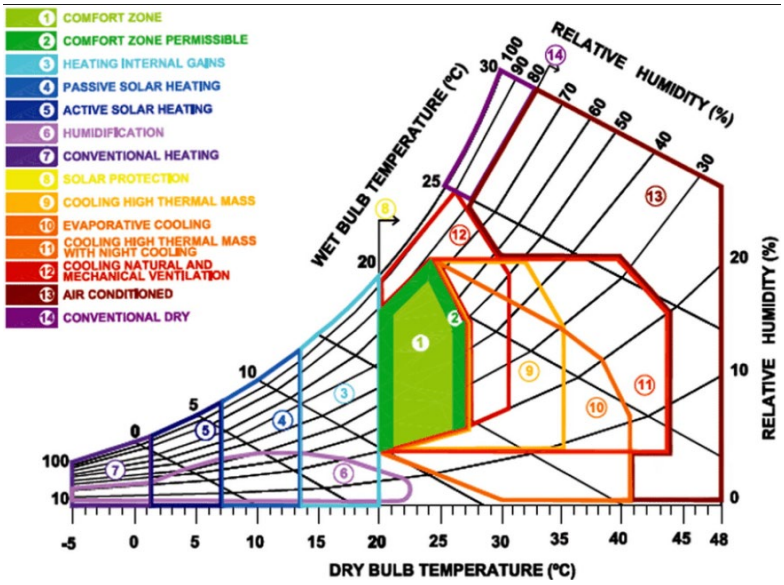


Fig. 6.3: Diagrama general de Givoni

Para la generación del diagrama de Givoni de la Ciudad de Salta utilizaremos el programa "Architecture Bioclimatic Classification (ABC Version 1.3)".

6.1.4 Temperatura radiante

Es otro indicador interesante de la situación térmica de un ambiente interior y es el promedio de la temperatura de los elementos solidos que rodean a la persona en él. En un ambiente interior resulta fundamental para evitar asimetrías radiantes y conocer su contribución a la temperatura operativa. Existen varios métodos para su calculo que dependen de la posición de la persona con respecto a los planos solidos (Gallo et al., 1988).

6.1.5 Temperatura operativa

La temperatura operativa tiene en cuenta la temperatura del aire que nos rodea y la temperatura radiante media (TRM). Se calcula mediante la Ecuación (6.2), esta resulta interesante para registrar la temperatura en edificios solares pasivos, donde aparecen planos a distinta temperatura superficial más cerca de la temperatura de confort fruto de la ganancia solar en los meses de invierno o del enfriamiento nocturno en los meses de verano.

$$T_O = a * (T_a + TRM) \tag{6.2}$$

Donde:

T_O =Temperatura operativa [°C]
a=Coeficiente que depende del movimiento del aire interior, usualmente 0,5 para el aire quieto, situación común en interiores de invierno.
T_a =Temperatura del aire del local donde se encuentra la persona [°C]
TRM =Temperatura Radiante Media del centro del local [°C]

La Tabla 6.3 muestra los valores de temperatura operativa y su variación entre levemente fresco y levemente cálido, situaciones más comunes de condición interior.

Tabla 6.3: temperaturas operativas en diferentes situaciones y su variación posible para el 80% de personas en confort.

Situación	Nivel de actividad [met]	Nivel de vestimenta [cló]	Temperatura operativa [°C]
Trabajo pesado	3	1	10±4
Trabajo medio	2	1	16±3
Trabajo liviano: higiene personal	1,4	0	27±1
Sedentaria: oficinas, aulas, bibliotecas	1	1,5	20±2,5
Acostado	0,8	2,2	18±3

Se observa que podemos vivir en situación de confort térmico en los interiores con diferentes temperaturas de aquella tomada como la única para mantener el confort (22°C).

6.1.6 Temperatura efectiva

En el caso de ambientes cálidos, la temperatura que sentimos es aproximada mediante la temperatura efectiva que tiene en cuenta no solo la temperatura del aire y la humedad relativa sino también la velocidad del aire que nos rodea. La Figura 6.4 muestra el diagrama para obtener su cálculo. En este diagrama utilizando la temperatura de bulbo seco podemos obtener la temperatura efectiva y si incorporamos la temperatura radiante media se obtiene la temperatura efectiva corregida.

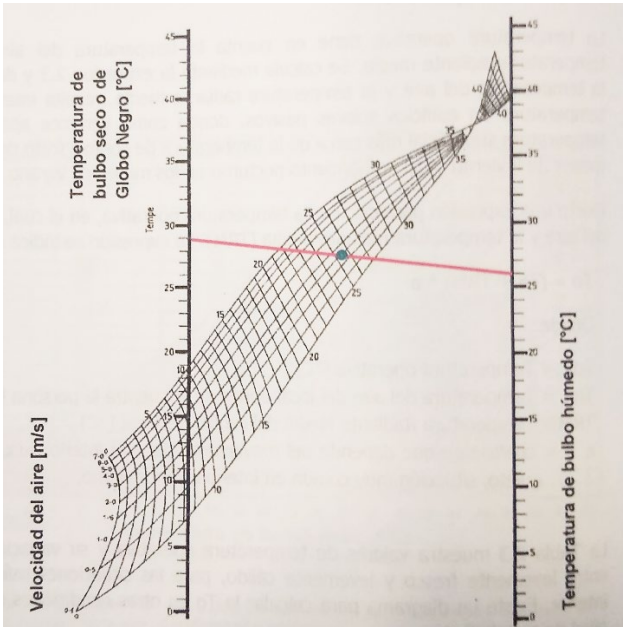


Fig. 6.4: Diagrama de cálculo de la temperatura efectiva y temperatura efectiva corregida.

Estas se pueden mostrar si observamos el nomograma de temperatura efectiva corregida, en la ecuación de Yaglou-Minard (IRAM 11603, 2012). Por ejemplo, una persona en un ambiente con temperatura de bulbo seco de 29°C y temperatura de bulbo húmedo de 26°C, con una velocidad de aire de 1,5 m/s, estará en confort percibiendo verdaderamente 25,5 °C. La temperatura de bulbo húmedo se puede obtener con la humedad relativa y la temperatura de bulbo seco del diagrama bioclimático.

6.1.7 Clima

El clima puede acotarse como determinadas condiciones naturales y repetitivas del lugar, propias del estado atmosférico, en las que podemos incluir varios fenómenos: régimen de temperaturas, humedad, viento, radiación solar, precipitaciones, heliofanía, etc. Estas condiciones se suman a otras estables como la geografía del lugar y a condiciones impredecibles pero probables como sismos, huracanes, inundaciones, etc. Las variables que caracterizan el clima del lugar se pueden enumerar en:

- Temperatura del aire
- Radiación solar
- Humedad relativa

- Velocidad y frecuencia de dirección del viento
- Precipitaciones: lluvia, nieve, granizo, etc.
- Otras: posibilidades de heladas, nubosidad, etc.

Magnitudes derivadas: son aquellas que derivan de las variables climáticas, son importantes y en arquitectura bioclimática son necesarias de conocer:

- Diagrama bioclimático
- Grados-día
- Carta solar
- Amplitud térmica
- Días de diseño

Ahora desarrollaremos las variables climáticas que afectan a la vivienda y su confort térmico y lumínico.

6.1.7.1 Temperatura del aire

La temperatura es el parámetro para determinar el nivel térmico en que se encuentra el aire atmosférico. Junto con la humedad relativa nos indica el grado de apartamiento del confort para la localidad determinada. Como su valor va cambiando con el tiempo, mínimo 10 años, deseable 30 años. Los valores disponibles que registra el Servicio Meteorológico Nacional en nuestro país es la temperatura de bulbo seco que se mide a la sombra y a una altura de 1,5 m al abrigo de la pantalla de Stevenson (Koenisberger et al., 1977).

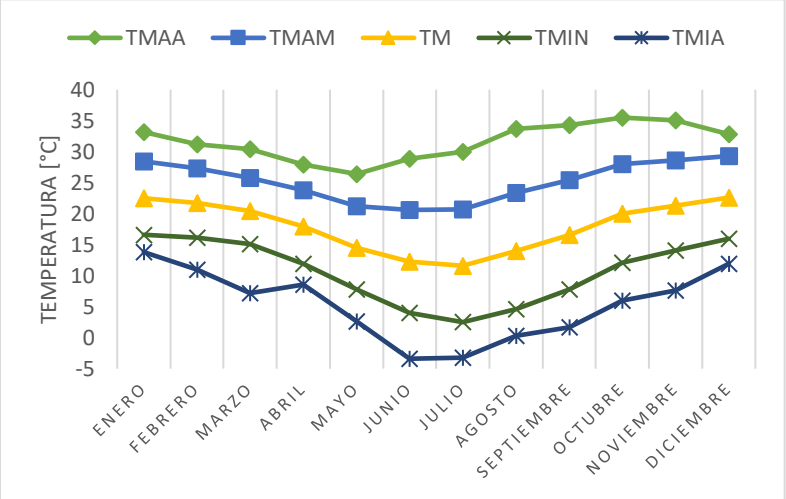


Fig. 6.5: Temperaturas máximas y mínimas absolutas (TMAA, TMIA); temperaturas máximas y mínimas medias (TMAM, TMIN) y temperatura media (TM).

En la Figura 6.5 se muestran las temperaturas máximas y mínimas, absolutas y medias y el promedio diario para cada mes del año para la ciudad de Salta capital. Las mismas fueron adquiridas del Servicio Meteorológico Nacional y adaptado por el TMYPlus que se mostró en el Capítulo 2 de esta Tesis.

6.1.7.2 Amplitud térmica

Es la diferencia entre la temperatura máxima y mínima diaria. Se puede calcular a partir de los valores medios mensuales, pero es importante tener en cuenta que su valor depende del contenido de humedad. Su conocimiento es muy importante para determinar el comportamiento del clima del lugar para valernos del diseño de la vivienda. La norma Iram 11603 contiene un mapeo de valores de amplitud térmica media. En los días claros la temperatura mínima es menor y la amplitud térmica mayor. La temperatura máxima media mensual da idea de la temperatura máxima de diseño. En inviernos en días claros, la temperatura más baja ocurre justo al amanecer, mientras que alcanza el máximo de 2 a 3 h luego del medio día solar. En los días nublados la amplitud térmica es menor, hay humedad relativa mayor en el aire, que atempera las variaciones térmicas lo que hace que las temperaturas máximas y mínimas se acerquen. Una localidad con mayor humedad relativa tendrá menor oscilación en su temperatura exterior.

6.1.7.3 Radiación solar

Es la energía recibida desde el sol, en forma de calor y luz. Esta fuente de energía es utilizada mediante tecnología apropiada, permite aprovechar el calor mediante sistemas solares térmicos, luz a través de sistemas de iluminación natural y electricidad mediante sistemas solares fotovoltaicos. En algunos casos se puede generar reacciones químicas útiles para algún propósito. Su disponibilidad es variable dependiendo del clima del lugar, ya que depende del nivel de nubosidad y conformaciones del terreno donde se localice la vivienda. Su estudio se plantea desde dos puntos de vistas: físico y geométrico (Duffie et al., 2006).

Aspecto físico de la radiación solar: se refiere a conocer la cantidad de energía que llega a la superficie terrestre y que dispone una vivienda para aprovecharla. El sol es una esfera de materia gaseosa que se mantiene a muy elevada

temperatura en su núcleo y va disminuyendo hasta el valor de 5800 K en su superficie o cromosfera. Es un reactor de fusión continuo donde sus gases son retenidos. La reacción de fusión sugerida que es la fuente de radiación solar es: $H + H \rightarrow H_e + neutrinos + rayos_\gamma$. La masa de H_e es menor que la del hidrogeno H_2 y la masa perdida en la reacción es la causante de la producción de energía. Aproximadamente se pierden 4 Toneladas de masa/seg. Pero por su constitución la reacción se puede mantener por miles de millones de años más (Brinkworth, 1981). La potencia emitida por el sol y que llega a la superficie de la atmosfera es un valor llamado Constante Solar (G_{SC}). Su valor registrado ha variado en función del tiempo y la forma de medirla. El valor admitido actualmente es de G_{SC}=0,082 MJ/m^2·min=1367 W/m^2 (Duffie et al., 2013). La intensidad de la radiación solar que llega a la tierra es el fruto de la acción de varios fenómenos, lo cual, para un día claro, sin nubes resulta bastante constante y predecible (Hottel, 1976).

Al llegar la radiación a la atmósfera sufre dos fenómenos muy importantes al entrar en contacto con ella. Ellos son:

1) Dispersión o scattering: es causada por la interacción de la radiación con las moléculas de aire, agua (vapor y gotas) y de polvo. Ocurre a longitudes de onda inferiores a 0,6 mm.

2) Absorción atmosférica: es causada por la absorción de radiación solar de moléculas de ozono, agua y dióxido de carbono. Ocurre para longitudes de onda del U.V., visible e I.R.

Tenemos que la Incidente a nivel del mar ≈70% de la constante solar media: ≈ 240 W/m^2. Debido al fenómeno de atenuación de la radiación solar por la atmósfera, la radiación se divide en: *Radiación directa*: Es la radiación recibida desde el sol sin que haya sido dispersada por la atmósfera. *Radiación difusa*: Es la radiación recibida desde el sol después de que su dirección ha sido modificada por el fenómeno de dispersión. *Radiación solar total*: Es la suma de las radiaciones solares directa y difusa sobre una superficie. Se la designa también como radiación solar global sobre una superficie. *Radiación reflejada o albedo*: Es la fracción de la radiación total incidente que resulta reflejada sobre una superficie (suelo, edificios,

etc). Depende del tipo de superficie y el valor promedio para la superficie terrestre es aprox. 0,3 (30%). En la Figura 6.6 tenemos un gráfico de la emisión y recepción de la radiación en la superficie.

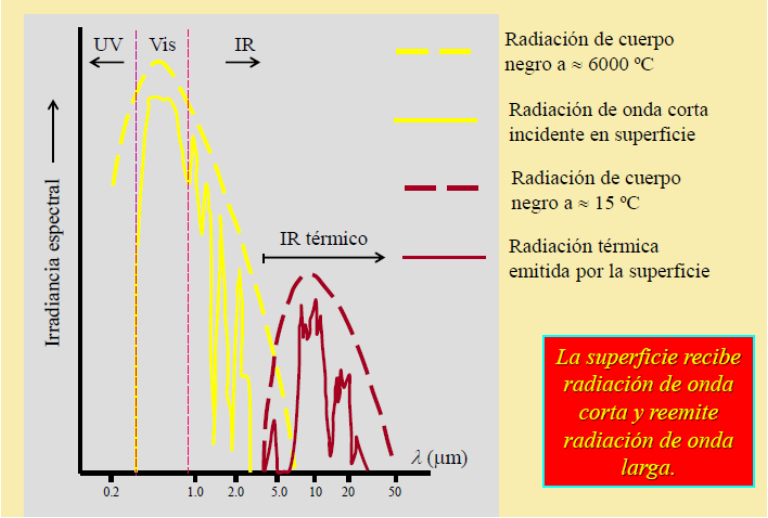


Fig. 6.6: Recepción y emisión de radiación en superficie, adaptado de http://www.esi.unav.es/asignaturas/ecologia/Hipertexto/10CAtm1/353BalEn.htm

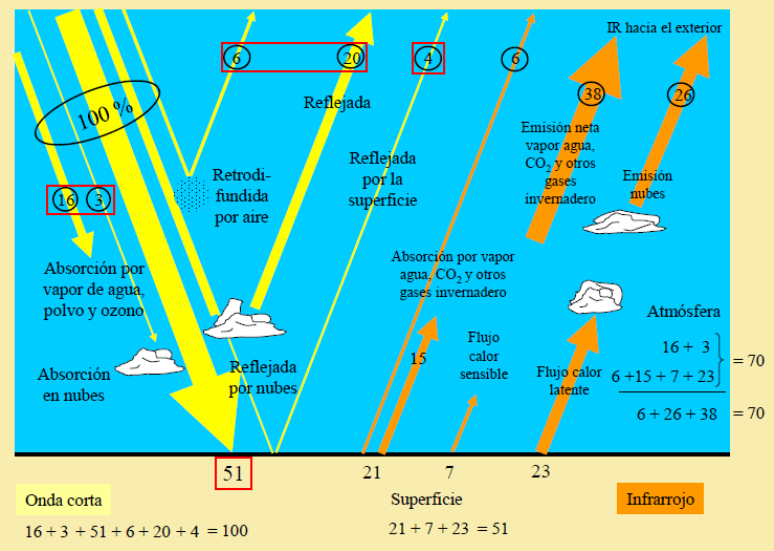


Fig. 6.7: Balance de radiación (promedio): Adaptado de Andrew P. Ingersoll, "La atmósfera", Investigación y Ciencia, Temas 12.

Como se puede observar en la Figura 6.6 y 6.7 la atmosfera confiere una protección especial al ser humano tanto en la barrera de radiaciones nocivas (capa de ozono), como que genera ambientes, tales como: el amanecer, el atardecer, el ir

cambiando la luminosidad. En aspectos térmicos se absorbe todo el espectro de la radiación solar que alcanza una superficie, el infrarrojo IR, el visible VI; en aspectos lumínicos importa el espectro visible y del espectro ultravioleta es necesario protegerse.

Aspecto geométrico de la radiación solar: nos permite conocerla dirección que tienen los rayos solares en cada momento del año y de ese modo, junto con la temperatura reinante, saber si se debe proteger o al contrario aprovechar la radiación solar sobre la vivienda. En el movimiento aparente del sol sobre la tierra, se destaca el movimiento de traslación de la tierra alrededor del sol y el movimiento de rotación alrededor de su eje una vez al día. La variación de la distancia tierra-sol a lo largo del año, es menor que el 1,5% y no tiene influencia apreciable en las estaciones (Brinkworth, 1981). En el capítulo 5 se detalla más de los aspectos geométricos de la radiación solar, los métodos de estimación de irradiación solar y la heliofanía.

6.1.7.4 Carta solar

La carta solar o helioindicador en combinación con las temperaturas del aire permite conocer en qué momento se debe sombrear y evitar su ingreso a la vivienda y en qué momentos se debe permitir que el sol ingrese para aprovechar su energía. Utilizaremos el programa GEOSOL V.2.0 para obtener la carta solar.

6.1.7.5 GEOSOL

GEOSOL es un programa de cálculo y graficación creado por Alejandro L. Hernández (Hernández, 2003). Corre bajo Windows y permite obtener, para cualquier lugar y día del año, los siguientes valores numéricos (Duffie y Beckman, 2013):

- Horas solares de salida y puesta del sol sobre el horizonte.
- Duración del día.
- Diferencia horaria entre Hora Solar y Hora Oficial.
- Declinación solar para la fecha consignada.
- Angulo horario, altitud y azimut solares, hora por hora, desde la salida hasta la puesta del sol.

- Irradiación solar directa, difusa y total en MJ/m^2, hora por hora, sobre cualquier superficie especificada por el usuario.

GEOSOL genera, además, un conjunto de gráficos con los cuales se representa:

- La evolución horaria de las irradiaciones solares directa, difusa y total mediante un gráfico de barras.
- La trayectoria del sol sobre la bóveda celeste en 2D (Carta Solar) y 3D (perspectiva isométrica).
- Gráfica de obstáculos a la trayectoria del sol en 2D.

6.1.7.6 Humedad relativa

El aire está constituido por una mezcla de gases. La humedad del aire es la cantidad de vapor de agua que contiene el mismo. La humedad absoluta es la cantidad de vapor de agua que tiene el aire en relación con la cantidad fija de aire seco. La humedad relativa HR es la cantidad de vapor de agua que posee el aire respecto de la que tendría el mismo en la saturación y esta depende de la temperatura, siendo mayor a temperaturas más elevadas. En la Figura 6.8 se muestra la humedad relativa media mensual y las precipitaciones medias mensuales de la ciudad de Salta capital en base a las estadísticas climatológicas del Servicio Meteorológico Nacional SMN del periodo 1991-2020.

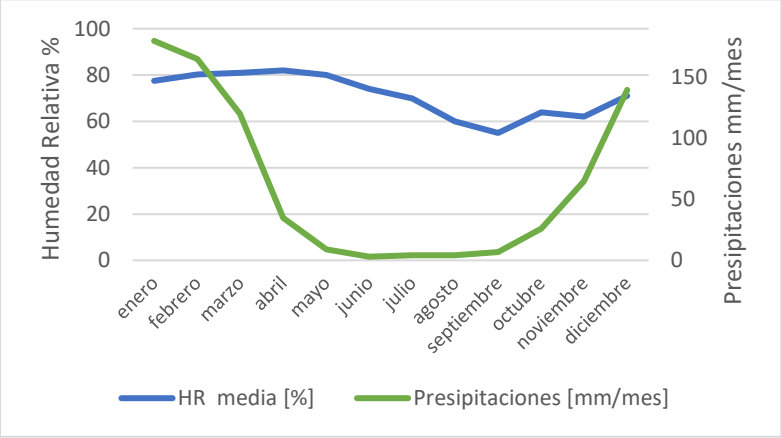


Fig. 6.8: Humedad relativa y precipitaciones mensuales para Salta capital. Fuente: adaptación a partir del SMN periodo 1991-2020.

En Salta, las precipitaciones ascienden a 755 milímetros por año: por lo tanto, se sitúan a un nivel intermedio. En el mes menos lluvioso (junio) ascienden a 3 mm, en el mes más lluvioso (enero) ascienden a 180 mm.

La humedad es una magnitud fundamental para el confort y para el análisis del diseño en verano. La humedad relativa exterior varia a lo largo de las horas del día, siendo máxima a primeras horas de la mañana (en coincidencia de la temperatura mínima) y mínima a las primeras horas de la tarde (en coincidencia con la temperatura máximas). A partir del dato de temperatura y humedad medias, se puede determinar la humedad mínima y máxima conociendo las temperaturas extremas.

6.1.7.7 Viento

Con respecto al viento de una localidad interesan dos variables: velocidad y dirección. La dirección de un viento se mide con un anemómetro de copa o con un tubo de Pitot. Su dirección se mide normalmente con una veleta. Las velocidades moderadas del interior se pueden medir con un anemómetro de hilo caliente, se lo mostro en el Capítulo 5 de esta Tesis. Las direcciones de viento, se presentan usualmente en 8 direcciones, como se muestra en la Figura 6.9:

- Los cuatro puntos cardinales (N, S, E, O)
- Los cuatro semicardinales (NE, SE, SO, NO)

Es importante establecer si existen direcciones predominantes y sus velocidades y las calmas de cada mes.



Fig. 6.9: Direcciones predominantes y velocidades del viento para Salta Capital. Fuente: Estadísticas del viento y del tiempo Aeropuerto Internacional de Salta Martín Miguel de Güemes - Windfinder (2006-2020).

El grafico de la Figura 6.9 muestra las velocidades medias por dirección para la localidad de Salta capital. Los datos fueron adaptados del SMN en el periodo de 2006-2020. Las velocidades están en unidades kts, donde 1 kts=0,51 m/s=1,8 Km/h.

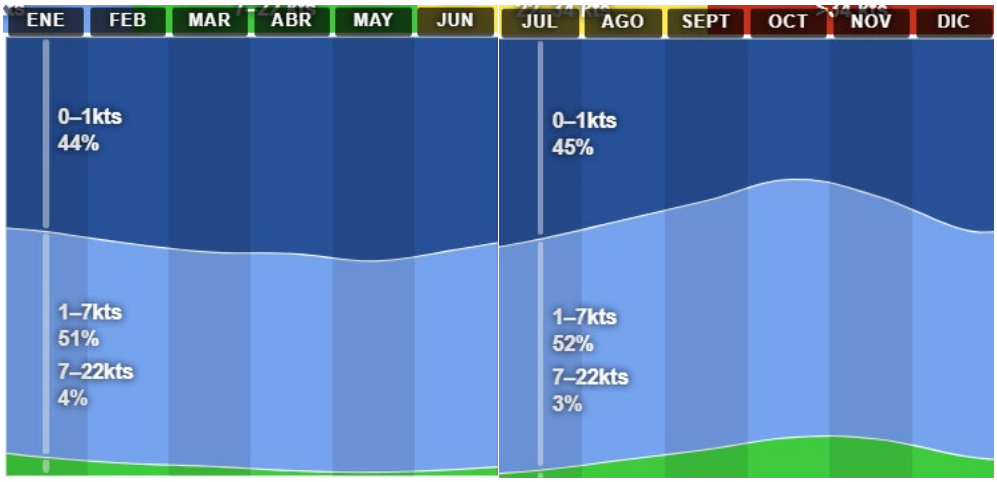


Fig. 6.10: Frecuencia de las velocidades del viento para la ciudad de Salta capital. Fuente: Estadísticas del viento y del tiempo Aeropuerto Internacional de Salta Martín Miguel de Güemes - Windfinder (2006-2020).

La Figura 6.10 muestra la frecuencia de las velocidades del viento para el mes de enero y julio de un periodo de 2006-2020. Se observa que la dirección predominante para ambos meses es el NE. Las velocidades del viento en su mayoría (frecuencia del 51% y 52%) para ambos meses van desde los 0,51 m/s y los 3,6 m/s. Mientras de 0 a 0,51 m/s (frecuencia del 44% a 45%) para enero y julio. Finalmente, de 3,6 m/s a 11,3 m/s (frecuencia del 4% y 3%) para enero y julio respectivamente. Esta información es importante para la implementación de estrategias de ventilación natural y ventilación nocturna. La velocidad interior debe ser menor a 1,5 m/s. Si supera este valor resultara incómodo para los habitantes, ya que a esta velocidad se vuela un papel que este apoyado en la mesa (Esteves, 2017).

6.1.7.8 Precipitaciones

Es el termino colectivo que se utiliza para lluvia, nieve, granizo, roció o escarcha. Se mide con pluviómetro y se expresa en mm/día, mm/mes (en Figura 6.5) o mm/año. Para el diseño de drenajes es importante conocer las precipitaciones máximas horarias en las épocas críticas. Aparece un índice de lluvia torrencial que se obtiene multiplicando el valor anual de precipitaciones en metro, multiplicado por

la velocidad media anual del viento. El resultado se evalúa de acuerdo a la siguiente escala:

- < 3 m^2/s *protegida*
- Entre 3 y 7 m^2/s *moderada*
- >7 m^2/s *severa*

Esta escala refleja la posibilidad que se junte viento con lluvia fuerte. La cantidad de lluvia caída, multiplicado por la superficie del techo, nos brinda la cantidad de agua y sugiere el tamaño del drenaje que debería utilizarse para su evacuación rápida. También nos brinda la cantidad de agua que puede ser obtenida y acumulada desde los techos. La Ecuación (6.3) nos detalla el cálculo de la cantidad de agua:

$$C_a = l_c S_t \tag{6.3}$$

Donde:

C_a=Cantidad de agua disponible [$l\ m^2/h$]
l_c=Cantidad de lluvia caída [mm/h]
S_t=Superficie del techo [m^2]

6.1.8 Grados día

Los grados/día de una localidad indican la necesidad de calefacción o enfriamiento que posee una vivienda emplazada en la misma. Reemplazan a la diferencia de temperaturas entre interior y exterior cuando queremos conocer el consumo energético de una vivienda en un determinado clima. Representa la diferencia total mensual o anual entre la temperatura interior elegida, llamada temperatura base (T_b) y la temperatura exterior computada hora a hora. Tenemos los Grados/Día de Calefacción calculados para una T_b de 18°C (GDC18) y Grados/Día de Enfriamiento calculados para T_b de 23°C (GDE23). Cuando el edificio (sea vivienda, oficina, escuela, locales comerciales, etc) tiene calentamiento intermitente se calculan los Grados/Dia de Calefacción Diurnos (GDCdi), en los que se computan solamente las temperaturas correspondientes a las horas en las cuales se utiliza el edificio.

Para el cálculo de los grados/día es necesario considerar la diferencia horaria ya que puede ocurrir que la temperatura media para ese día sea mayor que la

temperatura base y a la vez, haya existido temperatura exterior más baja durante algunas horas, en las cuales, sea necesario calefaccionar. La Ecuación (6.4) indica la expresión para su cálculo sobre una base horaria para contabilizar Grados/Dia de Calefacción:

$$GDC18 = \sum^{+}(T_b - T_a) \tag{6.4}$$

Donde:

$GDC18$=Indica los grados/día de calefacción para T_b de 18°C [$°Cdia/mes$]
$\sum^{+}$ =Sumatoria para todas las horas del día y únicamente para los valores positivos
T_b=Temperatura base interior [°C]
T_a=Temperatura exterior [°C]

Para contabilizar los GDCdi, se toma solamente el intervalo diurno (desde 8h hasta las 20h), teniendo en cuenta que en esa franja horaria se dan la mayoría de las actividades diurnas. La expresión para su cálculo se indica en la Ecuación (6.5):

$$GDCdi = \sum^{++}(T_b - T_a) \tag{6.5}$$

Donde:

$GDCdi$=Indica los grados/día de calefacción diurnos [$°Cdia/mes$]
$\sum^{++}$ =Sumatoria tomando en cuenta solo de 8h a 20h y únicamente para los valores positivos
T_b=Temperatura base interior=18°C
T_a=Temperatura exterior [°C]

Ahora para el caso de verano tenemos la Ecuación (6.6):

$$GDE23 = \sum^{+}(T_a - T_b) \tag{6.6}$$

Donde:

$GDC18$=Indica los grados/día de enfriamiento para T_b de 23°C [$°Cdia/mes$]
$\sum^{+}$ =Sumatoria para todas las horas del día y únicamente para los valores positivos
T_b=Temperatura base interior=23°C
T_a=Temperatura exterior [°C]

6.1.9 Días de diseño

Los valores de días de diseño se refieren a temperatura y radiación solar de diseño que permiten tomar en cuenta el estado térmico del aire para determinar los valores de potencia en las instalaciones termomécanicas. Representa normalmente

el 95% de la ocurrencia de temperaturas dejando solo el 5% fuera, temperaturas que ocurrirían muy esporádicamente y que incrementa los costos de instalaciones termomécanicas sin tener un sentido necesario. Los valores de temperatura de diseño de encuentran indicados en la norma Iram 11603 para varias localidades de nuestro país. Sim embargo, es importante notar que no siempre se tienen estos valores. En este caso se puede obtener la temperatura máxima y mínima de diseño haciendo uso de las Ecuaciones (6.7) y (6.8) de acuerdo a (Stein et al., 1992):

$$TMAD = \frac{TMAA+TMAM}{2} \tag{6.7}$$

Donde:

$TMAD$=Temperatura máxima de diseño [°C]
$TMAA$=Temperatura máxima absoluta [°C]
$TMAM$=Temperatura máxima media [°C]

$$TMID = \frac{TMIA+TMIM}{2} \tag{6.8}$$

Donde:

$TMID$=Temperatura mínima de diseño [°C]
$TMIA$=Temperatura mínima absoluta [°C]
$TMIM$=Temperatura mínima media [°C]

6.1.10 Calculo de la transmitancia de un elemento constructivo

La característica térmica más importante de una tecnología de cerramiento, ya sea un muro, techo, fundaciones, etc, aplicada a una vivienda, será la transmitancia térmica (K), es decir la mayor o menor velocidad de transferencia de calor desde el interior al exterior o viceversa y es propia de ese cerramiento y de los materiales utilizados. No depende de la forma de la vivienda, ni de clima reinante. También interesa la resistencia térmica, es decir su valor inverso. En ella intervienen una o más formas de transferencia de calor. Vamos aplicar la norma Iram 11601 para su cálculo. Se estima un valor de conductancia global o resistencia global de cada elemento (muro, techo, ventanas, fundaciones, etc) a la transferencia de calor desde el aire interior hacia el aire exterior, tomando en consideración todas las transferencias de calor. Resulta más conveniente trabajar a niveles de resistencias térmicas, en nuestro caso la resistencia global se calcula de acuerdo a la Ecuación

(6.9), luego la transmitancia térmica (K_m, m de mampostería) será la inversa de la resistencia térmica global (R_m), según Ecuación (6.10):

$$R_m = \frac{1}{h_i} + \sum \frac{e_i}{\lambda_i} + \frac{1}{h_e} \quad (6.9)$$

$$K_m = \frac{1}{R_m} \quad (6.10)$$

Donde:

h_i=Coeficiente pelicular interior (de transferencia de calor por convección y radiación en la superficie interior) [W/m^2 °C].
h_e= Coeficiente pelicular exterior (de transferencia de calor por convección y radiación en la superficie exterior) [W/m^2 °C].
λ_i=Conductividad térmica del material solido i [W/m °C]
e_i=Espesor del material solido i [m]

Usualmente $1/h_i = R_{si}\ y\ 1/h_e = R_{se}$. La norma Iram 11601 indica los valores de cada uno para el caso de la posición de la transferencia y la dirección del flujo de calor. La Tabla 6.4 indica estos valores.

Tabla 6.4: Resistencias térmicas superficiales en m^2 °C/W. Fuente: IRAM 11601.

Posición de la transferencia	**Dirección del flujo**	**Interior R_{si}**	**Exterior R_{se}**
Horizontal	Hacia arriba	0,10	0,04
Vertical (en muros)	Horizontal	0,13	0,04
Horizontal	Hacia abajo	0,17	0,04

6.1.10.1 Aislantes térmicos

Son de utilidad para evitar la transferencia de calor desde o hacia el exterior, para ahorrar energía y también evitar condensaciones (Iram 11625, 2017). Los materiales aislantes térmicos, tienen una muy baja conductividad térmica, ver Tabla 6.5, y tienen asociada una temperatura máxima a partir de la cual, pierden su porosidad, por lo tanto, aumenta su conductividad térmica.

Tabla 6.5: Materiales aislantes, conductividad térmica y temperatura máxima de trabajo. Fuente: norma IRAM 11601, (Roaf et al., 2003) y (European Commision, 2010).

Material	Densidad [kg/m³]	λ [W/m °C]	Temperatura máxima [°C]
Lana mineral	30-50	0,042	230
Lana de vidrio	15-18	0,04	200
	30-45	0,034	200
Perlita suelta	30-130	0,054	--
Mortero de perlita con yeso	500	0,12	--
Mortero de perlita con cemento	700	0,1	--
Poliestireno expandido (Telgopor)	13-15	0,037	75
Poliuretano (espuma rígida)	30-60	0,023	--
Corcho expandido con resinas	200	0,05	--
Hielo	917	2,21	--
Nieve	150	0,12	--
	300	0,23	--
	500	0,47	--

Un material es refractario cuando es aislante térmico y con alto punto de fusión, por lo que resiste altas temperaturas: arcilla refractaria, grafito, carburos, etc. Conforman bloques o mantas fibrosas.

En la Figura 6.11 se muestran algunos de los aislantes térmicos que se encuentran en el mercado local.



Fig. 6.11: Algunos materiales aislantes existentes en el mercado.

También podría haber una cámara de aire. En este caso, se coloca la resistencia térmica en vez de un coeficiente convectivo o radiactivo de acuerdo a la Ecuación (6.11), tomando en cuenta los valores de la Tabla 6.4:

$$R_m = \frac{1}{h_i} + \sum \frac{e_i}{\lambda_i} + \frac{1}{R_{ca}} + \frac{1}{h_e} \quad (6.11)$$

Donde:

R_{ca}=Resistencia de la cámara de aire [m^2 °C/W]

La Tabla 6.6 muestra los valores de resistencia térmica de las cámaras de aire de acuerdo al espesor y a las condiciones ante transferencia de calor por radiación.

Tabla 6.6: Valores de resistencia térmica de cámaras de aire R_{ca}

Posición de la cámara	**Dirección del flujo**	**No reflectivo ε=0,9**	**Reflectivo ε=0,2**	**Reflectivo ε=0,05**
Horizontal	Hacia arriba	0,11	0,19	0,23
Inclinado 45º	Hacia arriba	0,11	0,20	0,24
Vertical	Horizontal	0,12	0,24	0,30
Inclinado 45º	Hacia abajo	0,13	0,29	0,39
Horizontal	Hacia abajo	0,16	0,48	0,80

6.1.10.2 Intercambio térmico del interior al exterior a través de superficies sólidas

La cantidad de calor que atraviesa el elemento en cuestión, en este caso un muro, está dada por la Ecuación (6.12) de la transmisión de calor, indicada en la expresión para el caso de la mampostería, Q_m. A cada elemento le corresponde un valor de Q, Q_m para muros o mampostería, Q_t para techos, Q_v para ventanas, Q_f para fundaciones y Q_{inf} para infiltraciones.

$$Q_m = K_m A_m (T_i - T_e) \quad (6.12)$$

Donde:

Q_m=Energía que intercambia el muro por unidad de tiempo [W]
K_m=Transmitancia térmica del muro [W/m^2 °C]
A_m=Área del muro (que resulta transversal al flujo de calor, usualmente la superficie exterior) [m^2]
T_i=Temperatura interior [°C]
T_e=Temperatura exterior [°C]

El valor Km, Kv (transmitancia térmica de la ventana) o Kt (transmitancia térmica del techo) se pueden calcular siguiendo los pasos del inciso *6.3.10.* La Figura 6.11 indica algunos valores orientativos de muros y las Figura 6.14 para el caso de techos usuales.

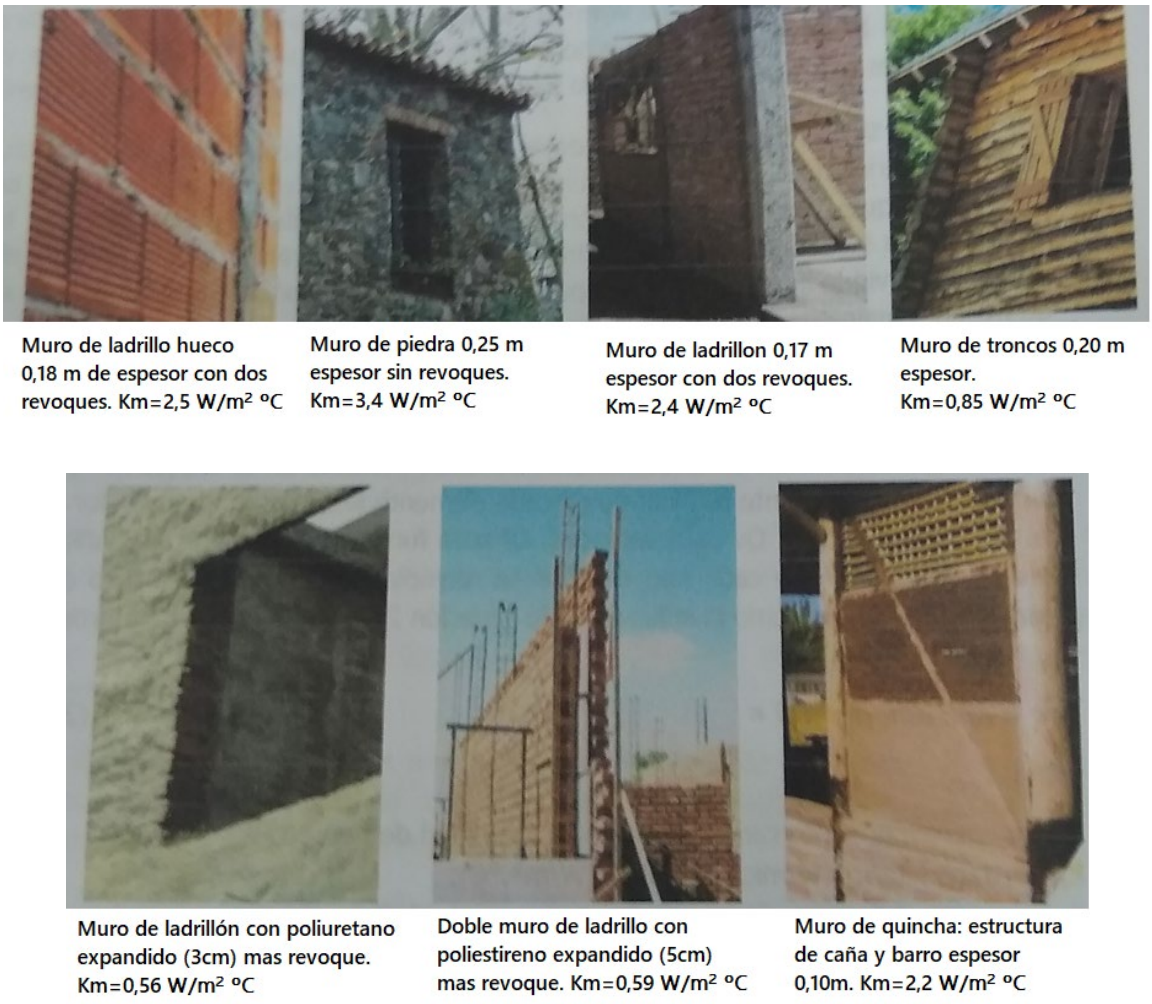


Fig. 6.12: Ejemplos de K de diversos muros. Fuente: (Esteves, 2017).

El valor de T_e y T_i puede ser distinto si se tiene en cuenta invierno y verano. Sumado a una variabilidad de la temperatura exterior. Por lo tanto, la cantidad de calor intercambiada podrá ser horaria, diaria, mensual o anual. El concepto de grados/días de calefacción o enfriamiento permite reemplazar la diferencia (T_i-T_e), obtener las perdidas mensuales o anuales. El intercambio térmico desde un local o

edificio se compone de la suma de los intercambios a través de sus elementos. La Figura 6.12 muestra ejemplos de diversos muros con y sin aislamiento térmico y su valor de transmitancia térmica K, para cada caso. Se observa que un muro macizo sin aislamiento térmico tiene valores del orden de 2 a 3 W/m^2 ºC, mientras que, si se le coloca aislación térmica, su conductividad baja a casi ¼ es decir 0,5-0,6 W/m^2 ºC. La Figura 6.13 y 6.14 muestran la construcción de una escuela y un hospital en donde se utilizaron doble muro con aislamiento térmico central.



Fig. 6.13: Escuela de Algarrobo del Águila, La Pampa.



Fig. 6.14: Construcción de un hospital con pared de doble muro y aislación central. Fuente: (Hernández, 2010)



Techo de tejas con 5 cm de lana de vidrio y 1 cm de poliestireno expandido cielo raso MDF 15 mm. Kt=0,61 W/m² °C

Techo de losa con 7 cm de espesor, poliestireno expandido de 5 cm y cielo raso aplicado de yeso. Kt=0,51 W/m² °C

Techo de chapa con 7,5 cm de espesor de poliestireno expandido, cielo raso de machimbre de 5/8" de espesor. Kt=0,48 W/m² °C

Fig. 6.15: Ejemplos de K de diversos techos. Fuente (Esteves, 2017).

La Figura 6.15 muestra distintos tipos de techos y se puede observar que su valor de transmitancia térmica K_t, dependerá del espesor del aislante térmico que le incorporemos.

En el caso de las ventanas, la Figura 6.16 muestra distinto tipos de configuraciones que hay en el mercado. Uno de los recursos para tener menos perdidas por conducción es utilizar doble o triples vidrios.

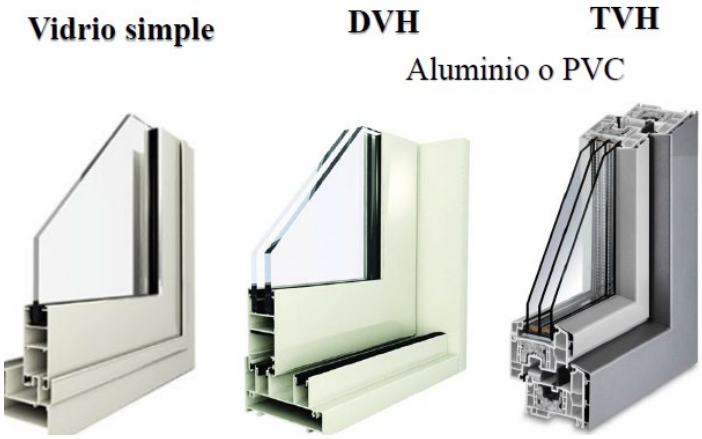


Fig. 6.16: ventanas con simple, doble y triple vidriado.

En la Tabla 6.7 tenemos la conductancia térmica en [W/m^{2}ºC]. de ventanas en función del material y superficie del marco, simple o doble vidriado y la posibilidad de contener cortinas interiores, exteriores o ambas.

Tabla 6.7: Conductancia térmica de ventanas. Adaptado de (Goulding et al., 1994)

Material del marco	**Área del marco respecto al vano [%]**	**Con vidrio simple**				**Con DVH**		
		Vidrio simple	c/cortina interior	c/cortina exterior	c/cortina int. y ext.	Doble Vidrio	c/cortina interior	c/cortina exterior
PVC	10	5,3	4,2	3,8	3,1	3	2,5	2,4
o	20	5	4	3,7	3,1	2,9	2,5	2,4
Madera	30	4,7	3,8	3	3,1	2,9	2,5	2,4
	10	6	4,6	3,5	3,6	3,6	3,6	3,3
Aluminio	20	6,4	4,8	4,4	3,6	4,3	3,6	3,3
	30	6,7	5	3,7	3,6	4,9	3,6	3,3
Acero plegado	20	5,8	4,5	4,1	3,4	3,4	3,1	2,9

Podemos notar que la ventana DVH tiene valores entre 2,4 W/m^{2}ºC y 4,9 W/m^{2}ºC, mientras que con vidrio simple van desde 3,1 W/m^{2}ºC a 6,7 W/m^{2}ºC.

Por lo visto anteriormente podemos concluir que las ganancias y pérdidas en un edificio (sea oficina, vivienda, local, escuela, etc) están ligadas a la temperatura exterior (T_{ext}) y la temperatura interior (T_{int}). La Figura 6.17 muestra un esquema de ganancias y pérdidas en un edificio.

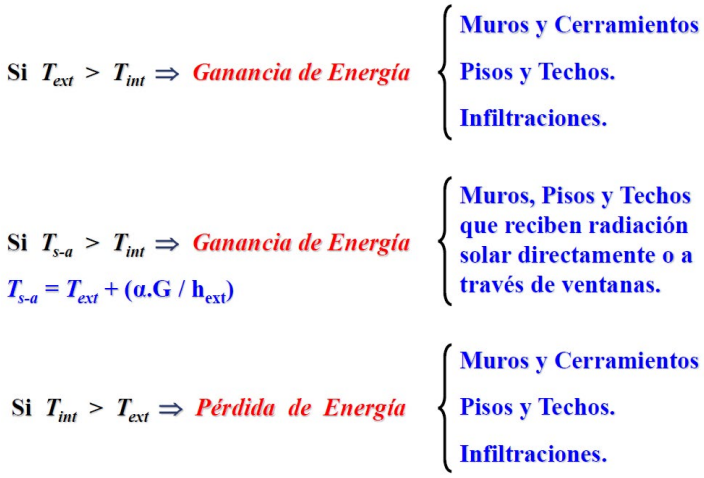


Fig. 6.17: Ganancias y pérdidas en un edificio.

6.2 Sistema de almacenamiento térmico

Los sistemas de almacenamiento térmico con materiales de cambio de fase (MCF) ofrecen una alta densidad de energía con una variación de temperatura moderada (Kong, 2017). La necesidad de acumulación de calor se produce por mal acoplamiento entre la disponibilidad del recurso solar y la demanda energética, Figura 6.18. También por la irregularidad e imprevisibilidad en la disponibilidad del recurso, Figura 6.19.

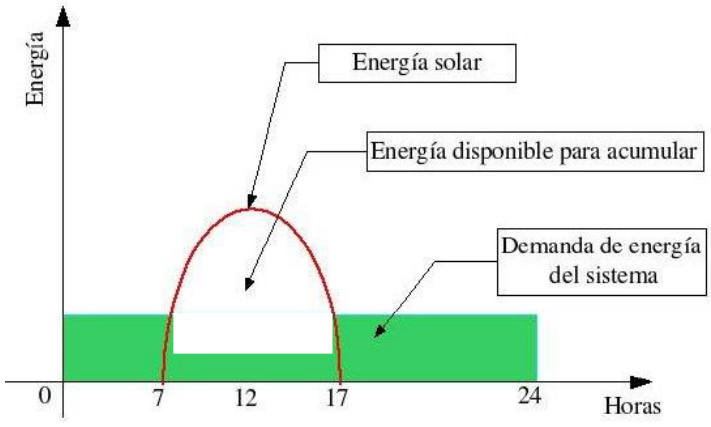


Fig. 6.18: Esquema que plantea el uso de energía disponible y la demanda.

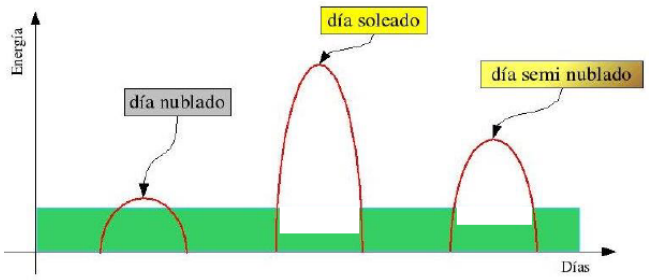


Fig. 6.19: Irregularidades en la disponibilidad de energía solar.

Para reducir el consumo de energía de los edificios, el material de cambio de fase PCM (del inglés "Phase Change Material") se ha incorporado ampliamente en las envolventes de los edificios (Devaux et al, 2017), como resultado de su capacidad para llenar la brecha entre la demanda y el suministro de energía (Tumirah et al, 2014) y (Shafie-khah et al, 2016). Con la utilización de PCM la temperatura interior de una vivienda oscila dentro de un rango de confort y se consume menos energía debido a que se reemplazan los equipos eléctricos/de gas para la climatización (Zwanzing, 2012). Con esto surgió la idea de implementar PCM en la vivienda social de esta tesis. Para ello, se propone la mampostería orientada al norte de la vivienda con PCM. La mampostería con ladrillos PumaPunku (Capitulo 4 de esta tesis) tendrán PCM en sus cavidades, como lo muestra la Figura 6.20.

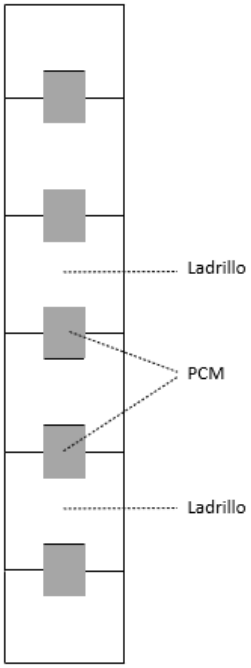


Fig. 6.20: Mampostería de ladrillo PumaPunku con la implementación de PCM.

Algunos antecedentes de la utilización de PCM son los siguientes: Vicente y Silva (2014) desarrollaron un muro de mampostería de ladrillo con PCM. Según su experimento, la pared PCM redujo entre un 50 % y un 80 % del cambio de temperatura, por lo que la demanda de energía disminuyó en 760 kWh. (Zhu et al., 2016) propusieron una pared con paneles dobles de PCM, y los resultados de sus pruebas mostraron que el consumo de energía de operación del edificio en la sala de PCM se redujo en un 6,4 % en verano y en un 17,8 % en invierno. (Wang et al., 2016) midió el rendimiento térmico de una pared con PCM en una habitación a gran escala y descubrió que la pared PCM reducía el 24,32 % de la carga de refrigeración y entre el 10 y el 30 % de la carga de calefacción. (Chen et al., 2018) propuso y aplicó una pared de ventilación activa-pasiva con PCM en un invernadero solar. Los datos experimentales mostraron que el muro propuesto aumentó la capacidad de liberación de calor entre un 49,93% y un 60,21%.

6.2.1 Materiales de Cambio de Fase

El proceso de selección de un PCM apropiado es muy complicado pero crucial para el almacenamiento de energía térmica. El PCM potencial debe tener una temperatura de fusión adecuada, un calor de fusión deseable y una conductividad térmica según la aplicación práctica (Dellicompagni, 2020). Por lo tanto, los métodos para medir las propiedades térmicas del PCM son muy importantes. Un PCM adecuado y un método de incorporación apropiado en el material de construcción, así como el almacenamiento de energía térmica de calor latente, pueden ser económicamente eficientes para calentar y enfriar la vivienda.

Los tipos de PCM se diferencian por su composición térmica, química y física. Los autores; (Sharma, 2009), (Kuznik, 2011), (Cabeza, 2011), (Pinel, 2011) y (Zalba, 2003) hacen la comparación entre los PCM orgánicos e inorgánicos, con sus principales ventajas y desventajas, Tabla6.8.

Tabla 6.8: Comparación de los diferentes tipos de materiales de cambio de fase.

Tipo de PCM	Ventajas	Desventajas
Orgánico (Parafinas, ácidos grasos, alcoholes de azúcar)	• Disponible en un amplio rango de temperatura. • Autonucleante. • Compatibilidad con los materiales de construcción más comunes. • Sin segregación. • Químico, físico y térmicamente estable. • Alto calor de fusión • No reactivo a otros materiales • Reciclable • No corrosivo • Efecto de subenfriamiento bajo o nulo	• Baja conductividad térmica • Cambio de volumen significativo • Inflamable (según la contención) • Baja densidad

	• Buena zona de transición térmica	
Inorgánicos (Sales hidratadas, metálicos)	• Mayor calor latente • Mayor conductividad térmica • No inflamable	• Alto efecto de subenfriamiento • Segregación de fase • Falta de estabilidad térmica • Segregación de fases • Corrosivo

El modelado del comportamiento de un PCM requiere la implementación de ecuaciones de balance de energía. Para obtener la forma aplanada de la gráfica de temperatura durante los procesos de fusión o congelación, varios autores han propuesto diferentes formulaciones matemáticas. La mayoría de ellos ignoran el efecto de sobreenfriamiento (Gowreesunker, 2012) y la disipación de la viscosidad debido al bajo movimiento de PCM y el estado líquido blando (Lacroix, 1993). Para el problema no lineal (en el rango de temperatura de cambio de fase), se utilizó la transformada de Goodman que elimina la dependencia de la temperatura, se introdujo el concepto de capacidad calorífica efectiva C_{eff} y se propuso el balance térmico para un volumen de control como se muestra en la Ecuación (6.13).

$$\rho(T)C_{eff}(T)\frac{\partial T}{\partial v}\frac{\partial v}{\partial t} = \nabla.\left[\lambda(T)\frac{\partial T}{\partial v}\nabla v\right] + g(\vec{r},t) \quad (6.13)$$

Donde:

ρ=densidad del PCM [kg/m^3]
C_{eff}=capacidad calorífica efectiva del PCM [J/kg °C]
T=temperatura del PCM [°C]
v=variable que depende de C_{eff}
λ=conductividad térmica del PCM [W/m °C]
g=tasa de generación de calor de la capa del PCM [W/kg]
t=tiempo [s]

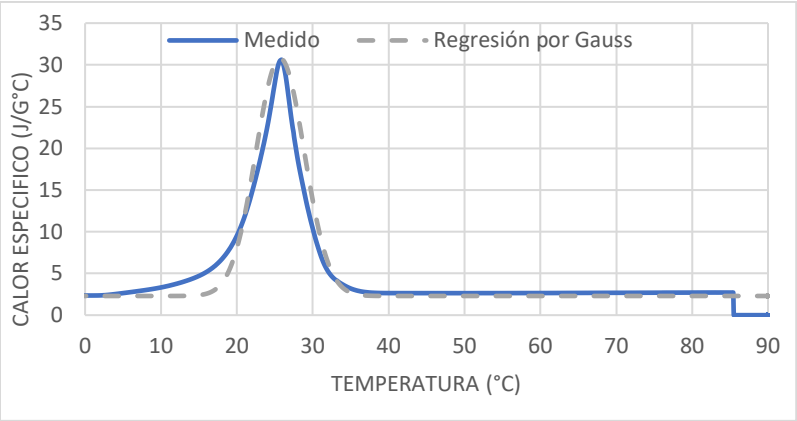
La dependencia temporal de esta ecuación diferencial permite obtener el comportamiento aplanado de la temperatura de PCM en un proceso de cambio de fase, lo que significa que no hay variación de temperatura (que es prácticamente constante en el punto de fusión). En este rango se consideró un valor constante de calor latente para todo el proceso.

Las propiedades termofísicas de las parafinas RT18 y RT21 fueron determinadas experimentalmente por (Dellicompagni, 2020). El análisis surge cómo parte de un proyecto conjunto entre el Instituto de Investigaciones en Energías No Convencionales (INENCO), la Universidad Tecnológica de Lodz, la Pontifica Universidad Católica de Chile y otras instituciones a través del proyecto SOLTREN ELAC2015 bajo el programa ERANet-LAC: Latin America, Caribbean and European Union. La metodología utilizada en el estudio es similar a la utilizada por diferentes autores (Venegas, 2018) y (Yehya, 2019). Las parafinas ensayadas fueron RT18 y RT21, con punto de fusión nominal de 18ºC y 21ºC respectivamente. Estas parafinas son distribuidas por Rubitherm®(Rubitherm GmbH).

Los PCMs fueron caracterizados con un ensayo experimental basado en la técnica de calorimetría diferencial de barrido (DSC del inglés Differential Scanning Calorimetry) (Dellicompagni, 2017).

6.2.2 Medición del calor especifico y determinación del calor latente

Se utilizó un dispositivo TA Instruments® para medir el calor especifico. Fue configurado para ejecutar una técnica MDSC (del inglés “Modulated Differential Scanning Calorimetry”). Todo el proceso esta descripto por el autor en (Dellicompagni et al, 2020).



6.21: Curva representativa del calor especifico del PCM RT21.

La Figura 6.21 muestra el calor especifico de la muestra de RT21 resultante de la medición de MDSC (en la sección 6.10 de este capítulo se muestran los resultados de la caracterización de las demás parafinas). Durante la transición de fase, el calor específico alcanzó los 30 J/g°C, lo que representa un material apto para aplicaciones en la construcción. La parafina empleada presenta estabilidad química ante la ausencia de procesos irreversibles. La variación del calor especifico con respecto a la temperatura de la muestra se puede representar mediante una función de distribución gaussiana, montada sobre una función constante. La línea discontinua corresponde a la regresión gaussiana (Ecuación (6.14)) introducida en el modelo de simulación para la descripción del calor especifico, con un coeficiente de determinación R^2=0,94.

$$C_p = a * e^{\frac{(T(ºC)-b)}{2*c^2}} + d \qquad [J/g\ ºC] \qquad (6.14)$$

Donde los coeficientes a [J/g ºC], b [ºC], c $[\frac{1}{\sqrt{ºC}}]$ y d [J/g ºC] se muestran en Tabla 6.9 y fueron obtenidos mediante la caracterización. Estos coeficientes se ajustaron hasta que las áreas bajo las curvas completas (medida y gaussiana) fueran iguales. El coeficiente "b" representa la temperatura de la parafina para un pico máximo de calo especifico, este valor se tomó como referencia para separar las fases sólidas de las líquidas en la estrategia de simulación 'flag', en lugar del punto de fusión nominal proporcionado por el fabricante. Este 'flag' es introducido por el parámetro β_m. Este parámetro funciona como un interruptor de encendido y

apagado que varía de 0 a 1, y viceversa, de acuerdo con la temperatura del PCM, como se muestra en la Figura 6.22.

Tabla 6.9: Valores de los coeficientes a, b, c y d obtenidos de la caracterización.

Parafina	Coeficientes	Cp	Potencia de Calor latente
RT18	a	50,226	0.24
	b	18.675	21
	c	1.705	2.4
	d	2.299	0.02
RT21	a	23.7	0.125
	b	23.81	24.1
	c	2.127	3
	d	2.299	0.02

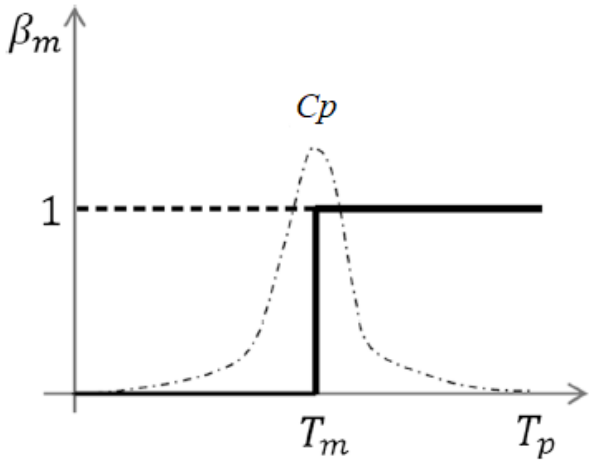


Fig. 6.22: Variación on-off del parámetro β_m

Es posible calcular el calor latente en términos de potencia térmica específica que el PCM puede liberar o absorber. Tomando los valores de C_p para cada paso de tiempo, Ecuación (6.15) determina el calor latente, y la Figura 6.23 muestra sus variaciones según la temperatura del PCM.

$$\dot{H} = C_p \cdot \Delta t(min) \cdot \Delta T(ºC) \cdot 60 \quad [W/g] \tag{6.15}$$

En este caso, la regresión gaussiana viene dada por la Ecuación (6.16) con un coeficiente de determinación de R^2=0,93. Los valores para a, b, c y d se establecieron en Tabla 6.9.

$$\dot{H} = a \cdot e^{\frac{(T(ºC)-b)}{2 \cdot c^2}} + d \quad [W/g] \tag{6.16}$$

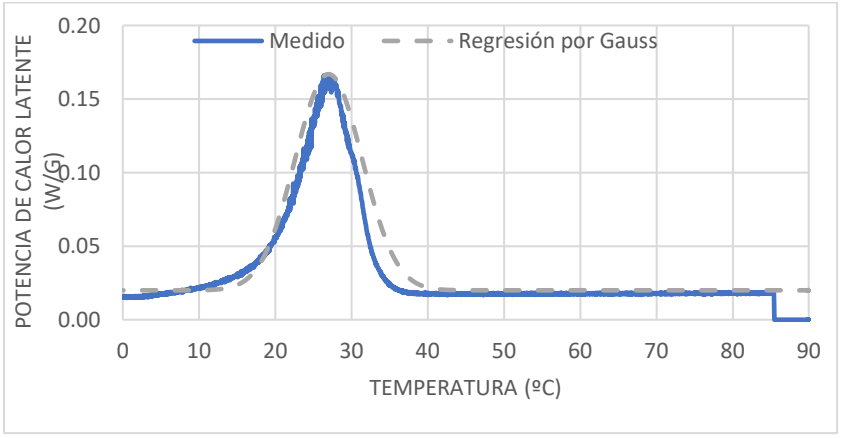


Fig. 6.23: Gráfica de calor latente obtenida de MDSC y la regresión gaussiana.

6.2.3 Simulación numérica en SIMUSOL

El modelo numérico se realiza en SIMUSOL, un software de acceso abierto desarrollado por investigadores del Instituto de Investigaciones en Energía No Convencional (INENCO). Este software se ejecuta tanto en Linux como en el Sistema Operativo Windows y puede analizar sistemas solares térmicos, mecánicos y eléctricos (Saravia, 2007), (Dellicompagni, 2018). Se utiliza una interfaz gráfica, llamada Dia, para ensamblar diagramas y escribir ecuaciones. El resultado de la simulación es una función del tiempo, que se puede mostrar como un gráfico y una hoja de cálculo. Se puede agregar programación adicional en FORTRAN al programa principal si se necesita un cálculo más avanzado. Para más información, visite SimuSol, Psicro, Calcula–Inicio.

Los valores de calor especifico y potencia de calor latente que se definieron en la sección anterior, serán utilizados como datos de entrada para la modelización térmica del recinto. Para la simulación se tendrán en cuenta las siguientes consideraciones:

- Se realizará el análisis térmico para los días 27 al 29 de junio y los días 26 al 28 de noviembre. Estos días son característicos de las estaciones otoño-invierno y primavera-verano.
- Se consideró una habitación orientada al Norte con un sistema HAVC. Este hace referencia a la climatización y ventilación. Las siglas provienen de una suma de palabras en inglés Heating–Ventilation-Airconditioning (HVAC en español es Calefacción, Ventilación y Aire Acondicionado). La habitación se encuentra ubicada en la ciudad de Salta Argentina (latitud -24.7859 y longitud -65.41166, altitud: 1200 m.s.n.m.). Se asumió que no había ganancias/pérdidas térmicas a través de las paredes laterales o la pared opuesta a la ventana. El intercambio térmico entre los nodos de temperatura interior y ambiental solo es posible a través de la pared Norte.
- Los datos climáticos se obtuvieron del año meteorológico típico (TMYPlus) desarrollado en el capítulo 2 de esta tesis. Para calcular la radiación global incidente sobre la pared Norte se aplicó el programa GEOSOL (introduciendo los valores del TMYPlus).

➢ Sistema de control: para el periodo de verano (26 al 28 de noviembre) se simularán bajo dos sistemas de control de extracción del aire, uno de HVAC y el otro sistema con termostato (entre los 18ºC y 24ºC se activa fijando la zona de confort). Los sistemas HVAC y termostato se configuraron de acuerdo con el cronograma que se muestra en la Figura 6.24.. Los valores corresponden a las renovaciones de aire en unidades de flujo volumétrico m^3/h (HVAC). En el caso del periodo de noviembre se impuso 2 renovaciones cada hora de 08 a 20 hs. Mientras que en invierno (27 al 29 de junio) se impuso 1 renovación cada hora en el mismo intervalo horario.

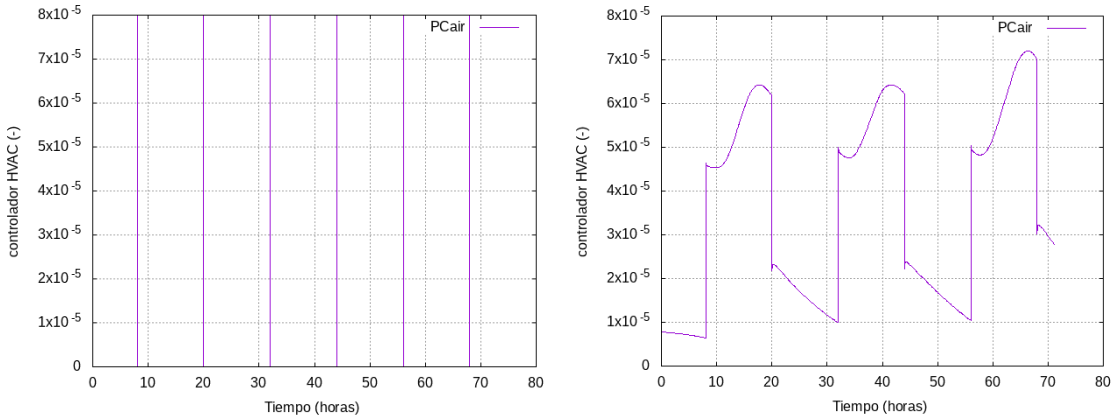


Fig. 6.24: HVAC: configuración de flujo de aire volumétrico de extracción: a la izquierda solo activado termostato y a la derecha activado HVAC y termostato.

➢ La geometría externa del recinto es de 4,5 × 4 x 2,3 m^3. Se eligieron estas medidas similares al Comedor de la vivienda social (Figura 6.29) del Caso IPV, en el inciso 6.3 de este capítulo se detalla más. Se compararán el comportamiento de las temperaturas interiores del Caso base IPV versus el caso si la pared tuviera PCM. El área de la pared donde lleva PCM es de 11,5 m^3, lo que da un total de 221 ladrillos PumaPunku, Figura 6.25.

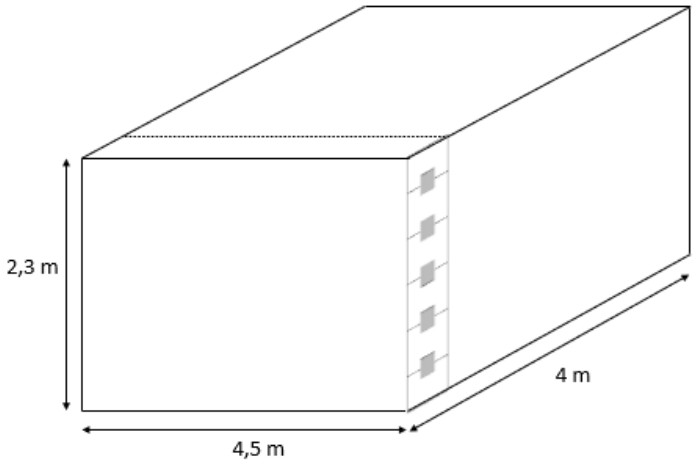


Fig. 6.25: Esquema del recinto considerado para el análisis térmico.

6.2.3.1 Modelo para SIMUSOL

La Figura 6.26 muestra el modelo de transferencia térmica a través del ladrillo con PCM en su interior. El aire ambiente está a una cierta temperatura, variable durante el día. El Primer mecanismo de transferencia es la convección paralela a la radiación entre la superficie exterior del ladrillo y el aire ambiente. Así mismo, la radiación solar (es, em y ei) ingresa a través del ladrillo y su energía se va degradando por las transmitancias del conjunto ladrillo–PCM–ladrillo hasta llegar al recinto (i). Por último, se tiene convección y radiación entre la superficie externa del ladrillo y el ambiente del recinto.

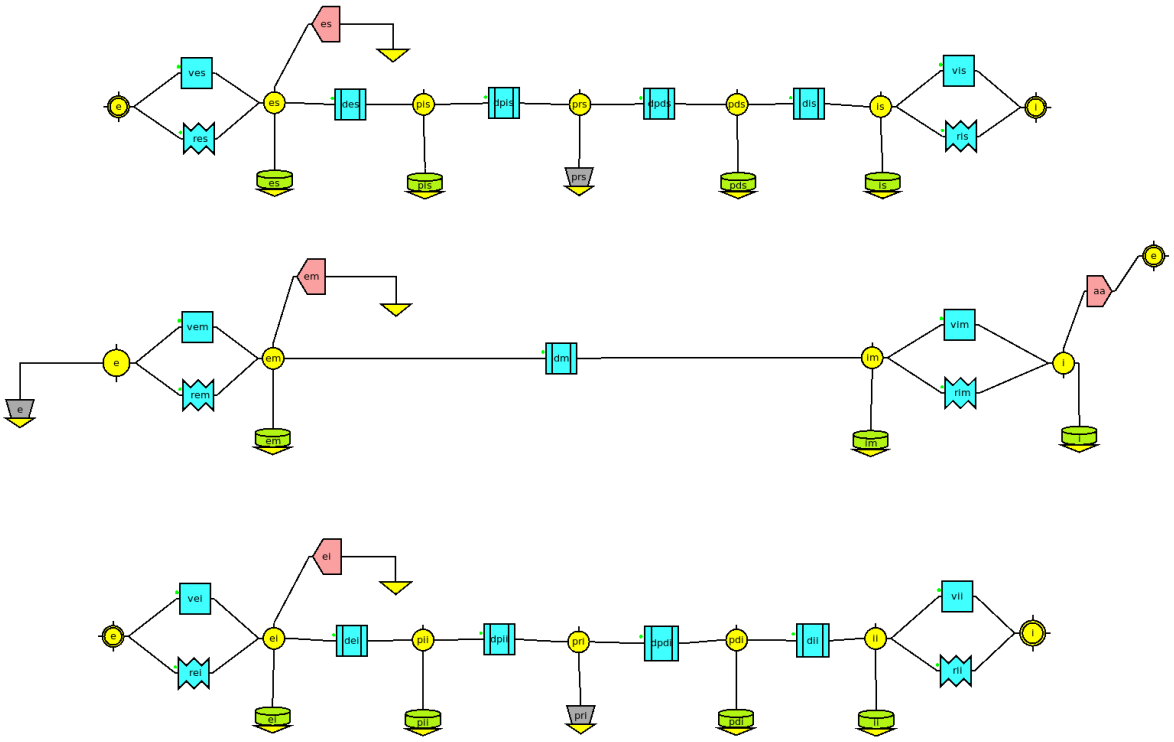


Fig. 6.26: Circuito térmico del ladrillo.

6.2.3.2 Tablas y cuadros: programación en Día

La Figura 6.27 muestra los distintos cuadros y tablas empleados para la programación en la interface Día. A continuación, se detalla cada cuadro y tabla:

- Cuadro Datos: se colocan todos los parámetros geométricos, físicos y térmicos de los elementos que componen los distintos circuitos o modelos.
- Cuadro Parámetros, se emplean para definir parámetros de valor fijo durante la simulación, los mismos pueden ser modificados a efectos de obtener resultados diferentes. Aquí se escribe la función de distribución gaussiana empleada para el cómputo del calor especifico del PCM conforme varía su temperatura.
- Cuadro Iniciales: se emplean para configurar las temperaturas iniciales de aquellos nodos térmicos que contienen masa. Esto se debe a que una masa es equivalente a una capacitancia eléctrica, cuyas ecuaciones en el dominio del tiempo necesitan las condiciones iniciales en el momento de ejecutar la simulación.

➢ Cuadro Controles: se definen tres características de la simulación: rutina de integración, tamaño del paso de cálculo y la cantidad máxima de pasos iterativos.

➢ Cuadro Tiempo: se define el tiempo de duración de la simulación.

➢ Cuadro Resultados: se definen los parámetros que se desea mostrar, en función del tiempo.

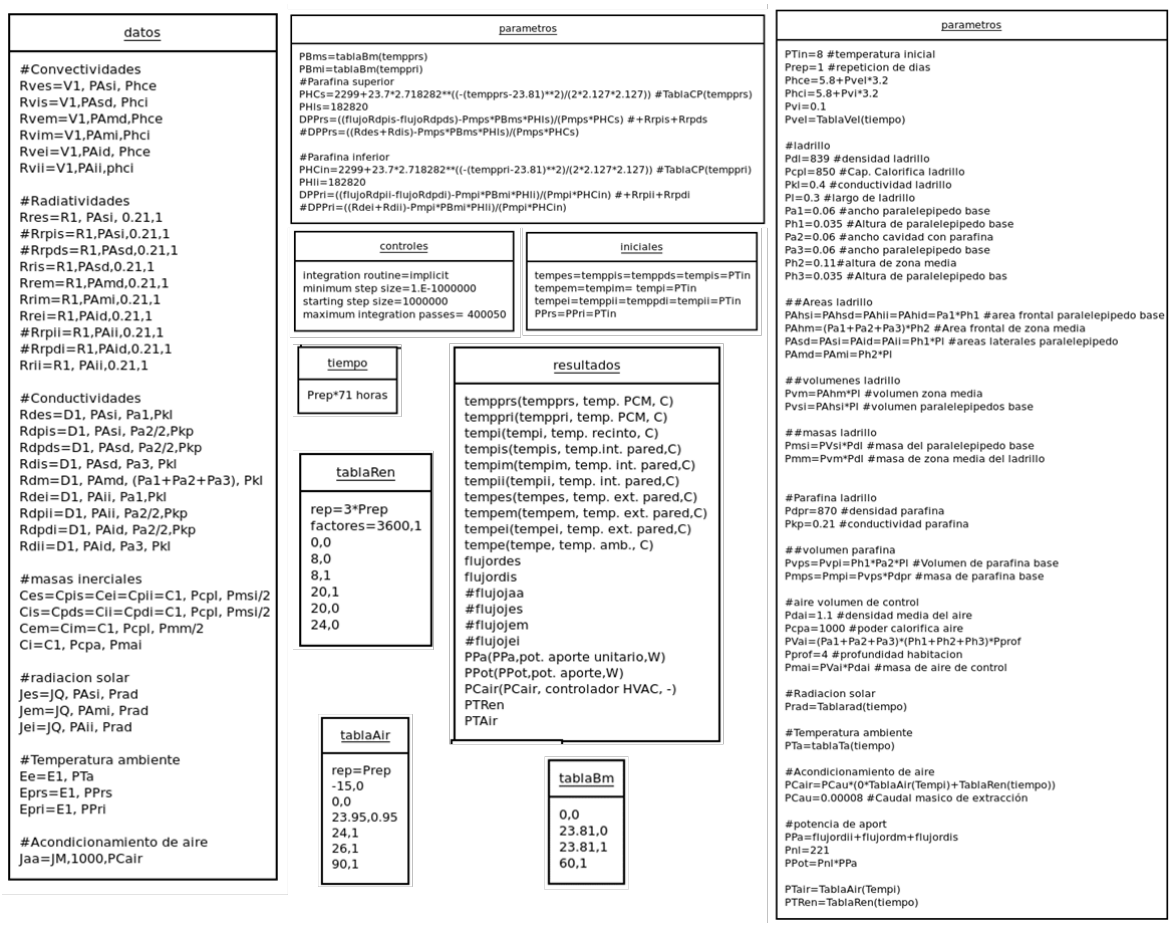
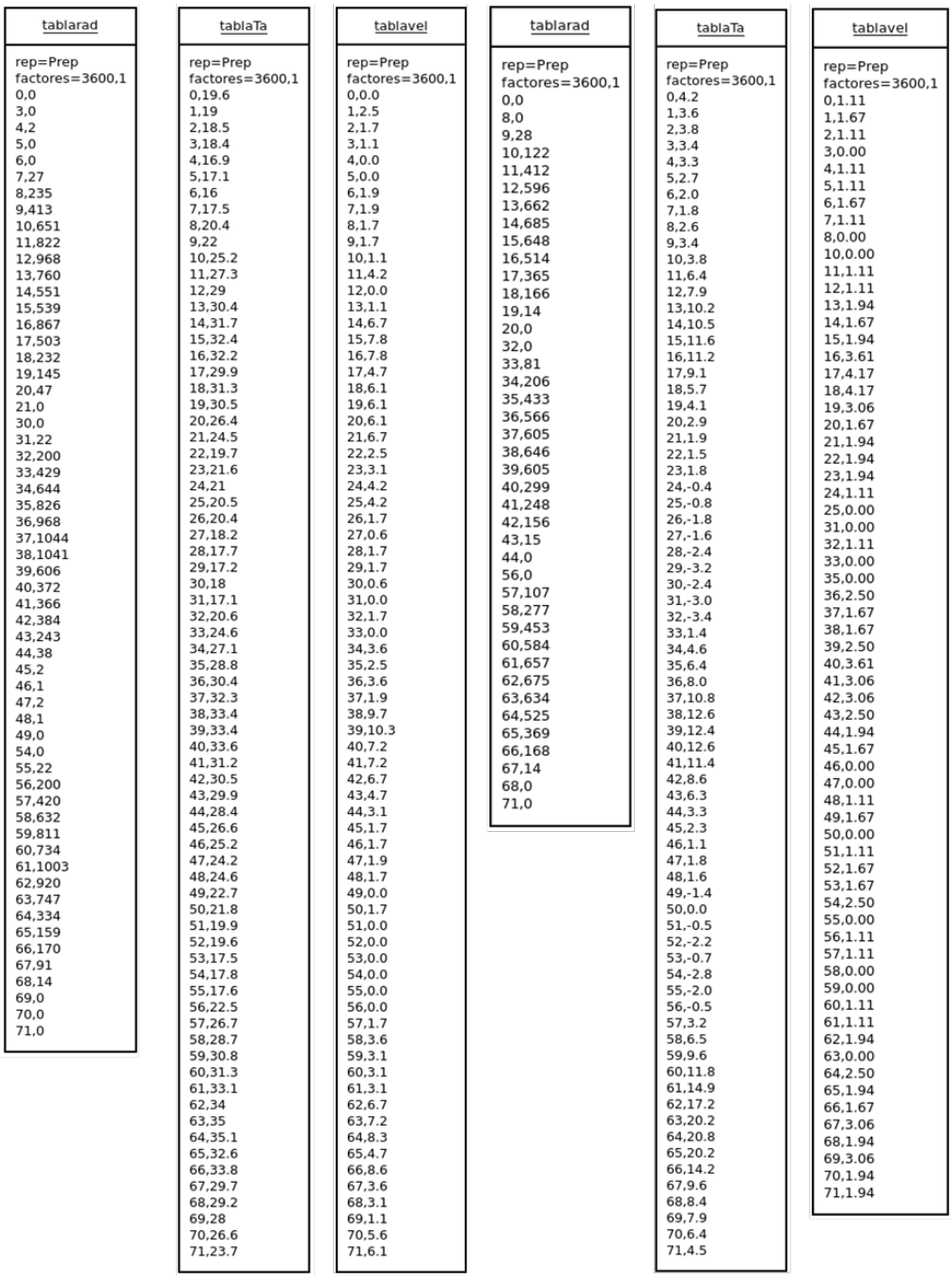


Fig. 6.27: Cuadros de diálogos y tablas empleadas en la programación.

➢ Tabla B_m: control "flag" del parámetro β_m.

➢ TablaRen: tabla donde se ingresa el sistema de control "HVAC".

➢ TablaAir: tabla donde se ingresa el sistema de control "termostato".



tablarad
rep=Prep
factores=3600,1
0,0
3,0
4,2
5,0
6,0
7,27
8,235
9,413
10,651
11,822
12,968
13,760
14,551
15,539
16,867
17,503
18,232
19,145
20,47
21,0
30,0
31,22
32,200
33,429
34,644
35,826
36,968
37,1044
38,1041
39,606
40,372
41,366
42,384
43,243
44,38
45,2
46,1
47,2
48,1
49,0
54,0
55,22
56,200
57,420
58,632
59,811
60,734
61,1003
62,920
63,747
64,334
65,159
66,170
67,91
68,14
69,0
70,0
71,0

tablaTa
rep=Prep
factores=3600,1
0,19.6
1,19
2,18.5
3,18.4
4,16.9
5,17.1
6,16
7,17.5
8,20.4
9,22
10,25.2
11,27.3
12,29
13,30.4
14,31.7
15,32.4
16,32.2
17,29.9
18,31.3
19,30.5
20,26.4
21,24.5
22,19.7
23,21.6
24,21
25,20.5
26,20.4
27,18.2
28,17.7
29,17.2
30,18
31,17.1
32,20.6
33,24.6
34,27.1
35,28.8
36,30.4
37,32.3
38,33.4
39,33.4
40,33.6
41,31.2
42,30.5
43,29.9
44,28.4
45,26.6
46,25.2
47,24.2
48,24.6
49,22.7
50,21.8
51,19.9
52,19.6
53,17.5
54,17.8
55,17.6
56,22.5
57,26.7
58,28.7
59,30.8
60,31.3
61,33.1
62,34
63,35
64,35.1
65,32.6
66,33.8
67,29.7
68,29.2
69,28
70,26.6
71,23.7

tablavel
rep=Prep
factores=3600,1
0,0.0
1,2.5
2,1.7
3,1.1
4,0.0
5,0.0
6,1.9
7,1.9
8,1.7
9,1.7
10,1.1
11,4.2
12,0.0
13,1.1
14,6.7
15,7.8
16,7.8
17,4.7
18,6.1
19,6.1
20,6.1
21,6.7
22,2.5
23,3.1
24,4.2
25,4.2
26,1.7
27,0.6
28,1.7
29,1.7
30,0.6
31,0.0
32,1.7
33,0.0
34,3.6
35,2.5
36,3.6
37,1.9
38,9.7
39,10.3
40,7.2
41,7.2
42,6.7
43,4.7
44,3.1
45,1.7
46,1.7
47,1.9
48,1.7
49,0.0
50,1.7
51,0.0
52,0.0
53,0.0
54,0.0
55,0.0
56,0.0
57,1.7
58,3.6
59,3.1
60,3.1
61,3.1
62,6.7
63,7.2
64,8.3
65,4.7
66,8.6
67,3.6
68,3.1
69,1.1
70,5.6
71,6.1

tablarad
rep=Prep
factores=3600,1
0,0
8,0
9,28
10,122
11,412
12,596
13,662
14,685
15,648
16,514
17,365
18,166
19,14
20,0
32,0
33,81
34,206
35,433
36,566
37,605
38,646
39,605
40,299
41,248
42,156
43,15
44,0
56,0
57,107
58,277
59,453
60,584
61,657
62,675
63,634
64,525
65,369
66,168
67,14
68,0
71,0

tablaTa
rep=Prep
factores=3600,1
0,4.2
1,3.6
2,3.8
3,3.4
4,3.3
5,2.7
6,2.0
7,1.8
8,2.6
9,3.4
10,3.8
11,6.4
12,7.9
13,10.2
14,10.5
15,11.6
16,11.2
17,9.1
18,5.7
19,4.1
20,2.9
21,1.9
22,1.5
23,1.8
24,-0.4
25,-0.8
26,-1.8
27,-1.6
28,-2.4
29,-3.2
30,-2.4
31,-3.0
32,-3.4
33,1.4
34,4.6
35,6.4
36,8.0
37,10.8
38,12.6
39,12.4
40,12.6
41,11.4
42,8.6
43,6.3
44,3.3
45,2.3
46,1.1
47,1.8
48,1.6
49,-1.4
50,0.0
51,-0.5
52,-2.2
53,-0.7
54,-2.8
55,-2.0
56,-0.5
57,3.2
58,6.5
59,9.6
60,11.8
61,14.9
62,17.2
63,20.2
64,20.8
65,20.2
66,14.2
67,9.6
68,8.4
69,7.9
70,6.4
71,4.5

tablavel
rep=Prep
factores=3600,1
0,1.11
1,1.67
2,1.11
3,0.00
4,1.11
5,1.11
6,1.67
7,1.11
8,0.00
10,0.00
11,1.11
12,1.11
13,1.94
14,1.67
15,1.94
16,3.61
17,4.17
18,4.17
19,3.06
20,1.67
21,1.94
22,1.94
23,1.94
24,1.11
25,0.00
31,0.00
32,1.11
33,0.00
35,0.00
36,2.50
37,1.67
38,1.67
39,2.50
40,3.61
41,3.06
42,3.06
43,2.50
44,1.94
45,1.67
46,0.00
47,0.00
48,1.11
49,1.67
50,0.00
51,1.11
52,1.67
53,1.67
54,2.50
55,0.00
56,1.11
57,1.11
58,0.00
59,0.00
60,1.11
61,1.11
62,1.94
63,0.00
64,2.50
65,1.94
66,1.67
67,3.06
68,1.94
69,3.06
70,1.94
71,1.94

Fig. 6.28: Tablas con datos climáticos ingresados en la interfase Dia, correspondientes a los días 26 al 28 de noviembre y del 27 al 29 de junio.

- Tablarad: donde se ingresan los valores de radiación en W/m^2.
- TablaTa: aquí se ingresan las temperaturas ambientes en °C.
- Tablavel: por último, en esta tabla se colocan las velocidades del viento en m/s.

En la Figura 6.28 se muestran seis tablas, las tres primeras corresponden a la radiación, temperatura ambiente y velocidad del viento de los días 26 al 28 de noviembre, mientras que las tres últimas tablas se refieren a las mismas variables climáticas, pero de los días 27 al 29 de junio.

6.3 Simulación del comportamiento térmico de la vivienda usando SIMEDIF

Para estudiar las temperaturas interiores del aire y de la superficie de los muros de la vivienda, el consumo energético y las condiciones de confort, se utiliza el programa SIMEDIF Versión 2.0, desarrollado por investigadores del INENCO y de libre disponibilidad en INENCO – Instituto de Investigaciones en Energía No Convencional (unsa.edu.ar). SIMEDIF es una herramienta de diseño para calcular la temperatura horaria del aire dentro de los espacios de un edificio, la temperatura superficial horaria de las paredes y la energía auxiliar de calentamiento/enfriamiento que se necesita para mantener los espacios a una temperatura determinada por un termostato que puede definirse hora por hora para el año completo.

El programa permite analizar el comportamiento del edificio en diferentes condiciones climáticas, detectar problemas de confort térmico (sobrecalentamiento o bajas temperaturas), evaluar posibles alternativas en el diseño de un edificio, tales como variaciones en su geometría, orientación, ubicación y tamaño del edificio, la estructura y los materiales de la envolvente, la adición de sistemas pasivos e híbridos como enfriadores tierra-aire, enfriadores evaporativos, doble fachadas verdes, etc. En los edificios existentes, el software puede utilizarse para validar el modelo de construcción a través de datos medidos o para cuantificar la eficacia de las posibles alternativas de rediseño en el caso de trabajar en rehabilitación energética (Ruiz López, 2021).

Esta versión para Windows fue desarrollada por la Dra. Silvana Flores Larsen en el INENCO (Instituto de Investigación de Energía No Convencional, U.N.Sa.-CONICET). La versión original de 1984 para DOS fue desarrollada por los Dres. Graciela Lesino, Luis Saravia y Dolores Alía. La versión actual cuenta de dos partes: la entrada de datos (hecha con VisualBasic 6) y el módulo de cálculo (totalmente

desarrollado en Python). La entrada de datos es completamente transparente (archivos de texto plano), por lo que cualquier programador puede desarrollar su propia interface de ingreso si así lo requiere. Más detalles del modelo térmico se encuentran en (Flores Larsen y Lesino, 2001).

6.3.1 Descripción de la vivienda Caso IPV

Se harán simulaciones teniendo en cuenta dos casos: el "Caso IPV" que es el de una vivienda social del IPV para una familia tipo, estas viviendas se entregan aquí en la ciudad de Salta, y un "Caso Estratégico" donde la vivienda es simulada con los ladrillos Puma Punku desarrollados en el capítulo 4, el hormigón armado de la vivienda con material reciclado desarrollado en el capítulo 4, y el colector de aire del capítulo 5. En ambos casos se simulará con el año meteorológico típico (TMYPlus) generado en el capítulo 2 de esta tesis.

La vivienda para los Caso IPV y Caso Estratégico tiene una superficie construida de 63,7 m^2. Consta de tres habitaciones, una cocina-comedor y un baño, como muestra la Figura 6.29. La envolvente vertical es de ladrillo cerámico hueco de 0,18 m con revoque grueso y fino a la cal en ambos lados, con un espesor de 0,01 m, sin aislación térmica. La envolvente horizontal es un techo en pendiente a un agua compuesto por un cielorraso suspendido de placas de yeso de 9.5 $x10^{-3}$ m de espesor el cual se encuentra ubicado a 2,6 m del suelo. Por encima del cielorraso se encuentra una cámara de aire luego de la cual está la chapa de calibre 25 ($5x10^{-4}$ m de espesor). El cielorraso está sujeto a la chapa mediante correas perfil de fijación tipo "C".

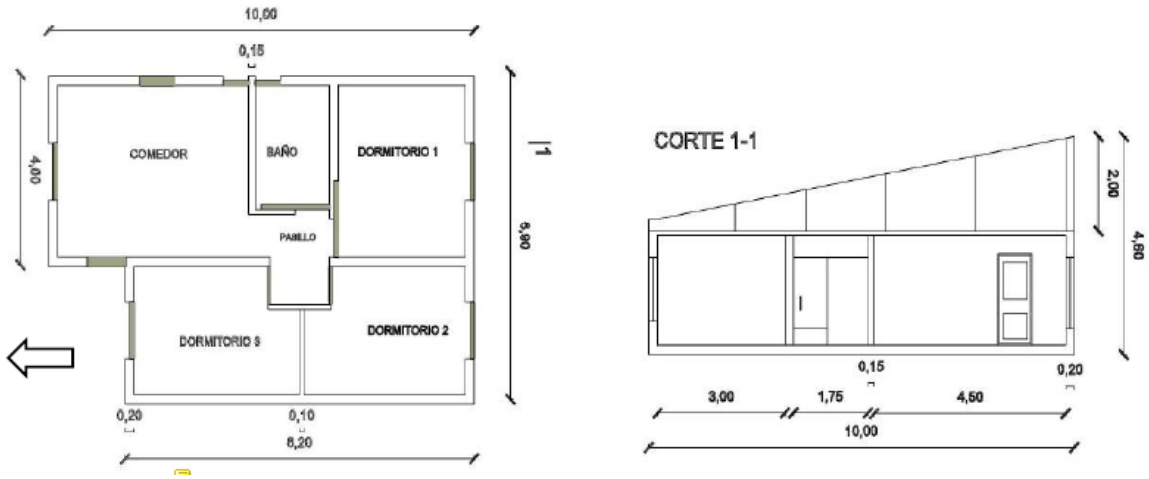


Fig. 6.29: Izq.) Vista en planta de la vivienda analizada y Der.) Vista en corte de la vivienda (Ruiz López, 2021).

Para tener en cuenta el espesor de la cámara de aire que corresponde a cada local, se consideraron dos espesores promedio, uno de 0,95 m de alto asignado a los dormitorios 3 y 2, y 0,78 m para el comedor, el baño y el dormitorio restante. Esta es la consideración que se tuvo en cuenta para poder hacer la simulación un poco más simple ya que usando el espesor promedio de la cámara de aire se puede considerar una conductancia térmica equivalente sin que vaya variando en función del espesor. Los muros interiores son de mampostería de ladrillos cerámicos huecos de 0,08 m y 0,12 m, también revocados en ambos lados. En cuanto a la carpintería, las puertas son de madera de cedro y las ventanas son de vidrio simple, incoloro, de 0,004 m de espesor.

La Tabla 6.10 muestra las áreas de los pisos y el volumen de las distintas zonas térmicas, como así también el área vidriada correspondiente al Caso IPV.

Tabla 6.10: Propiedades térmicas de los materiales de muros y techos requeridos para la simulación del Caso IPV.

Muros	**Capas**	***k*** **[W/mK]**	**ρ** **[kg/m³]**	**C_p** **[J/kgK]**	**Espesor** **[m]**
Muro Exterior	Revoque exterior	1,16	1900	800	0.02
	Ladrillo cerámico hueco	0,38	636	850	0,18
	Revoque interior	0,93	1900	800	0,02
Muro Interior	Revoque exterior	0,93	1900	800	0,02
	Ladrillo cerámico hueco	0,33	631	1009	0,12
	Revoque interior	0,93	1900	800	0,02
Techo	Cielo raso	0,58	1200	1080	0,095
	Cámara de aire	0,024	1,02	1012	0,78
	Chapa galvanizada	58	7900	450	0,0005

6.3.2 Caso IPV: Pautas para la simulación

En este inciso se darán las pautas que se utilizaron para las simulaciones de la vivienda social del Caso IPV. De la Tabla 6.10 obtenemos los valores de conductividad térmica, densidad, calor especifico y espesores de los muros interiores, exteriores y del techo Para los muros exteriores se fijó una absortancia solar de 0,6, correspondiente a una pintura de color medio utilizada generalmente en la construcción de este tipo de viviendas. El coeficiente global convectivo-radiactivo de superficies interiores se fijó en 6 W/m^2K y 8 W/m^2K (superficies interiores no asoleadas y asoleadas, respectivamente) en correspondencia con lo sugerido por el manual del software. Para el coeficiente global de pérdida h de las superficies exteriores se realizó el cálculo ya que se cuenta con el dato de la velocidad de viento en cada localidad. El valor del coeficiente se estimó a través de la correlación de (Duffie y Beckman, 2013) que considera la velocidad media de

viento v (m/s) en el periodo de simulación. La Ecuación (6.17) calcula el coeficiente global de pérdida h_{ex} de las superficies exteriores:

$$h_{ex} = 5{,}7 + 3{,}8v \tag{6.17}$$

De acuerdo a (Hernández, 2016) el rango de confort esta entre 18°C a 24°C si la humedad relativa HR se encuentra entre 20 % y 80 %, pudiendo llegar a 26°C si HR=50 %. Otra alternativa para obtener la temperatura de confort es el desarrollado por (Muñoz Godoy, 2012) llamado "confort adaptativo", en la Ecuación (6.18) se detalla dicha expresión:

$$T_{confort} = (0{,}31)T_{media} + 17{,}8 \tag{6.18}$$

Donde:

$T_{confort}$=Temperatura de confort [°C]

T_{media}=Temperatura media del periodo de simulación [°C]

El "Caso IPV" y el "Caso Estratégico", fueron simulados para las cuatro orientaciones (Norte, Sur, Este y Oeste). Para ubicar convenientemente un edificio es necesario considerar el movimiento aparente del sol sobre la esfera celeste, Figura 6.30. Se toma como referencia la orientación de la vivienda donde los dos dormitorios principales se encuentran hacia el sur y el comedor hacia el norte. Se llama a esta orientación "Orientación Sur". Una vez establecida la orientación de referencia se fue rotando la vivienda 90° en sentido anti horario. El primer giro respecto al orientación base es la "Orientación Oeste", girando la vivienda nuevamente 90° se obtiene la "Orientación Norte" y finalmente, con el último giro de 90°, se obtiene la "Orientación Este". Los periodos simulados fueron otoño-invierno y primavera-verano.

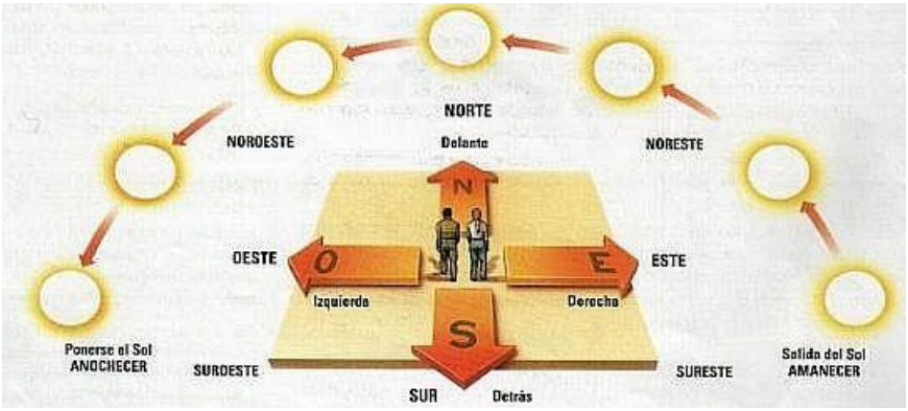


Fig. 6.30: Movimiento aparente del sol sobre la esfera celeste.

En la Tabla 6.11 se detallan las temperaturas de confort de cada periodo como también los valores de h_{ex} de cada periodo, se utilizaron las Ecuaciones (6.17) y (6.18).

Tabla 6.11: Coeficiente convectivo exterior y Temperatura de confort adaptadas para la simulación de los periodos.

Periodo	h_{ex} **[W/m²K]**	$T_{confort}$ **[ºC]**
Otoño-Invierno	15	22,1
Primavera-Verano	14	24,4

6.3.2.1 Definición del sitio, los datos meteorológicos y el período de simulación.

Si bien el ingreso de datos puede realizarse en cualquier orden para los elementos, el primer paso es, obligatoriamente, definir el lugar y clima. Elegimos como lugar a simular la ciudad de Salta Capital. En la parte de selección del Clima elegiremos el TMYPlus realizado en el Capítulo 2 de esta Tesis. El mismo se encuentra en formato .epw. El formato .epw (EnergyPlus Weather file) es ampliamente utilizado en todo el mundo por lo que existen archivos que pueden descargarse libremente de Internet. El NREL provee de un excelente repositorio en: EnergyPlus (la mayoría de estos archivos corresponden a años típicos meteorológicos, los cuales han sido transformados a formato *.epw*. Luego ingresamos el albedo del lugar en donde estará la vivienda, como simularemos que esta sobre pasto el albedo es 0,25. En la

Tabla 6.11 se establecen los dos periodos de simulación para cada una de las orientaciones de la vivienda.

6.3.2.2 División de la vivienda en zonas térmicas.

Una "zona térmica" es un volumen de aire que se puede considerar a una temperatura uniforme. Este volumen puede ser un ambiente del edificio, una parte de un ambiente o un grupo de ambientes. El software calculará la evolución en el tiempo de la temperatura de cada zona térmica, haciendo un balance energético sobre el volumen de aire. En la Tabla 6.12 se muestran las áreas de piso y volumen de las distintas zonas térmicas, como así también el área vidriada correspondiente.

Tabla 6.12: Locales y características de las zonas térmicas usados en los casos de estudio.

Local	Área de suelo [m^2]	Volumen [m^3]	Área vidriada [m^2]
comedor	16,2	42,12	2,16
Dormitorio 1	10,8	28,08	1,62
Dormitorio 2	11,61	30,19	1,32
Dormitorio 3	9,99	25,97	1,32
Baño	4,55	11,83	0,24
Pasillo	3,3	8,58	0

6.3.2.2.1 Ingreso de Setpoint del termostato

Ingresaremos hora por hora, para todos los periodos de simulación, la temperatura a la que se quiere mantener la zona térmica. Si no se ingresamos valores, entonces la zona térmica tomará la temperatura que naturalmente corresponda de acuerdo a sus pérdidas y ganancias térmicas. Usando la Tabla 6.11 fijamos la temperatura del termostato a 18ºC para los horarios de 0-8 hs y 20-23 hs y a 22,1ºC de 8 a 20 hs para el periodo otoño-invierno. Para el período primavera-verano fijamos el termostato de 18ºC para los horarios de 0-8 hs y 20-23 hs y a 24,4ºC de 8 a 20 hs. Al fijar la temperatura de termostato el software calculará la cantidad de calor que debe extraer (o agregar) al aire de la zona, hora por hora, para mantener esa temperatura. Estas variables se denominan usualmente 'carga de

calefacción' y 'carga de refrigeración' del edificio, y pueden estar dadas por día, mes o año.

Utilizar termostato es una manera rápida de predimensionar los sistemas de calefacción o refrigeración. Para dimensionar, se debe elegir el día con las condiciones meteorológicas más desfavorables (por ejemplo, el día más frío del invierno si está dimensionando el sistema de calefacción). El calor calculado no incluye las eficiencias de los equipos, la cual debe agregarse al cálculo para obtener el tamaño correcto del sistema.

6.3.2.2.2 Ganancias internas

Aquí definimos los equipos existentes en la zona que entregan/extraen calor y la cantidad de personas y periodo de uso u ocupación. La metodología es similar a la de ingreso del termostato. Se pueden ingresar cuatro tipos de ganancias internas: estufas (o refrigeración de aire con AC, en cuyo caso los valores deben ser negativos indicando que se extrae calor), iluminación (solamente la parte que se disipa como calor al ambiente, que generalmente es menor que el consumo eléctrico), personas y otros equipos (cualquiera que no entre en las categorías anteriores). Para cada uno hay que definir el número de equipos (o personas), la cantidad de calor (potencia en W) que entregan al ambiente y el periodo de uso. El programa, para cada tipo de ganancia, multiplica Número x Potencia x Uso, luego suma todas las ganancias. Simularemos que la vivienda está ocupada por una familia tipo de 4 personas.

6.3.2.2.3 Renovaciones de aire

Tenemos que ingresar los aportes (o pérdidas) de calor debido al ingreso de aire proveniente del exterior. Este ingreso puede ser voluntario (por ejemplo, ventilación por apertura de ventanas, extractores de aire, etc.) o involuntario (infiltraciones de aire a través de rendijas, marcos, etc., la cual depende de la calidad de la carpintería, de la velocidad de viento y de la diferencia de temperatura entre los lados de la carpintería). Es necesario un mínimo de renovaciones para tener el aire del ambiente en condiciones higiénicas (buena calidad de aire), y que este

mínimo depende del número de personas en la zona y del tipo de actividad desarrollada. Si se requiere ventilar mucho un ambiente en invierno por cuestiones de calidad de aire, para no perder energía es recomendable utilizar intercambiadores de calor aire-aire que pre-calienten el aire frío que entra al ambiente.

Para cada "zona térmica", se debe definir hora por hora la cantidad total de aire exterior que ingresa al ambiente (ya sea ventilación voluntaria o infiltraciones), en unidades de 1/h (es decir, la cantidad de veces que se renueva completamente el aire de la zona en una hora). Algunos valores orientativos para renovaciones de aire se dan en la Tabla 6.13.

Tabla 6.13: Números de renovaciones de aire por cada local. Fuente: IRAM 11604.

Tipo de local	Nº de renovaciones (1/h)
Baño privado	4-5
Biblioteca	4-5
Oficinas	4-8
Garaje	5
Restaurantes y casinos	8-12
Auditorios	6-8
Aulas	5-7
Cocina residencial	15-25
Habitaciones	3-8
Hospitales	5-6

Teniendo como guía la Tabla 6.13 utilizamos 2 renovaciones cada hora de 8 a 20 hs y 1 renovación cada hora de 0 a 8 hs y 20-23 hs, para cada zona térmica de la Tabla 6.12.

6.3.2.3 Conexión de las "zonas térmicas" con los elementos

Cada zona térmica se conecta a otra zona térmica o al ambiente exterior. Esta conexión se realiza a través de elementos predefinidos en SIMEDIF (si no se define ningún elemento, no hay conexión de este tipo entre zonas térmicas, lo cual significa que no hay ningún tipo de transferencia de calor entre ellas). Estos elementos en SIMEDIF son de dos tipos:

- Elementos sólidos: Paredes masivas, tabiques livianos, vidriados.
- Conexiones aire-aire: Aberturas y ventanillas (intercambio de aire bidireccional o unidireccional, respectivamente).

Una vez que se han descrito todos los elementos, se procede a simular todos los casos.

6.4 Caso Estratégico: pautas para la simulación

El Caso Estratégico incorpora en la simulación los ladrillos Puma Punku en la envolvente de la vivienda. Mientras que el piso es de hormigón armado con materiales reciclados (se detallan en el capítulo 4). En la Tabla 6.14 se detallan las propiedades térmicas de los materiales de muros y techos de la vivienda simulada.

Como se mencionó en el inciso 6.5.2 el Caso Estratégico se simulará para las cuatro orientaciones (S, O, N y E).

Tabla 6.14: Propiedades térmicas de los materiales de muros y techos requeridos para la simulación del Caso Estratégico.

Muros	**Capas**	***k*** **[W/mK]**	**ρ** **[kg/m^3]**	**C_p** **[J/kgK]**	**Espesor** **[m]**
Muro Exterior	Revoque exterior	1,16	1900	800	0.02
	Ladrillo Puma Punku	0,4	839	850	0,18
	Revoque interior	0,93	1900	800	0,02
Muro Interior	Revoque exterior	0,93	1900	800	0,02
	Ladrillo Puma Punku	0,45	839	850	0,12
	Revoque interior	0,93	1900	800	0,02
Techo	Cielo raso	0,58	1200	1080	0,095
	Cámara de aire	0,024	1,02	1012	0,78
	Chapa galvanizada	58	7900	450	0,0005

6.4.1 Pautas para la simulación

El valor del coeficiente se estimó a través de la correlación de (Duffie y Beckman, 2013) que considera la velocidad media de viento v (m/s) en el periodo de simulación. La Ecuación (6.17) calcula el coeficiente global de pérdida h_{ex} de las superficies exteriores. De acuerdo a (Hernández, 2016) el rango de confort esta entre 18°C a 24°C si la humedad relativa HR se encuentra entre 20 % y 80 %, pudiendo llegar a 26°C si HR=50 %. Otra alternativa para obtener la temperatura de confort es el desarrollado por (Muñoz Godoy, 2012) llamado "confort adaptativo", en la Ecuación (6.18) se detalla dicha expresión. A continuación, se detallan las restantes consideraciones para la simulación:

- *Definición del sitio, los datos meteorológicos y el período de simulación:* El sitio será Salta Capital como el Caso IPV, los datos meteorológicos son lo mismo que el Caso IPV (TMYPlus), mientras que el periodo de simulación también corresponde a otoño-invierno y primavera-verano.
- *División de la vivienda en zonas térmicas:* Son las mismas que el Caso IPV, la Tabla 6.10 detalla las Zonas Térmicas. El área vidriada será la misma salvo que las ventanas llevaran DVH.
- *Ingreso de Setpoint del termostato:* Para el Caso Estratégico también se fijó la temperatura del termostato a 18ºC para los horarios de 0-8 hs y 20-23 hs y a 22,1ºC de 8 a 20 hs para el periodo otoño-invierno. Para el período primavera-verano fijamos el termostato de 18ºC para los horarios de 0-8 hs y 20-23 hs y a 24,4ºC de 8 a 20 hs.
- *Ganancias internas:* Simularemos que la vivienda está ocupada por una familia tipo de 4 personas. En el periodo otoño-invierno se ingresará como ganancia interna el colector de aire desarrollado en el capítulo 5 de esta tesis.
- *Renovaciones de aire:* Teniendo como guía la Tabla 6.11 utilizamos 2 renovaciones cada hora de 8 a 20 hs y 1 renovación cada hora de 0 a 8 hs y 20-23 hs, para cada zona térmica de la Tabla 6.12.

6.5 Resultados de la simulación: otoño-invierno del Caso IPV

6.5.1 Temperaturas interiores periodo otoño-invierno Caso IPV

A continuación, analizaremos las temperaturas interiores del periodo otoño-invierno del caso IPV. La Figura 6.30 muestra la evolución de la temperatura exterior a la vivienda para dicho periodo. La misma es para todas las orientaciones (Sur, Oeste, Norte y Este).

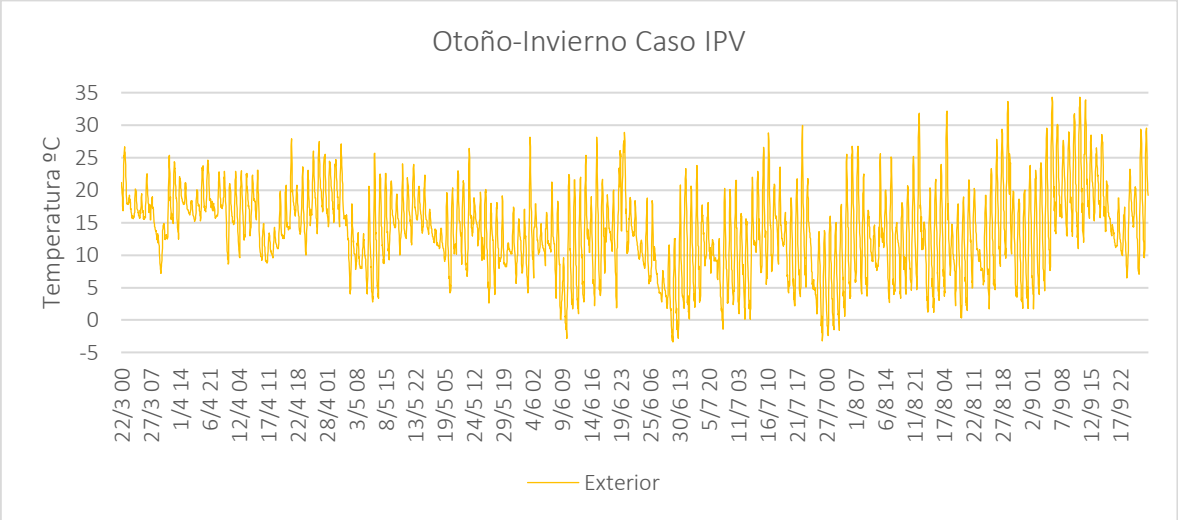


Fig.6.30: Evolución de la temperatura exterior del periodo otoño-invierno.

Por lo visto en la Figura 6.30, tenemos que la temperatura exterior estuvo entre -3,4ºC y 34,3ºC, con una temperatura media del periodo de 13,9ºC.

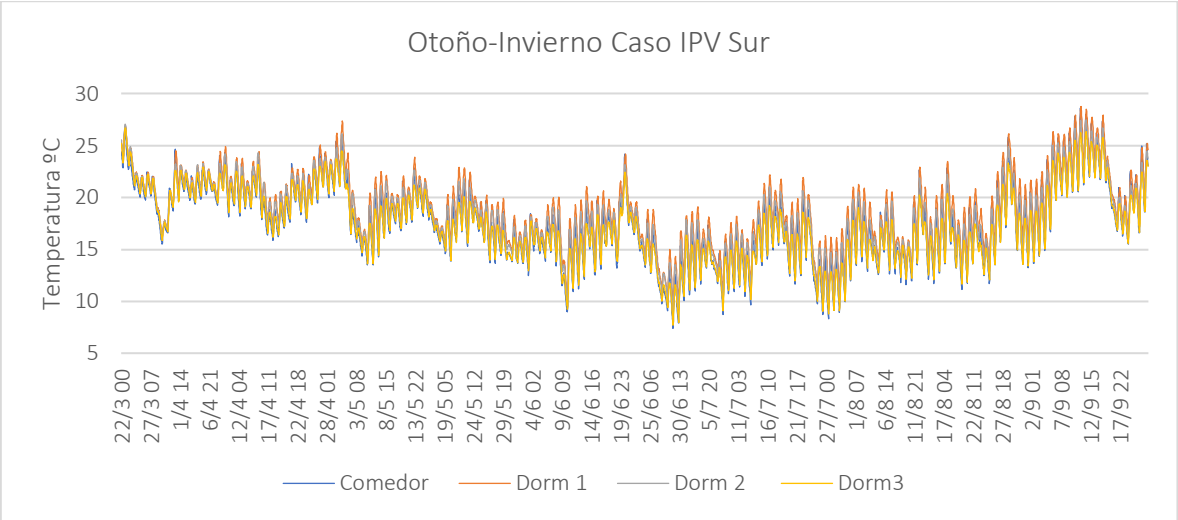


Fig. 6.31: Evolución de la temperatura de la vivienda del periodo otoño-invierno del Caso IPV Sur.

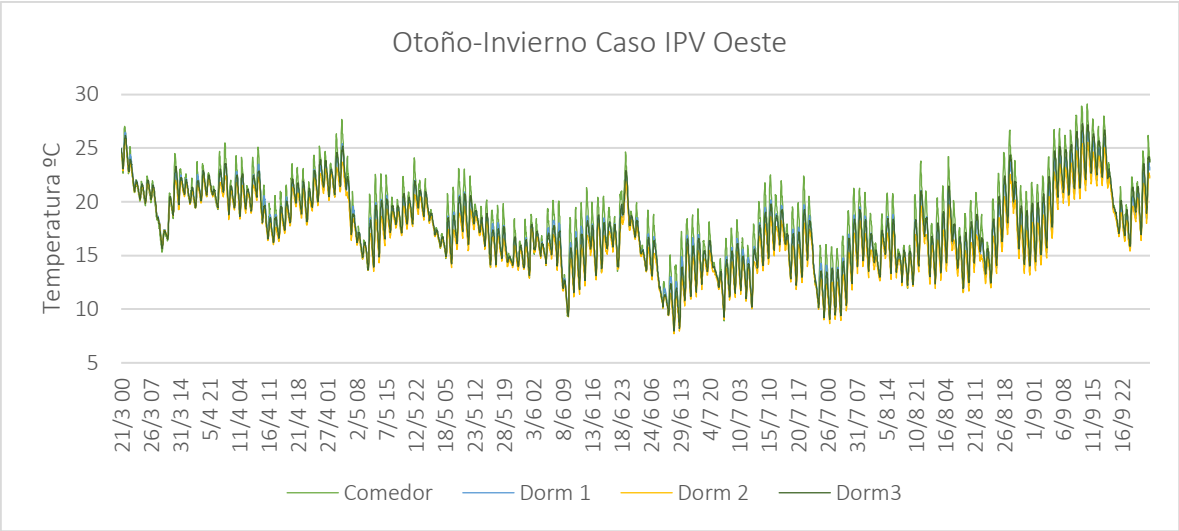


Fig. 6.32: Evolución de la temperatura de la vivienda del periodo otoño-invierno del Caso IPV Oeste.

En las Figuras 6.31 y 6.32 se muestran las evoluciones de las temperaturas interiores de los locales de la vivienda del caso IPV orientación sur y orientación oeste respectivamente. La temperatura mínima para el Comedor orientación sur es de 7,4 ºC mientras que para la orientación oeste es de 8,0 ºC, la temperatura media orientación sur es 14,4 ºC y 15,4 ºC orientación oeste. Para el Dormitorio 1 la temperatura mínima llego a los 9,5 ºC para la orientación sur, mientras que para la orientación oeste fue de 8,2 ºC. La media fue de 16,2 y 14,6 para las orientaciones sur y oeste. El Dormitorio 2 tuvo una mínima de 8,9 en la orientación sur y 7,7 ºC en la orientación oeste. La media fue de 15,5 ºC y 13,8 ºC para las orientaciones sur y oeste. Finalmente, el Dormitorio 3 tuvo mínimas de 7,7 ºC y 8,0 ºC, medias de 14,1 ºC y 14,4 ºC para las orientaciones sur y oeste respectivamente. La temperatura media exterior fue de 10,7 ºC y la mínima -3,4 ºC.

Las Figuras 6.33 detalla la evolución de las temperaturas interiores de los días 27, 28 y 29 de junio del caso IPV sur. Estos tres días fueron seleccionados ya que presentan las más bajas temperaturas exteriores del periodo otoño-invierno. Para el 27 de junio el local de menor temperatura fue el Comedor con 9,1 ºC, mientras que los dormitorios estuvieron entre 9,4 ºC y 10,4 ºC, cuando la temperatura mínima exterior llego a los 1,5 ºC. El 28 de junio la temperatura exterior mínima marco -3,4

ºC, la mínima de los dormitorios estuvo entre 7,7 ºC y 9,5 ºC, el Comedor en 7,4 ºC. Finalmente, para el 29 de junio las mínimas fueron; Comedor 7,9 ºC, Dormitorio 1 9,8 ºC, Dormitorio 2 9,8 ºC, Dormitorio 3 8,0 ºC y el exterior a -2,8 ºC.

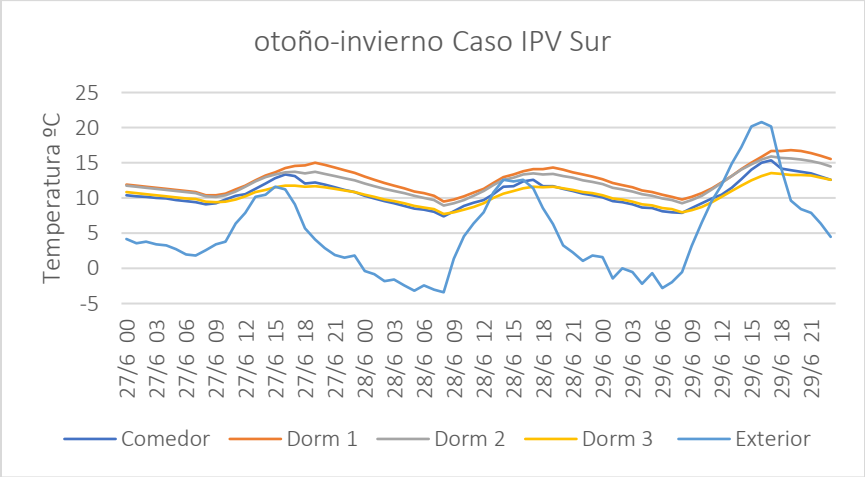


Fig. 6.33: Evolución de la temperatura de los días 27 al 29 de junio del Caso IPV Sur.

En la Figura 6.34 el grafico muestra las temperaturas interiores y exterior para el caso base oeste. Las temperaturas mínimas exteriores son las mismas que las del caso base sur. Para el 27 de junio las temperaturas mínimas estuvieron desde los 9,4 ºC hasta los 9,7 ºC para todos los locales, mientras que para el 28 de junio entre 7,7 ºC para el Dormitorio 2 y 8,2 ºC para el Dormitorio 1. Por último, el 29 de junio las mínimas fueron 8,0 para el Dormitorio 2 y 8,5 ºC para el Comedor.

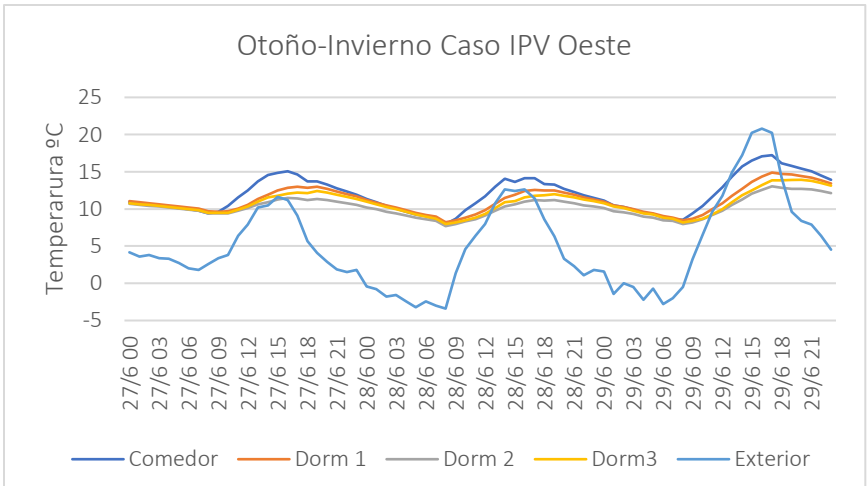


Fig. 6.34: Evolución de la temperatura de los días 27 al 29 de junio del Caso IPV Oeste.

En la Tabla 6.16 se detallan las temperaturas medias interiores y amplitudes térmicas para los días 27, 28 y 29 de junio, de los locales correspondiente a las orientaciones sur y oeste. Para la orientación sur las temperaturas medias interiores estuvieron entre 10,0 ºC en el Dormitorio 3 y los 13,2 ºC en el Dormitorio 2. Las amplitudes térmicas en los dormitorios estuvieron entre los 2,4 ºC en el Dormitorio 3 para el 27 de junio y los 7,0 ºC en el Dormitorio 1 para el 29 de junio.

Para la orientación oeste la temperatura media fue variando desde los 9,7 ºC ,en el Dormitorio 2, hasta los 12,6 ºC en el Comedor. En esta orientación tenemos menores amplitudes térmicas en los locales respecto de la orientación sur, las mismas van desde los 2,1 ºC hasta los 6,5 ºC en los Dormitorios. En el comedor ocurre lo contrario, tenemos mayores amplitudes térmicas respecto a la orientación sur, estas van desde los 5,6 ºC hasta los 8,7 ºC.

Tabla 6.16: Temperaturas medias de los locales interiores y las amplitudes térmicas correspondientes al Caso IPV Sur y Oeste.

Orientación	Dia	T_m [ºC] Comedor	T_m [ºC] Dor 1	T_m [ºC] Dor 2	T_m [ºC] Dor 3	T_m [ºC] Exterior
Sur	27-jun	10.9±4.3	12.5±4.6	12.0±3.5	10.7±2.4	5.0±10.1
	28-jun	10.1±5.2	12.2±4.8	11.6±4.6	10.0±3.9	3.5±16.0
	29-jun	11.1±7.4	13.2±7.0	12.6±6.6	10.8±5.6	7.0±23.6
Oeste	27-jun	12.0±5.6	11.3±3.4	10.5±2.1	10.9±2.9	5.0±10.1
	28-jun	11.3±6.2	10.7±4.4	9.7±3.5	10.3±4.0	3.5±16.0
	29-jun	12.6±8.7	11.6±6.5	10.5±5.1	11.1±5.7	7.0±23.6

En los gráficos de las Figuras 6.35 y 6.36 se presentan las evoluciones de las temperaturas interiores del periodo otoño-invierno, de la vivienda del caso IPV, orientación norte y este. Las temperaturas mínimas van desde los 7,2 ºC hasta los 8,4 ºC para la orientación norte. Las temperaturas medias estuvieron entre 13,6 ºC y 15,2 ºC.

Para la orientación este la temperatura mínima fue de 6,8 y se dio en el Comedor (ídem que la orientación norte), los dormitorios estuvieron entre 8,0 °C y 8,8 °C. Las temperaturas medias entre 13,6 °C y 15,4 °C.

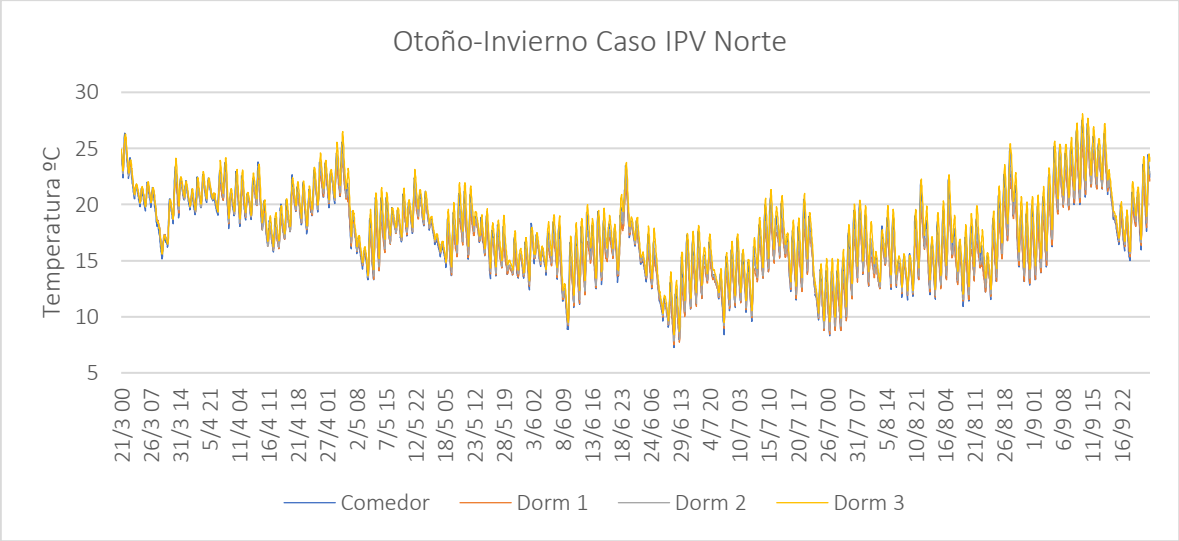


Fig. 6.35: Evolución de la temperatura de la vivienda del periodo otoño-invierno del Caso IPV Norte.

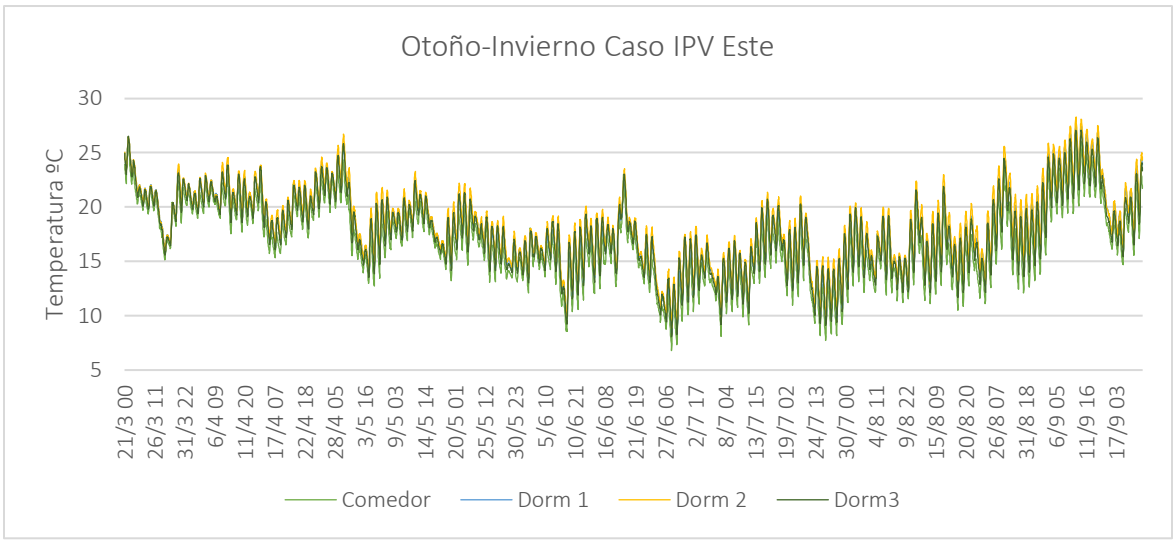


Fig. 6.36: Evolución de la temperatura de la vivienda del periodo otoño-invierno del Caso IPV Este.

En la Figura 6.37 se muestran las temperaturas interiores del caso IPV para los días 27, 28 y 29 de junio de la orientación norte. Las temperaturas mínimas de los dormitorios estuvieron entre 7,5 °C y 9,6 °C, mientras que el Comedor tuvo de mínimas entre 7,2 °C y 9,1 °C.

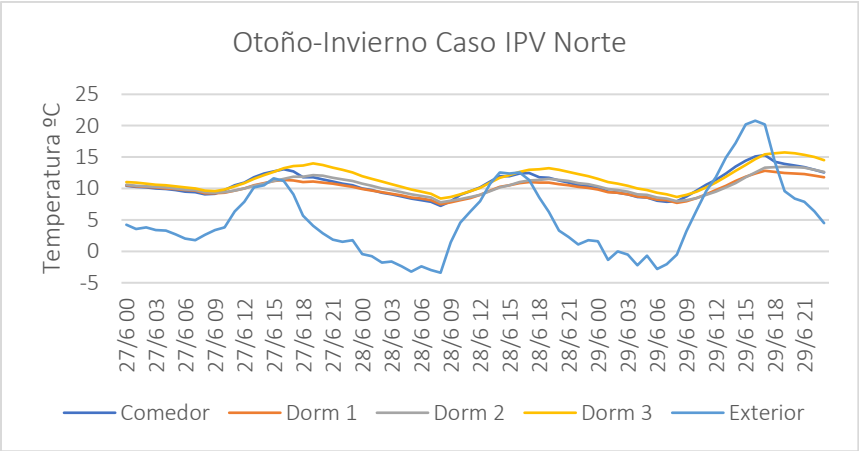


Fig. 6.37: Evolución de la temperatura de los días 27 al 29 de junio del Caso IPV Norte.

Para los días 27 al 29 de junio de la orientación Este del caso IPV (Figura 6.38), las temperaturas mínimas del comedor estuvieron entre 6,8ºC y 8,7ºC, mientras que los dormitorios entre 8ºC (Dormitorio 3, 28 de junio) y los 9,9ºC (Dormitorio 2, 27 de junio). La temperatura exterior presento mínimas entre -3,4ºC y 1,5ºC. Para las temperaturas máximas, los dormitorios tuvieron valores entre 12,2ºC (Dormitorio 1, 28 de junio) y los 15,9ºC (Dormitorio 2, 29 de junio), el Comedor estuvo entre 11,5ºC y 14,1ºC. Las máximas exteriores entre 11,6ºC (27 de junio) y 20,8ºC (29 de junio).

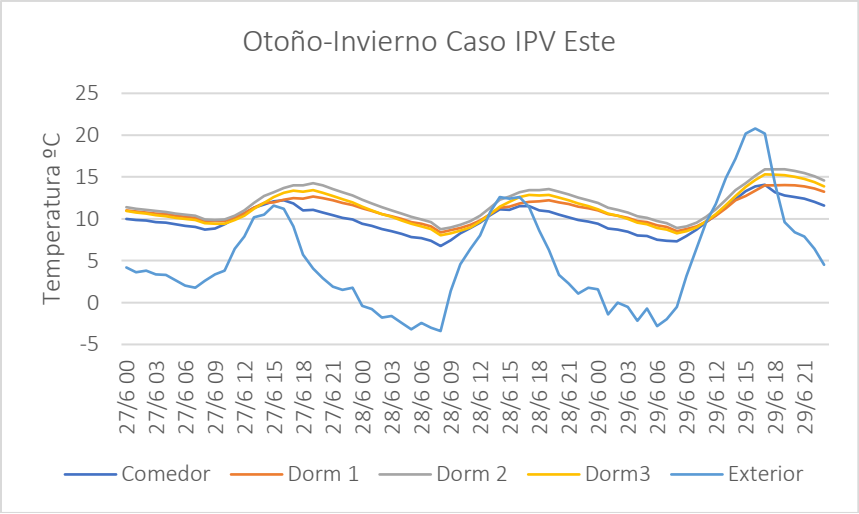


Fig. 6.38: Evolución de la temperatura de los días 27 al 29 de junio del Caso IPV Este.

En la Tabla 6.17 se detallan las temperaturas medias y las amplitudes térmicas, de cada local de la vivienda caso IPV orientaciones norte y este, para los

días entre el 27 y 29 de junio. Las temperaturas medias de los dormitorios estuvieron entre 9,5 ºC y 12,1 ºC para la orientación norte. Los dormitorios de la orientación este, tuvieron temperaturas medias entre 10,6 ºC y 12,4 ºC. La temperatura media del Comedor estuvo entre 10,1 ºC y 11,3 ºC para la orientación norte, mientras que, para la orientación este, entre 9,4 ºC y 10,4 ºC.

Por otro lado, las amplitudes térmicas de la orientación norte de los dormitorios estuvieron entre 2,1 ºC y 7,1 ºC, perteneciendo la mayor al Dormitorio 3. El Comedor tuvo amplitudes entre 4,0 ºC y 7,4 ºC. Los dormitorios de la orientación este presentaron amplitudes térmicas entre 2,9 ºC y 7,1 ºC (mayor amplitud en el Dormitorio 3). La amplitud térmica del Comedor estuvo entre 3,5 ºC y 6,8 ºC.

Tabla 6.17: Temperaturas medias de los locales interiores y las amplitudes térmicas correspondientes al Caso IPV Norte y Este.

Orientación	Dia	T_m [ºC] Comedor	T_m [ºC] Dor 1	T_m [ºC] Dor 2	T_m [ºC] Dor 3	T_m [ºC] Exterior
Norte	27-jun	10.8±4.0	10.3±2.1	10.6±2.8	11.6±4.4	5.0±10.1
	28-jun	10.1±5.3	9.5±3.5	9.9±3.8	11.1±4.8	3.5±16.0
	29-jun	11.3±7.4	10.3±5.1	10.7±5.5	12.1±7.1	7.0±23.6
Este	27-jun	10.3±3.5	11.2±2.9	11.9±4.4	11.3±4.0	5.0±10.1
	28-jun	9.4±4.8	10.6±3.8	11.5±4.8	10.7±4.8	3.5±16.0
	29-jun	10.4±6.8	11.4±5.5	12.4±7.0	11.7±7.1	7.0±23.6

6.5.2 Carga de calefacción del Caso IPV periodo otoño-invierno.

En los gráficos de las Figuras 6.39 y Figura 6.40 se detallan las necesidades energéticas auxiliares correspondiente al periodo otoño-invierno, de los locales del Caso IPV orientación sur y oeste respectivamente. La demanda de energía auxiliar está sujeta al intervalo de temperatura interior de 18 °C a 22,1 °C. Como estamos analizando el periodo otoño-invierno, la energía auxiliar seria la carga de calefacción necesaria para que el interior de la vivienda del caso IPV, este en el intervalo de temperatura anteriormente mencionado. para la orientación sur, el valor máximo de

energía auxiliar se dio en el Comedor y fue de 2201 W, las máximas de los dormitorios estuvieron entre 1334 W y 1464 W, mientras que el promedio diario máximo de energía auxiliar estuvo entre 1075 W y 1122 W. En el Comedor fue mayor el valor ya que marco 1647 W. La carga de calefacción promedio mensual para el Dormitorio 1 es de 104 W, del Dormitorio 2 es 151 W, Dormitorio 3 dio 239 W. El Comedor tuvo un promedio mensual de carga de calefacción de 360 W.

En la orientación oeste los valores máximos de los dormitorios estuvieron entre 1346 W y 1436 W, mientras que el Comedor dio 2105 W. Los promedios diarios máximos de los locales fueron; Comedor 1513 W, Dormitorio 1 1043 W, Dormitorio 2 1052 W y Dormitorio 3 981 W. Los promedios mensuales de carga de calefacción estuvieron entre 195 W y 277 W, siendo el menor para el Dormitorio 1 y el mayor para Dormitorio 2.

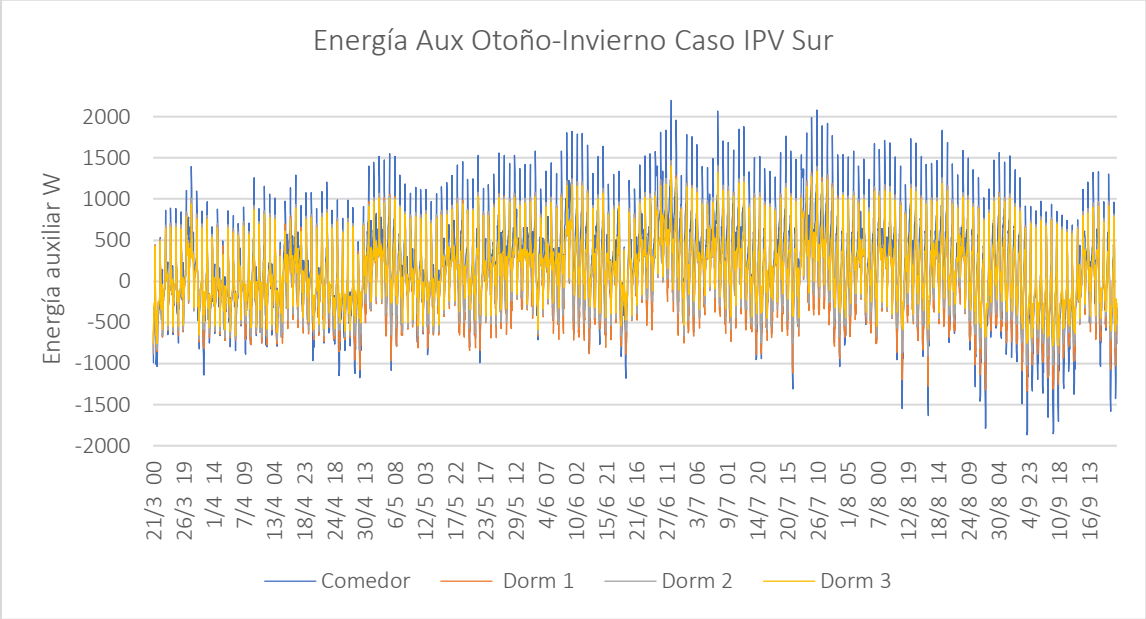


Fig. 6.39: Demanda de Energía auxiliar del periodo otoño-invierno para el Caso IPV Sur.

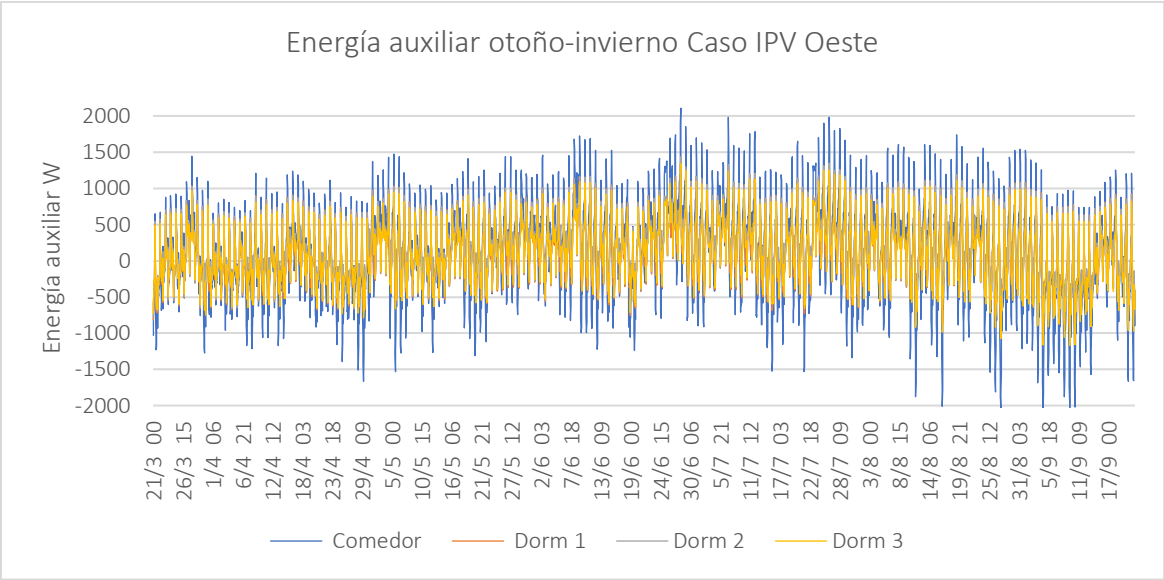


Fig. 6.40: Demanda de Energía auxiliar del periodo otoño-invierno para el Caso IPV Oeste.

En la Figura 6.41 tenemos la demanda de energía auxiliar para la orientación sur de los días 27, 28 y 29 de junio. Los valores máximos de los dormitorios estuvieron entre 1180 W (Dormitorio 3) y 1464 W (Dormitorio 2), mientras que los promedios diarios entre 228 W (Dormitorio 1) y 584 W (Dormitorio 3). El comedor presento valores entre 1837 W y 2201 W, y su promedio diario estuvo entre 697 W y 936 W.

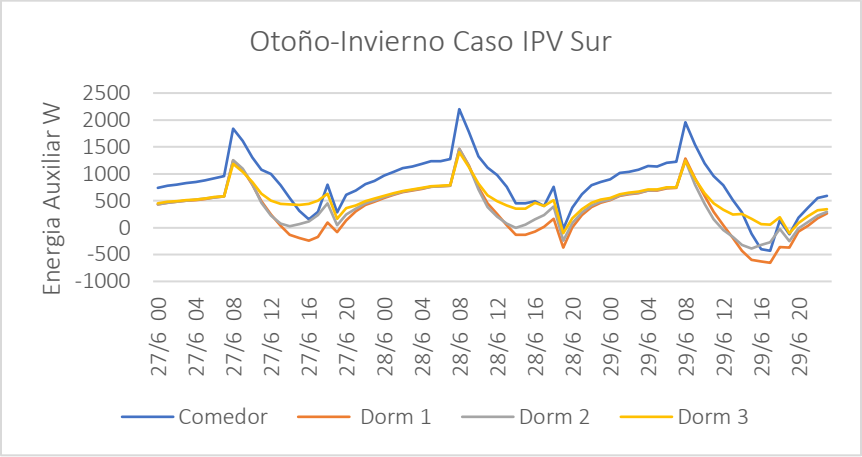


Fig. 6.41: Demanda de Energía auxiliar de los días 27 al 29 de junio para el Caso IPV Sur.

Para la orientación Oeste (Figura 6.42), los valores de los dormitorios estuvieron entre 1095 W (Dormitorio 3) y 1436 W (Dormitorio 2), mayores que la orientación sur. los promedios diarios dieron entre 344 W (Dormitorio 1) y 653 W

(Dormitorio 2), ambos mayores que orientación sur. Distinto es el caso del comedor que tuvo valores menores que la orientación sur, de entre 1737 W y 2105 W. Sus promedios diarios estuvieron entre 443 W y 785 W.

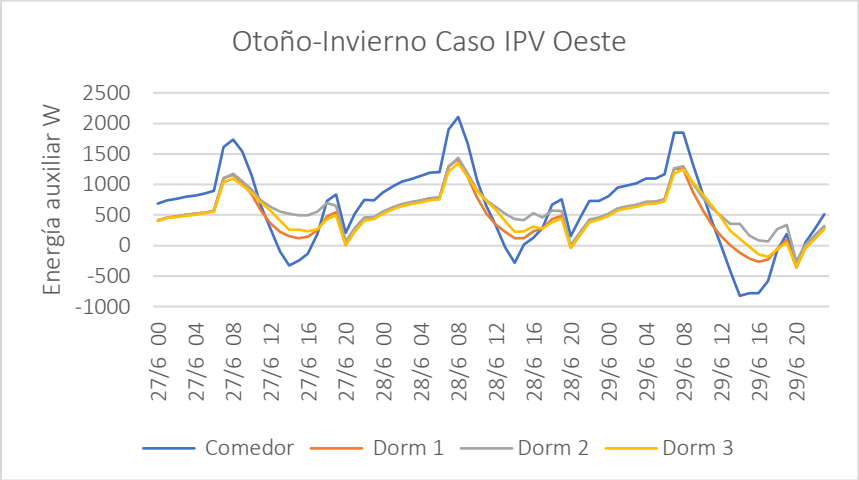


Fig. 6.42: Demanda de Energía auxiliar de los días 27 al 29 de junio para el Caso IPV Oeste.

El valor máximo para los dormitorios es 1446 W y corresponde al Dormitorio 2 de la orientación norte (Figura 6.42), el promedio máximo diario fue de 1058 W y corresponde al mismo dormitorio y orientación. Los promedios mensuales de los dormitorios para la orientación Norte (Figura 6.43) fueron entre 144 W y 264 W y para la orientación Este (Figura 6.44) estuvieron entre 142 W (Dormitorio 2) y 193 W (Dormitorio 1). El comedor de la orientación este tuvo una máxima de 2179 W y de promedio diario máximo 1566 W, mientras que el comedor de la orientación norte tuvo un 3 % menos.

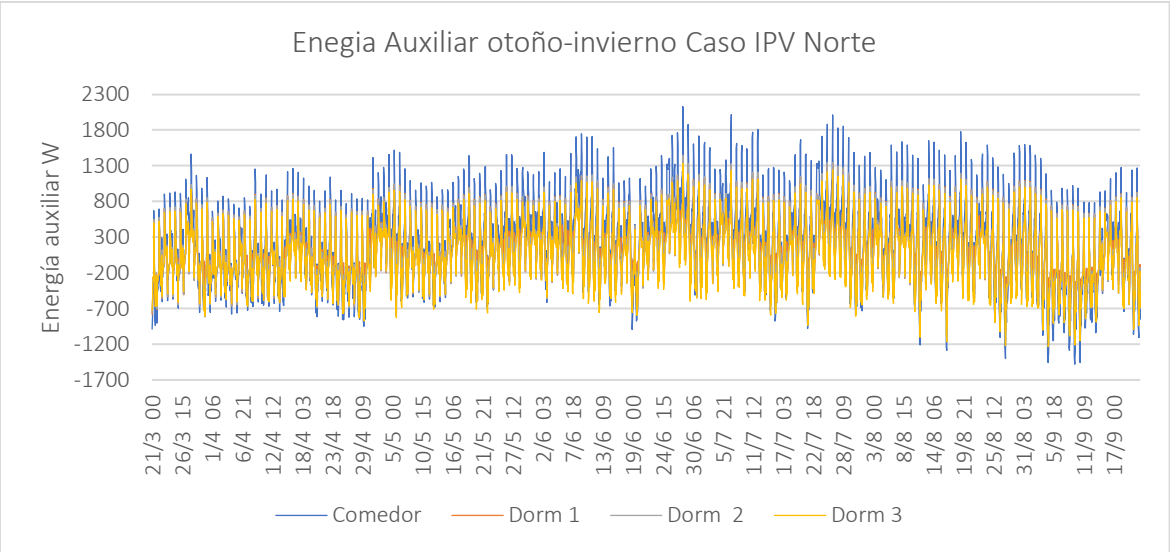


Fig. 6.43: Demanda de Energía auxiliar del periodo otoño-invierno para el Caso IPV Norte.

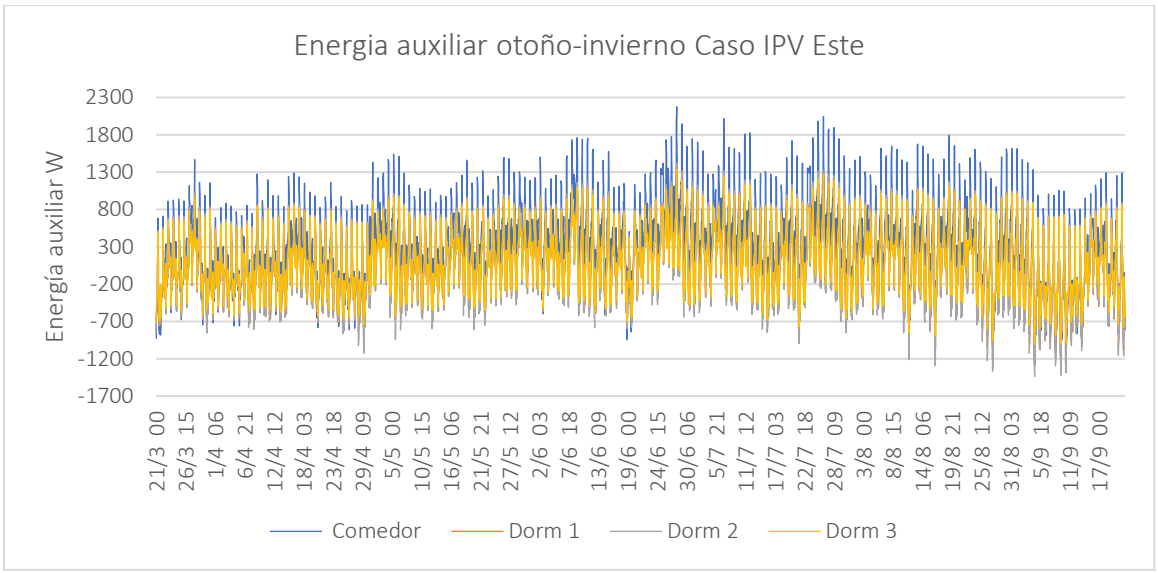


Fig. 6.44: Demanda de Energía auxiliar del periodo otoño-invierno para el Caso IPV Este.

Por lo visto en los resultados de los gráficos de las Figura 6.45 y Figura 6.46, el valor promedio diario de los dormitorios estuvo entre 265 W (Dormitorio 3 orientación norte, el 29 de junio) y 630 W (Dormitorio 1 orientación norte, el 28 de junio). El valor máximo se dio en el Dormitorio 2 (1446 W). Para la orientación este los promedios diarios fueron entre 271 W (Dormitorio 2, el 29 de junio) y 567 W (Dormitorio 1, el 28 de junio). El comedor de la orientación norte presento valores promedios diarios, entre 613 W (29 de junio) y 924 W (28 de junio), mientras que el

comedor de la orientación este sus valores estuvieron entre 773 W (29 de junio) y 1024 W (28 de junio).

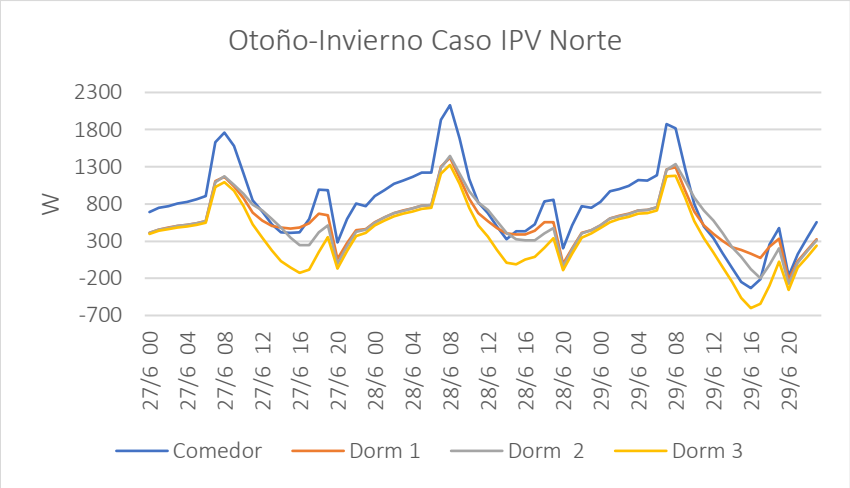


Fig. 6.45: Demanda de Energía auxiliar de los días 27 al 29 de junio para el Caso IPV Norte.

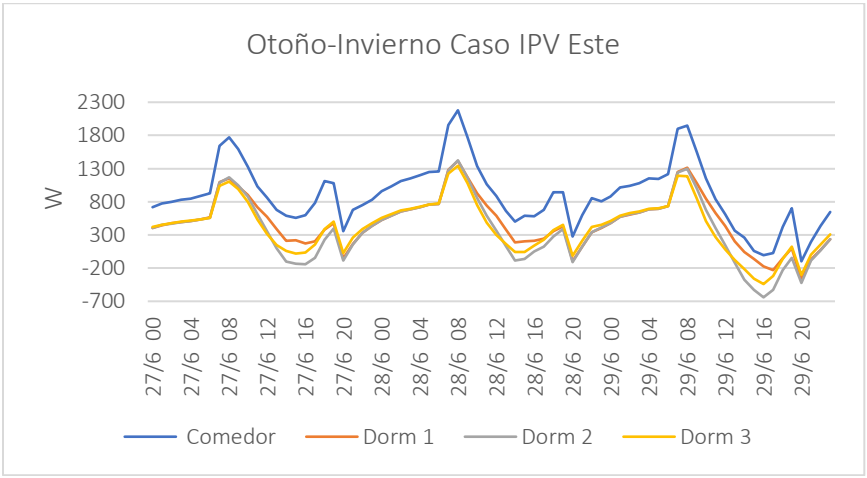


Fig. 6.46: Demanda de Energía auxiliar de los días 27 al 29 de junio para el Caso IPV Este.

Ahora analizamos la carga de calefacción necesaria en cada local de la vivienda dependiendo de la orientación y el día simulado. Para ello, en la Tabla 6.18 se muestran los valores de energía auxiliar total diaria necesaria para mantener la temperatura en el intervalo (18 ºC a 22,1 ºC) del periodo otoño-invierno. Se le agregaron el local llamado Toilet (Baño de la vivienda) y el Pasillo porque ambos aportan demanda de energía. La orientación norte fue la de mayor carga de calefacción total de la vivienda, con valores de 69,7 KW (28 de junio), 62,2 KW (27 de junio), y 48,2 KW (29 de junio). Donde el Dormitorio 1 fue el que mayor carga de

calefacción demando los tres días. Ordenando de mayor a menor carga de calefacción total de la vivienda, le sigue la orientación este con un promedio diario de 58,6 KW, donde el Dormitorio 1 fue el local de mayor demanda energética. En tercer lugar, está la orientación oeste, con un promedio diario de 54,5 KW, aquí el Dormitorio 2 fue el de mayor necesidad energética. Finalmente, la orientación sur fue la de menor carga de calefacción con 53,5 KW, el Dormitorio 3 fue el local de mayor carga de calefacción durante los tres días de ensayos.

Tabla 6.18: Carga térmica de calefacción en KW requerida en cada uno de los locales, según la orientación correspondiente al periodo otoño-invierno del caso IPV, para mantener la temperatura interior entre 18 ºC y 22,1°C.

Orientación	Días	Comedor [KW]	Dor 1 [KW]	Dor 2 [KW]	Dor 3 [KW]	Toilet [KW]	Pasillo [KW]	Total [KW]
Sur	27-jun	19.7	8.5	10.5	13.2	3.2	1.3	56.4
	28-jun	22.5	10.2	11.4	14.0	2.9	1.1	62.1
	29-jun	16.7	5.5	6.7	10.8	1.5	0.7	41.9
Oeste	27-jun	15.6	11.5	14.3	12.1	2.8	1.3	57.7
	28-jun	18.8	13.2	15.7	13.7	1.7	1.0	64.1
	29-jun	10.6	8.3	12.0	9.8	0.3	0.7	41.7
Norte	27-jun	20.1	14.0	13.2	9.4	4.2	1.2	62.2
	28-jun	22.2	15.1	15.1	11.5	4.6	1.3	69.7
	29-jun	14.7	11.5	11.3	6.4	3.3	1.0	48.2
Este	27-jun	22.0	11.8	9.7	10.7	4.5	1.2	59.9
	28-jun	24.6	13.6	11.9	12.5	4.9	1.3	68.8
	29-jun	18.5	9.7	6.5	7.4	3.9	1.0	47.1

6.5.3 Grados día del periodo otoño-invierno Caso IPV

En la Tabla 6.19 se detallan los Grados Dia Mensuales de Calefacción (GDC) para la temperatura base 22,1 ºC. Recordemos que los Grados Días me dicen la

necesidad de calefacción o enfriamiento que posee una vivienda de una localidad en particular. De acuerdo a los resultados, el mes de junio es el de mayor GDC22 con 283 °C día/mes, seguido por julio con 274 °C.día/mes, mayo con 241 °C.dia/mes, abril y agosto con 166 °C.dia/mes y finalmente marzo con 138 °C.día/mes.

Tabla 6.19: Grados día mensual del periodo otoño-invierno.

Meses	**Marzo**	**Abril**	**Mayo**	**Junio**	**Julio**	**Agosto**
°C.día/ mensual	138	166	241	283	274	166

6.6 Resultados de la simulación: otoño-invierno del Caso Estratégico

A continuación, se muestran los resultados de las simulaciones de la vivienda IPV con las recomendaciones propuesta por el tesista.

6.6.1 Temperaturas interiores periodo otoño-invierno Caso Estratégico

Primero que nada, tenemos que recordar que en la Figura 6.30 tenemos la evolución de la temperatura exterior de la vivienda, esta es la misma para ambos casos, ya sea el Caso IPV como el Caso Estratégico.

En las Figuras 6.47 tenemos la evolución de las temperaturas interiores de la vivienda orientación sur del Caso Estratégico, correspondientes al periodo otoño-invierno. El resultado de la simulación para este caso aporto que las temperaturas medias aumentaron con respecto al Caso IPV, por ejemplo, en el Comedor, de mayo a julio las medias fueron 17,9 °C, 15,5 °C y 14,7 °C respectivamente, mientras que para el Caso IPV eran 17,4 °C, 15 °C y 14,4 °C para los mismos meses. Las temperaturas mínimas para el Caso Estratégico también presentaron aumentos con respecto al Caso IPV, el mes de junio tenia de temperatura mínima 7,4 °C y con el Caso Estratégico 9,8 °C. El otro mes de menores temperaturas es julio, donde la temperatura mínima era de 8,4 °C y con el Caso Estratégico aumento a 10,5 °C.

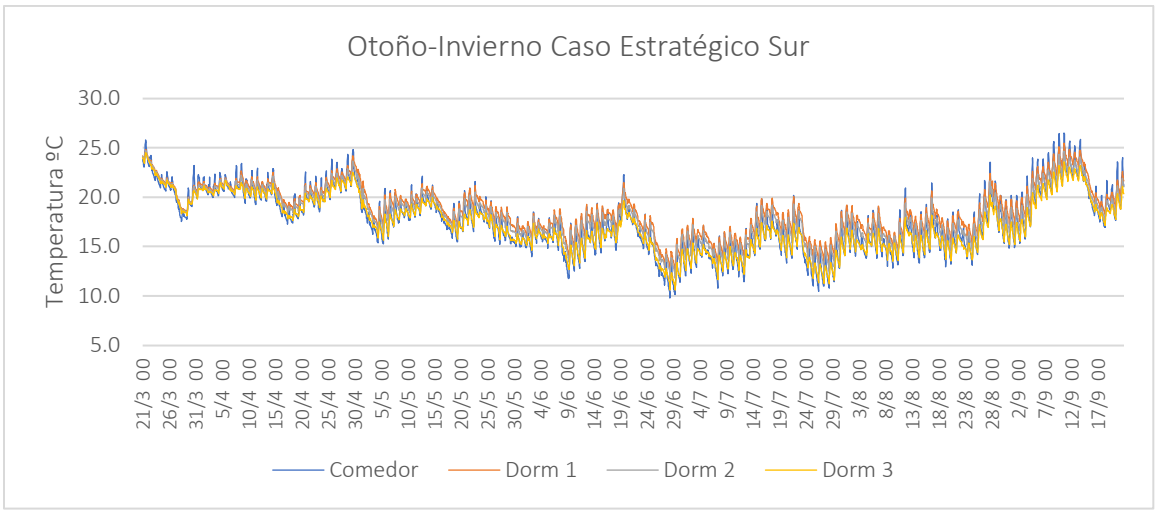


Fig. 6.47: Evolución de la temperatura de la vivienda del periodo otoño-invierno del Caso Estratégico Sur.

En el caso de los dormitorios, las temperaturas medias del Dormitorio 1 van desde los 16,4 ºC (julio) a los 21,5 ºC (septiembre), en el Caso IPV iban desde los 16,2ºC (julio) a 22,6ºC (septiembre). Las temperaturas mínimas también presentaron aumentos ya que pasaron de 9,5ºC a 12,3 ºC. En el Dormitorio 2 las medias estuvieron entre 15,7ºC (julio) y 21,2ºC (marzo), en el Caso IPV eran de 15,5ºC (julio) a 21,8ºC (septiembre). Para las temperaturas mínimas se incrementaron de 8,9ºC (Caso IPV) a 11,7ºC (Caso Estratégico). Finalmente, en el Dormitorio 3 las medias aumentaron de 14,1ºC a 14,4ºC y las mínimas de 7,7ºC a 10,6ºC.

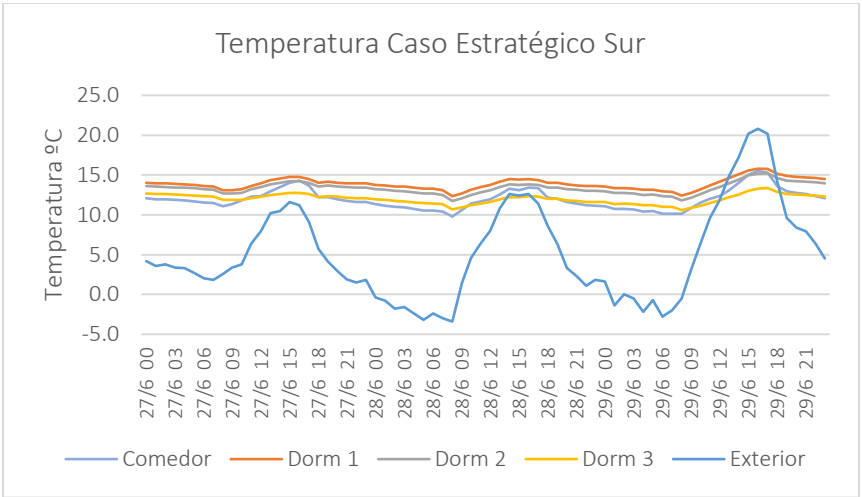


Fig. 6.48: Evolución de la temperatura de los días 27 al 29 de junio del Caso Estratégico Sur.

En la Figura 6.48 tenemos el grafico de las temperaturas interiores de los días 27 al 29 de junio para el Caso Estratégico orientación sur. La Tabla 6.20 detalla las temperaturas medias interiores de la vivienda para el Caso Estratégico orientación sur. Las medias del comedor estuvieron entre 11,5ºC y 12,2ºC, con amplitudes térmicas de entre 3,2ºC y 5,4ºC. En el Caso IPV las medias eran de 10,1ºC a 11,1ºC, amplitudes térmicas de 4,3ºC a 7,4ºC. Los dormitorios tuvieron también aumentos en las temperaturas medias, ya que estuvieron entre 11,7ºC (Dormitorio 3), 1,7ºC más que caso IPV, y 14,1ºC (Dormitorio 2), 1ºC más que caso IPV, con amplitudes térmicas de 1,7ºC (3,9ºC caso IPV) y 3,4ºC (7ºC caso IPV) respectivamente. Las temperaturas exteriores estuvieron entre 3,5ºC y 7ºC con grandes amplitudes que iban desde 10,1ºC (27 de junio) a 23,6ºC (29 de junio).

Tabla 6.20: Temperaturas medias y amplitudes térmicas Caso Estratégico Orientación sur.

Orientación	Dia	T_m [ºC] Comedor	T_m [ºC] Dor 1	T_m [ºC] Dor 2	T_m [ºC] Dor 3	T_m [ºC] Exterior
Sur	27-jun	12.2±3.19	13.9±1.72	13.5±1.59	12.4±0.87	5.0±10.1
	28-jun	11.5±3.65	13.6±2.15	13.0±2.12	11.7±1.68	3.5±16.0
	29-jun	12.1±5.4	14.1±3.4	13.5±3.4	11.9±2.8	7.0±23.6

Las Figuras 6.49 y 6.50 muestran las evoluciones de las temperaturas interiores del Caso Estratégico oeste. Las temperaturas medias van desde los 14,2ºC en julio para el Dormitorio 2 (13,8ºC en Caso IPV) hasta los 20,6ºC en abril para Dormitorio 1 (20,8ºC en Caso IPV). Las temperaturas mínimas interiores mostraron valores desde los 10,5ºC en el Comedor (7,7ºC en Caso IPV) hasta los 18,2ºC en el Dormitorio 1 (16,3ºC en Caso IPV).

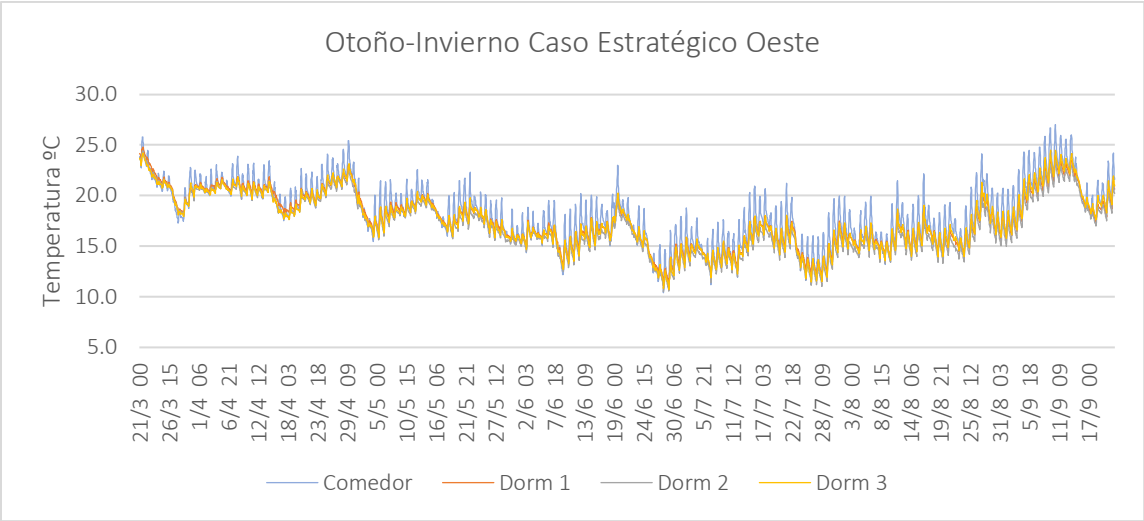


Fig. 6.49: Evolución de la temperatura de la vivienda del periodo otoño-invierno del Caso Estratégico Oeste.

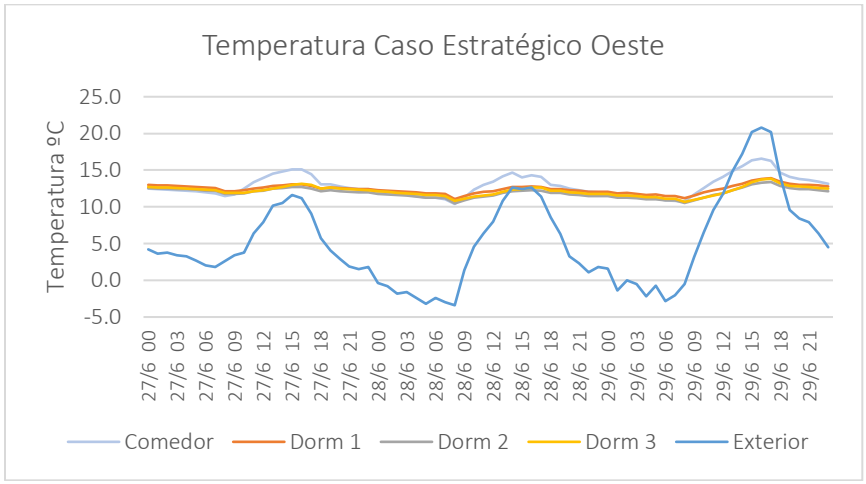


Fig. 6.50: Evolución de la temperatura de los días 27 al 29 de junio del Caso Estratégico Oeste.

Para las simulaciones del 27 al 29 de junio, Tablas 6.21, las temperaturas medias estuvieron entre los 11,6ºC en el Dormitorio 2 (9,7ºC en Caso IPV) y los 13,1ºC en el Comedor (12,6ºC en el Caso IPV). También se vieron mejoras en las amplitudes térmicas, que pasaron desde los 8,7ºC en el Comedor Caso IPV a los 5,8ºC en el Caso Estratégico para el mismo local. En el caso de los dormitorios, las mayores amplitudes se dieron en el Dormitorio 1 donde iban desde los 3,4ºC hasta los 6,5ºC y con el Caso Estratégico, esto bajo desde los 0,9ºC hasta los 2,7ºC.

Tabla 6.21: Temperaturas medias y amplitudes térmicas Caso Estratégico Orientación Oeste.

Orientación	Dia	T_m [ºC] Comedor	T_m [ºC] Dor 1	T_m [ºC] Dor 2	T_m [ºC] Dor 3	T_m [ºC] Exterior
Oeste	27-jun	13.0±3.7	12.7±0.9	12.3±0.9	12.5±1.3	5.0±10.1
	28-jun	12.4±4.2	12.1±1.7	11.6±1.8	11.9±1.8	3.5±16.0
	29-jun	13.1±5.8	12.5±2.7	11.9±2.9	12.1±3.2	7.0±23.6

Ahora analizamos las evoluciones de las temperaturas interiores para la orientación norte, Figura 6.51. Las temperaturas medias del comedor estuvieron entre 15ºC (14,3ºC Caso IPV) y los 17,9ºC (17,3ºC en el caso IPV). Los dormitorios se mantuvieron entre 13,9ºC (Dormitorio 1, 13,6ºC en el caso IPV) y los 20,7ºC (Dormitorio 3, 20,9ºC para el Caso IPV). Las temperaturas mínimas dieron entre 9,9ºC en el comedor (7,3ºC caso IPV) y los 18ºC en el Dormitorio 3 (16,3ºC en el caso IPV).

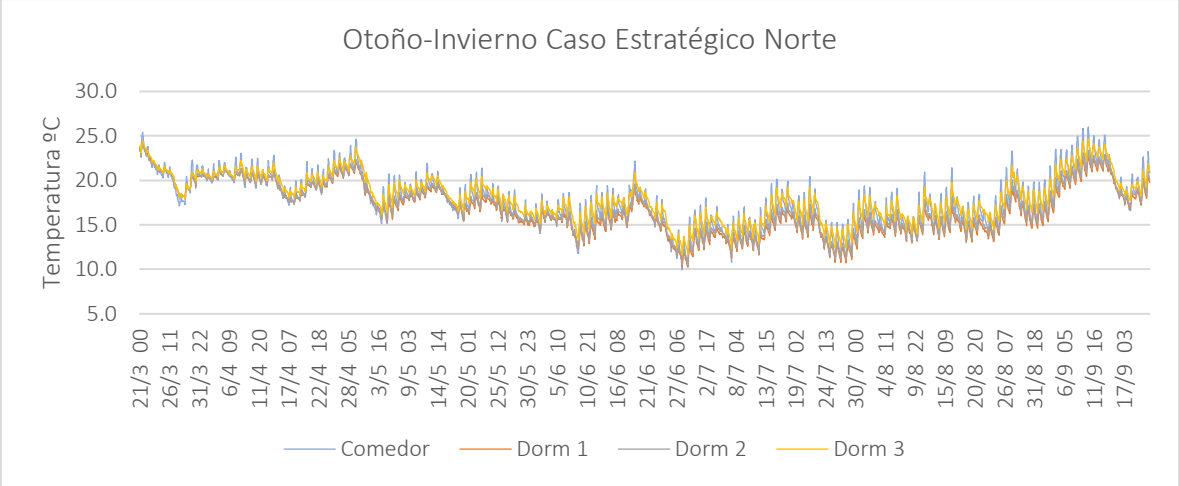


Fig. 6.51: Evolución de la temperatura de la vivienda del periodo otoño-invierno del Caso Estratégico Norte.

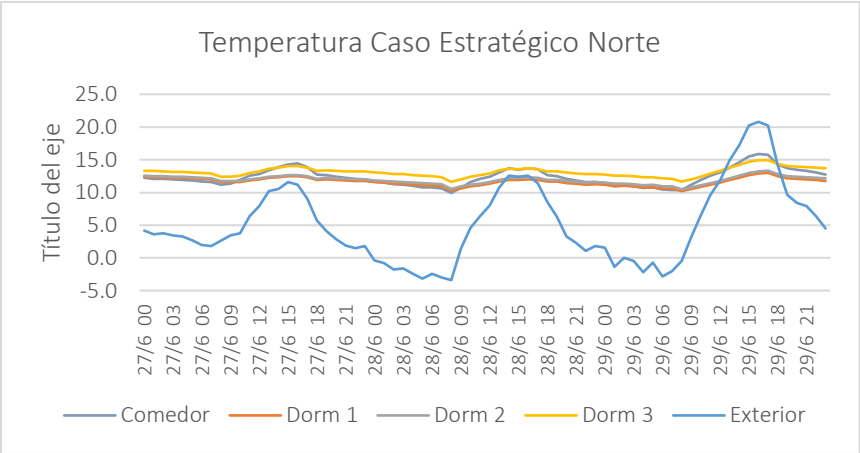


Fig. 6.52: Evolución de la temperatura de los días 27 al 29 de junio del Caso Estratégico Norte.

En la Figura 6.52 podemos ver la evolución de las temperaturas interiores para los días 27 al 29 de junio, las medias estuvieron entre 11,4ºC y amplitud térmica de 1,7ºC en el Dormitorio 1 (9.5ºC±3.5ºC en el caso IPV) y los 13,2ºC y amplitud térmica de 1,6ºC en el Dormitorio 3 (12,1ºC±7,1ºC para el caso IPV). En la Tabla 6.22 se detallan todas las temperaturas medias de la vivienda y sus amplitudes térmicas respectivas.

Tabla 6.22: Temperaturas medias y amplitudes térmicas Caso Estratégico Orientación Norte.

Orientación	Dia	T_m [ºC] Comedor	T_m [ºC] Dor 1	T_m [ºC] Dor 2	T_m [ºC] Dor 3	T_m [ºC] Exterior
Norte	27-jun	12.5±3.2	12.1±0.9	12.2±0.9	13.2±1.6	5.0±10.1
	28-jun	11.9±3.8	11.4±1.7	11.6±1.7	12.9±2.1	3.5±16.0
	29-jun	12.6±5.5	11.5±2.8	11.8±2.8	13.2±3.3	7.0±23.6

Finalmente analizamos la orientación Este del Caso Estratégico, en la Figura 6.53 se muestran las evoluciones de las temperaturas interiores de dicha orientación. Las medias del Comedor estuvieron entre 14,1ºC (13,6ºC en el caso IPV) y los 20,2ºC (20ºC en el caso IPV).). En los dormitorios las medias rondaron entre 14,7ºC en el Dormitorio 1 (14,6ºC en el caso IPV) y los 20,5ºC en el Dormitorio 3 (21ºC en el caso

IPV). Las temperaturas mínimas de la vivienda estuvieron entre 9,2ºC en el Comedor (6,8ºC en el caso IPV) y los 17,9ºC en el Dormitorio 2 (16,6ºC en el caso IPV).

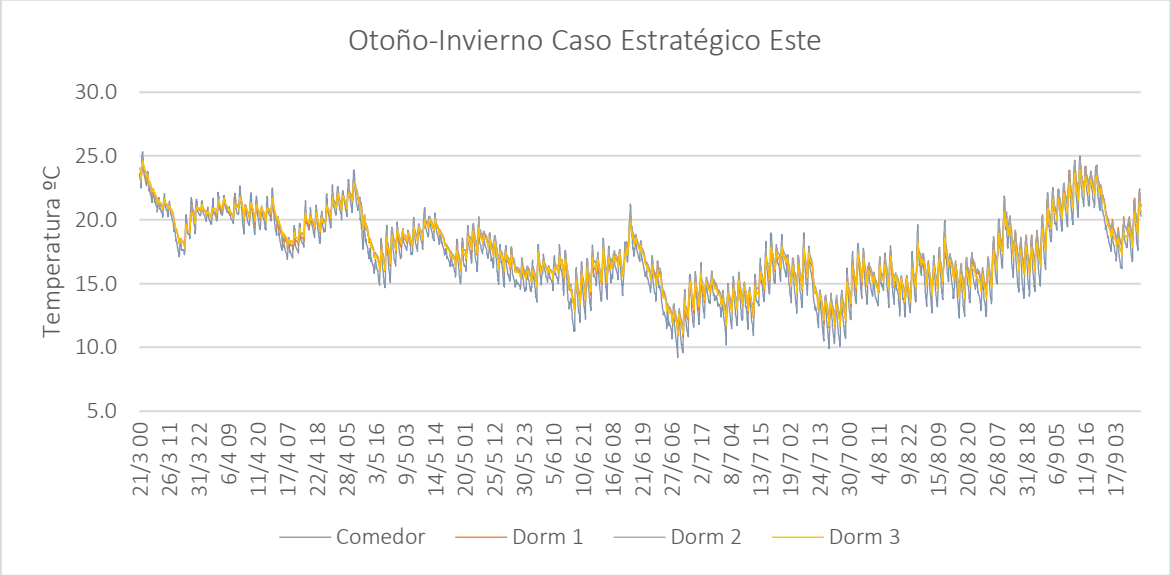


Fig. 6.53: Evolución de la temperatura de la vivienda del periodo otoño-invierno del Caso Estratégico Este.

En el gráfico de la Figura 6.54 se muestran las temperaturas interiores de los días 27, 28 al 29 de junio del caso Estratégico Este. Las temperaturas medias del Comedor estuvieron entre 11,1ºC (9,4ºC en el Caso IPV) y 11,8ºC (10,3ºC en el caso IPV), las amplitudes térmicas entre 2,7ºC y 5ºC (3,5ºC y 6,8ºC en el caso IPV). En la Tabla 6.20 se detallan las medias y las amplitudes. En el caso de los dormitorios, el de menor temperatura media fue el Dormitorio 3 con 12ºC (10,7ºC), como así también en las amplitudes térmicas entre 0,9ºC y 2,7ºC (4ºC y 7,1ºC en el caso IPV). El Dormitorio 2 fue el de mayor temperatura media con 12,8ºC (11,9ºC en el caso IPV) y una amplitud térmica de 1,3ºC (4,4ºC en el caso IPV). Las temperaturas exteriores estuvieron entre 3,5ºC y 7ºC, mismas condiciones del caso IPV.

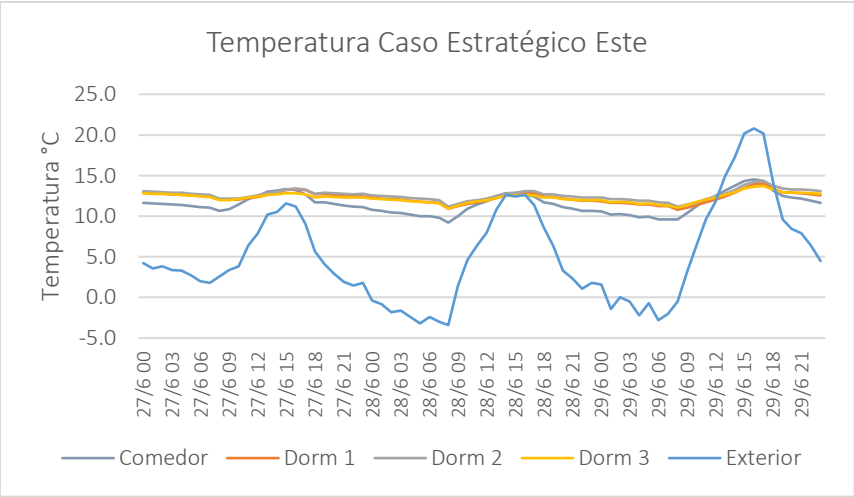


Fig. 6.54: Evolución de la temperatura de los días 27 al 29 de junio del Caso Estratégico Este.

Tabla 6.23: Temperaturas medias de los locales interiores y las amplitudes térmicas correspondientes al Caso Estratégico Este.

Orientación	Dia	T_m [ºC] Comedor	T_m [ºC] Dor 1	T_m [ºC] Dor 2	T_m [ºC] Dor 3	T_m [ºC] Exterior
Este	27-jun	11.8±2.7	12.6±1.4	12.8±1.3	12.5±0.9	5.0±10.1
	28-jun	11.1±3.6	12.0±1.9	12.3±1.9	12.0±1.7	3.5±16.0
	29-jun	11.7±5.0	12.2±3.2	12.6±3.2	12.3±2.7	7.0±23.6

6.6.2 Carga de calefacción del Caso Estratégico periodo otoño-invierno.

En este inciso analizaremos los resultados del Caso Estratégico para el periodo otoño-invierno. En la Figura 6.55 tenemos la evolución de las cargas de calefacción interior de la vivienda orientación sur, aplicando las estrategias constructivas. El resultado arrojo que para el Comedor el promedio mensual del periodo otoño-invierno es de 239,9 W, mientras que para el mismo periodo en el Caso IPV era de 359,7 W (Figura 6.39), lo que representa una merma del 33% en la demanda de carga de calefacción. El Dormitorio 1 fue el de menor demanda con 36,4W, un 65% menos que el Caso IPV donde era de 104,1W. El Dormitorio 3 fue el de mayor demanda promedio mensual con 151,9W, un 36% menos (238,9W) que el Caso IPV.

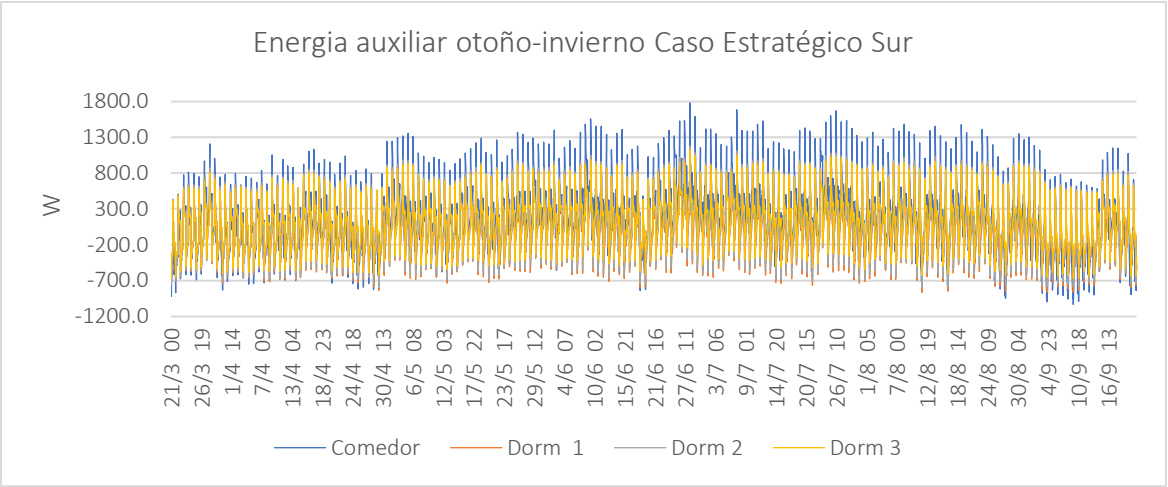


Fig. 6.55: Demanda de Energía auxiliar del periodo otoño-invierno para el Caso Estratégico Sur.

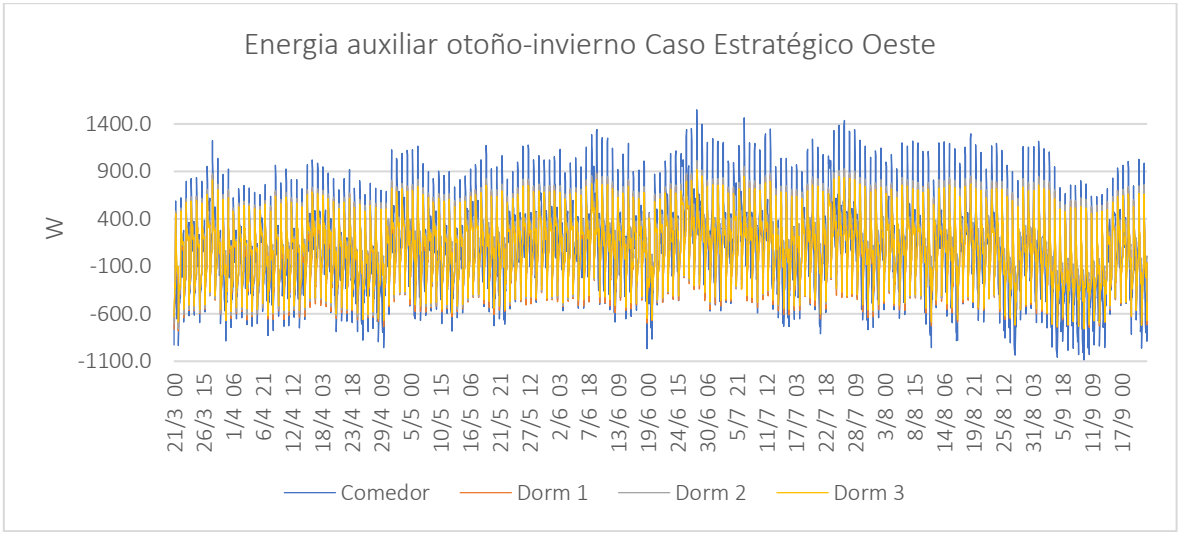


Fig. 6.56: Demanda de Energía auxiliar del periodo otoño-invierno para el Caso Estratégico Oeste.

En el gráfico de la Figura 6.56 tenemos la demanda energética de calefacción del Caso Estratégico para la orientación oeste. El comedor tuvo un promedio mensual de 181,4W, un 24% menos que el caso IPV (239,7W). Como en el caso de la orientación sur, el Dormitorio 1 fue el de menor demanda con 135,9W, 8% menos que el Caso IPV (195W). En esta orientación el Dormitorio 2 fue el de mayor demanda energética con 177W, 36% menos que el Caso IPV (277W).

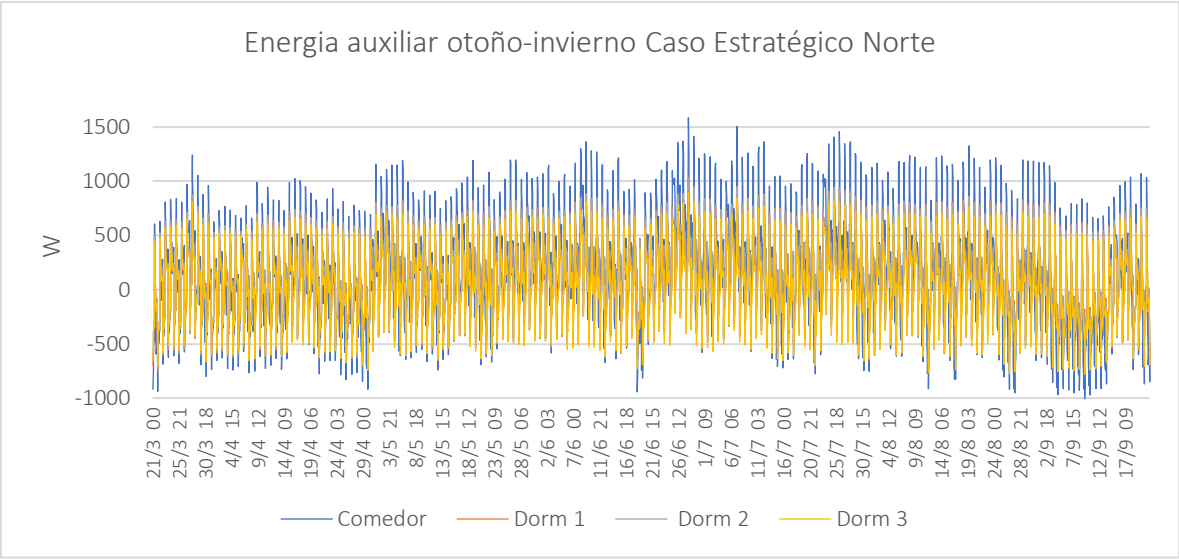


Fig. 6.57: Demanda de Energía auxiliar del periodo otoño-invierno para el Caso Estratégico Norte.

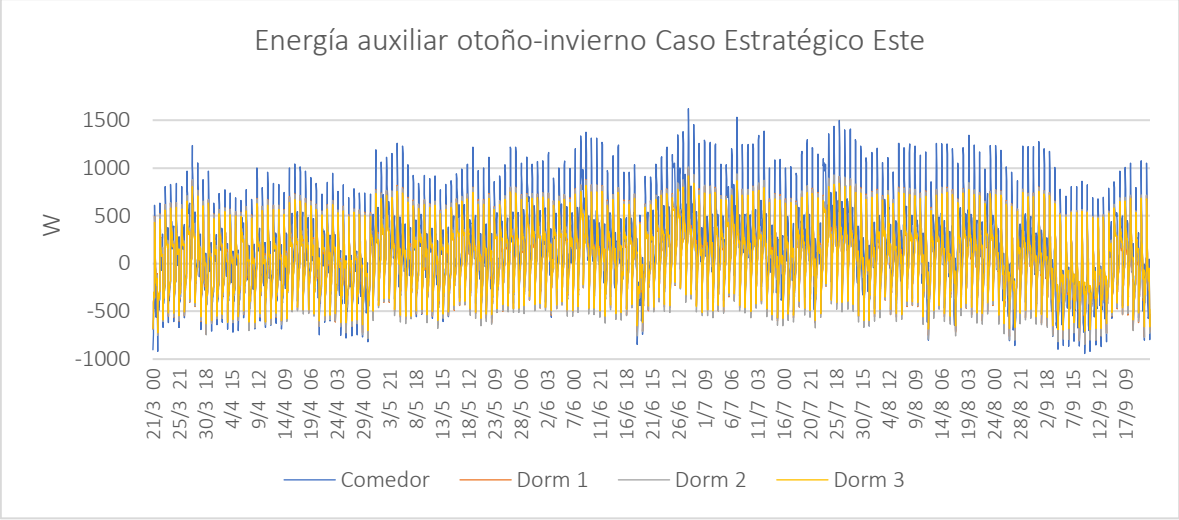


Fig. 6.58: Demanda de Energía auxiliar del periodo otoño-invierno para el Caso Estratégico Este.

En las Figuras 6.57 y 6.58 se detallan las cargas de calefacción del Caso Estratégico, para las orientaciones Norte y Este respectivamente. En el caso de la orientación Norte, el Dormitorio 3 fue el de menor demanda mensual promedio con un valor de 67,7W, un 52% menos que su respectivo caso IPV, el Dormitorio 1 y 2 presentaron valores de 171,5W y 173,2W, un 34% (264W) y un 32% (253W) menos que caso IPV. El comedor tuvo un promedio mensual de 214W, lo que representa una reducción del 41% con respecto al caso IPV (364W).

En la orientación Este, el Dormitorio 2 es el de menor demanda promedio mensual con 114W, un 20% menos que el caso IPV (142W). El Dormitorio 1 es el de mayor demanda con 122W, 31% menos que caso IPV (193W). Finalmente, el Comedor tuvo valores promedios mensuales de 289W, lo que representa una merma del 35% con respecto al caso IPV (444W).

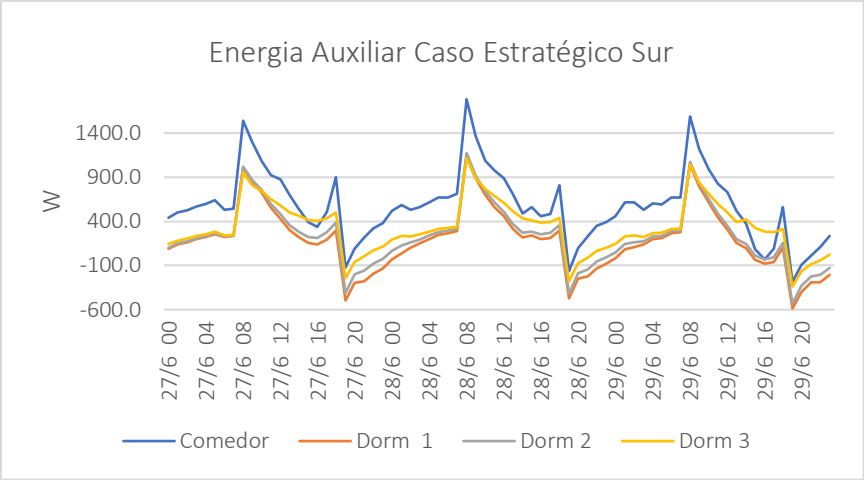


Fig. 6.59: Demanda de Energía auxiliar de los días 27 al 29 de junio para el Caso Estratégico Sur.

Ahora procederemos analizar las demandas energéticas de calefacción para los días 27 al 29 de junio de todas las orientaciones. En la Figura 6.59 tenemos la energía auxiliar del Caso Estratégico Sur. El Comedor tuvo promedios diarios entre 487W en el 29 de junio y los 641W del 28 de junio, esto es entre un 30% y 32% menos que el caso IPV (Figura 6.30). El Dormitorio 1 fue el de menor demanda promedio diaria con 120W para el 29 de junio y 222W para el 28 de junio, mientras que el 27dejunio se obtuvo 208W. Esto representa una merma de demanda del 47% con respecto al Caso IPV (228W). El Dormitorio 3 tuvo la mayor demanda energética con 358W de promedio diario, un 39% menos que el caso IPV (584W).

La Figura 6.60 muestra la demanda de energía auxiliar para el Caso Estratégico orientación Oeste. El Dormitorio 2 fue el de mayor promedio diario de energía auxiliar con 394W el 28 de junio, mientras que el Dormitorio 1 fue el de menor demanda con 336W para el mismo día. Estos valores comparados con los resultados del Caso IPV dan una merma en la demanda energética de entre 40% y

27% para los mismos dormitorios citados. El Comedor presento mermas similares de 785W (Figura 6.42) para el caso IPV a 556W en el caso Estratégico.

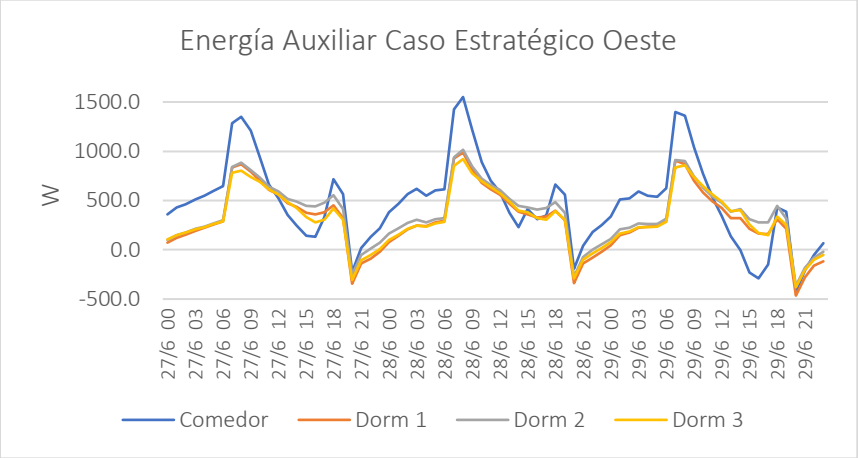


Fig. 6.60: Demanda de Energía auxiliar de los días 27 al 29 de junio para el Caso Estratégico Oeste.

También se analizó la carga térmica de calefacción total de cada día, en la Tabla 6.24 se detallan las necesidades energéticas de cada local para las orientaciones Sur y Oeste. En la orientación Sur el Dormitorio 3 fue el de mayor demanda con 8,6KW en el día 28 de junio, seguido por el Dormitorio 2 con 6,6KW y el Dormitorio 1 con 5,3KW. La carga térmica total de la vivienda para ese día fue de 40,1KW, esto es un 35% menos de demanda energética que el mismo día del caso IPV (62,1KW, Tabla 6.18). la orientación Sur tuvo una carga promedio diaria de 35,7KW, una merma considerable respecto a los 53,5KW del caso IPV. Para la orientación Oeste, el Dormitorio 2 tuvo la mayor demanda energética con 9,4KW (28 de junio), seguido por el Dormitorio 1 con 8,1KW y finalmente el Dormitorio 3 con el mismo valor. El promedio diario de carga energética para esta orientación fue de 38,5KW, esto es un 29% menos respecto al caso IPV (54,5KW, Tabla 6.18).

Tabla 6.24: Carga térmica de calefacción en KW, del Caso Estratégico, requerida en cada uno de los locales según las orientaciones Sur y Oeste, para mantener la temperatura interior en el intervalo de confort.

Orientación	Días	Comedor [KW]	Dor 1 [KW]	Dor 2 [KW]	Dor 3 [KW]	Toilet [KW]	Pasillo [KW]	Total [KW]
Sur	27-jun	14.3	5.0	6.2	8.1	2.6	1.4	**37.7**
	28-jun	15.4	5.3	6.6	8.6	2.8	1.4	**40.1**
	29-jun	11.7	2.9	4.0	7.1	2.3	1.2	**29.3**
Oeste	27-jun	12.1	7.9	9.0	7.7	2.3	1.4	**40.5**
	28-jun	13.4	8.1	9.4	8.1	2.4	1.5	**42.9**
	29-jun	8.8	6.0	7.6	6.8	1.7	1.3	**32.2**

En la Figura 6.61 tenemos la evolución de la carga térmica para la orientación Norte del caso Estratégico, para los días 27 al 29 de junio. El dormitorio 2 fue el de mayor promedio diario de carga energética para calefacción, con un valor de 387W, seguido por el Dormitorio 1 (384,7W) y el Dormitorio 3 con 246,8W. El comedor tuvo como promedio máximo diario un valor de 598,9W. Estos resultados tuvieron una merma de entre los 7% y 39% con respecto al Caso IPV (Figura 6.45).

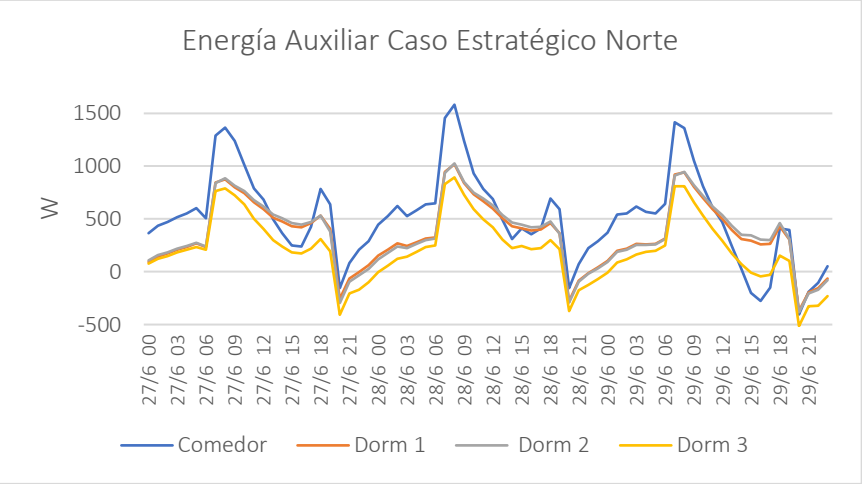


Fig. 6.61: Demanda de Energía auxiliar de los días 27 al 29 de junio para el Caso Estratégico Norte.

El grafico de la Figura 6.62 muestra la evolución de la energía auxiliar para calefaccionar la vivienda en la orientación Este del Caso Estratégico. El Dormitorio 3 fue el de menor demanda con 311,5W, seguido por el Dormitorio 2 con 324,8W. El

Dormitorio 1 tuvo los mayores valores promedios diarios de carga energética con 341,4W. La disminución fue del 40% para el Dormitorio 1 con respecto al caso IPV (Figura 6.45) y un 15% para el Dormitorio 3. El comedor dio valores promedios de 679W.

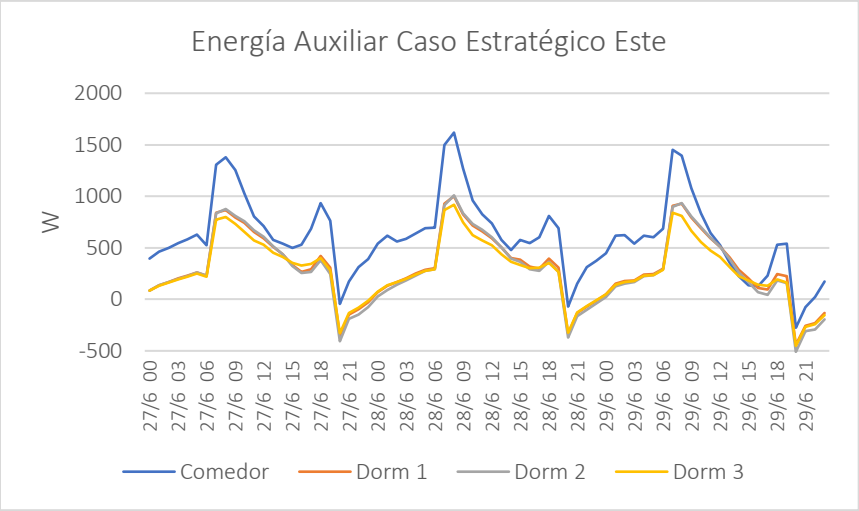


Fig. 6.62: Demanda de Energía auxiliar de los días 27 al 29 de junio para el Caso Estratégico Este.

En la Tabla 6.25 se detallan las cargas térmicas totales diarias para calefaccionar la vivienda entre 18ºC y 22,1ºC, correspondientes a las orientaciones Norte y Este del Caso Estratégico. En el caso de la orientación Norte, los dormitorios estuvieron entre 3,5KW (Dormitorio 3) y los 9,3KW (Dormitorio 2), el Comedor entre 9,4KW y 14,4KW. Si comparamos estos valores con los del caso IPV (Tabla 6.18) tenemos disminuciones de entre 45% y 38% en los dormitorios. El promedio diario total de carga energética para calefaccionar los tres días fue de 38,76KW, comparados con los 60KW para el caso IPV (Tabla 6.18) representa una merma del 35,4%.

Por último, analizamos los resultados de las cargas térmicas de la orientación Este. En la Tabla 6.25 podemos notar que el Dormitorio 1 es el de mayor demanda energética con 8,2KW, los demás dormitorios tienen una demanda similar entre 5,3KW y 7,8KW. El Comedor un promedio de carga térmica de 14,6KW. El promedio de los tres días de carga térmica total de la vivienda se estimó en 39,9KW. Este valor es un 31,9% menos que los 58,6KW del caso IPV (Tabla 6.18).

Tabla 6.25: Carga térmica de calefacción en KW, del Caso Estratégico, requerida en cada uno de los locales según las orientaciones Norte y Este, para mantener la temperatura interior en el intervalo de confort.

Orientación	Días	Comedor [KW]	Dor 1 [KW]	Dor 2 [KW]	Dor 3 [KW]	Toilet [KW]	Pasillo [KW]	Total [KW]
Norte	27-jun	13.5	8.8	9.0	5.7	2.9	1.4	**41.3**
	28-jun	14.4	9.2	9.3	5.9	3.0	1.5	**43.3**
	29-jun	9.4	7.6	7.8	3.5	2.3	1.2	**31.7**
Este	27-jun	15.5	7.7	7.5	7.4	3.0	1.4	**42.4**
	28-jun	16.3	8.2	7.8	7.5	3.2	1.4	**44.4**
	29-jun	12.1	6.3	5.6	5.3	2.6	1.2	**33.0**

6.7 Resultados de la simulación: primavera-verano del Caso IPV

A continuación, se mostrarán y analizarán los resultados de las simulaciones de la vivienda del periodo primavera-verano. Para ello se simularon estas dos estaciones y también 3 días consecutivos de altas temperaturas, como ser desde 26 al 28 de noviembre de dicho Año Meteorológico Típico.

6.7.1 Temperaturas interiores periodo primavera-verano Caso IPV

En la Figura 6.63 tenemos la evolución de la temperatura exterior de la vivienda del periodo primavera-verano, recordemos que la misma es similar para las cuatro orientaciones (Sur, Oeste, Norte y Este). La temperatura máxima del periodo primavera-verano fue de 35,5ºC y se dio en noviembre, mientras que la mínima fue de 2,4ºC y se presentó en septiembre. La temperatura media del periodo rondo los 20,2ºC.

El grafico de la Figura 6.64 detalla la evolución de las temperaturas interiores del Caso IPV para la orientación Sur. Las temperaturas mínimas se dieron en septiembre, donde el Comedor fue la de menor valor con 13,7ºC, los Dormitorios estuvieron entre 14ºC y 21ºC de mínimas. Las temperaturas máximas (en noviembre) entre 24,4ºC (Dormitorio 3) y 31,5ºC (Dormitorio 3), el Comedor entre 25,9ºC y 31.7ºC.

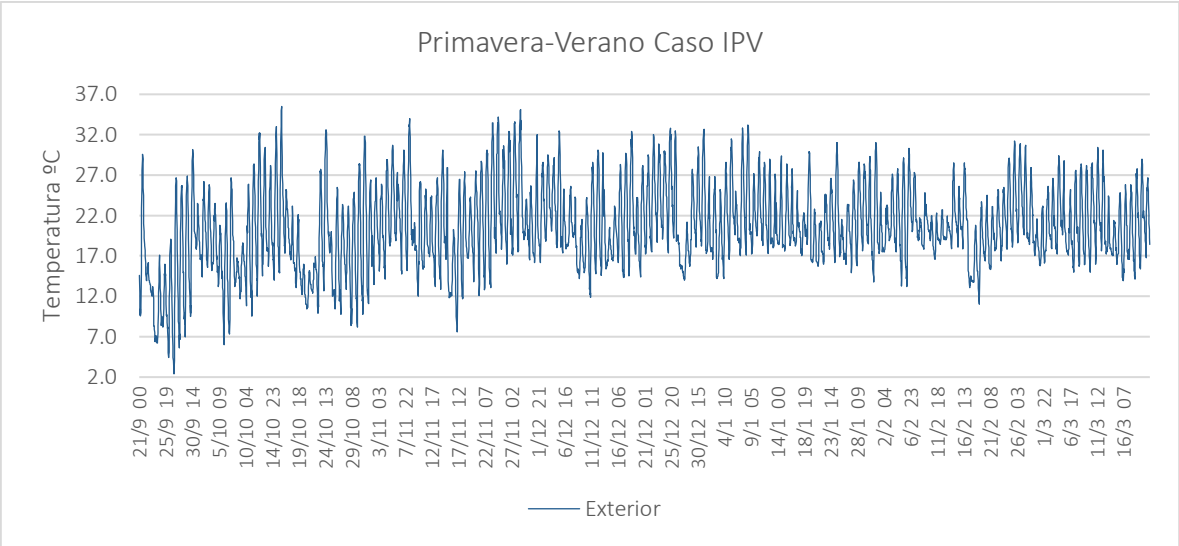


Fig. 6.63: Evolución de la temperatura exterior para el periodo primavera-verano.

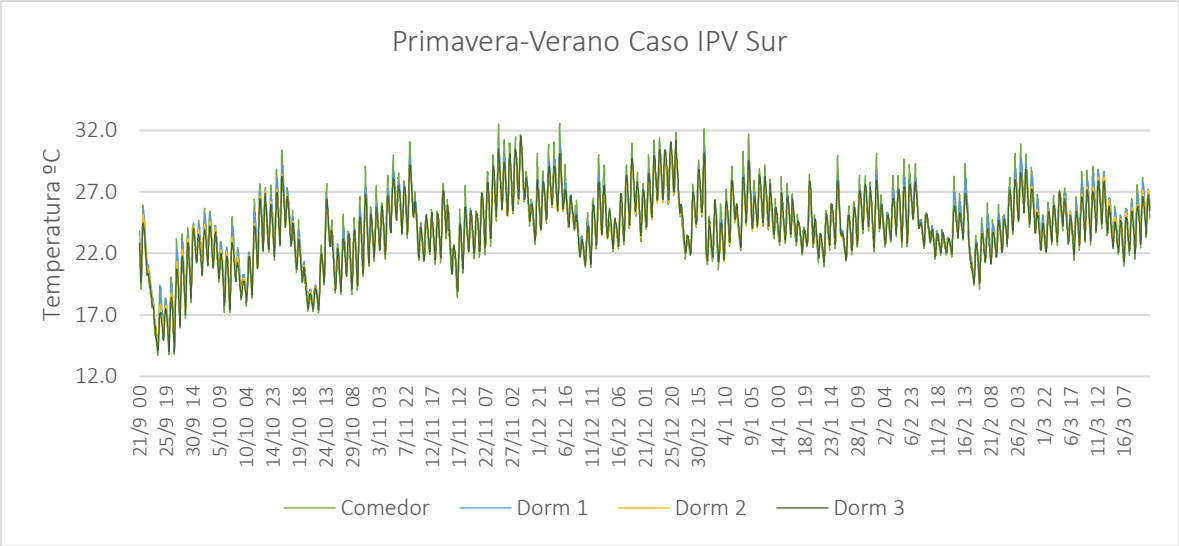


Fig. 6.64: Evolución de la temperatura de la vivienda del periodo primavera-verano del Caso IPV Sur.

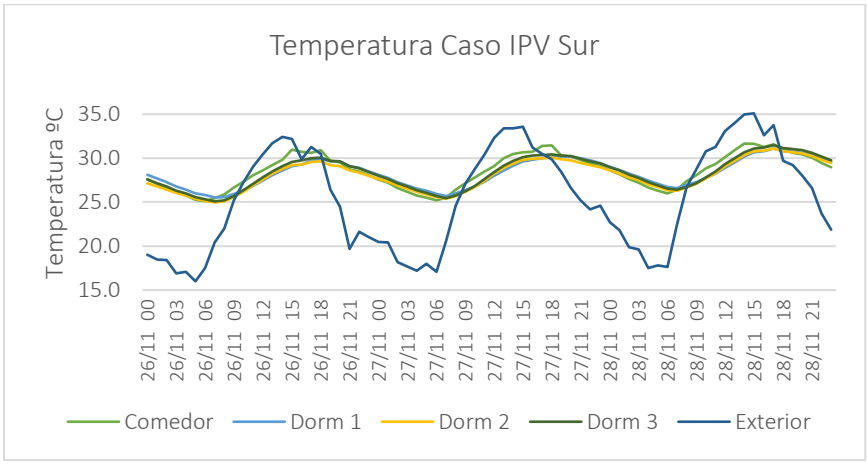


Fig. 6.65: Evolución de la temperatura de los días 26 al 28 de noviembre del Caso IPV Sur.

El grafico de la Figura 6.65 muestra la evolución de las temperaturas interiores de los días 26 al 28 de noviembre de la vivienda para el Caso IPV, periodo primavera-verano orientación Sur. Las mínimas de los dormitorios estuvieron entre 25ºC (Dormitorio 2, correspondiente al día 26 de noviembre) y 26,6ºC (Dormitorio 1, 28 de noviembre). El comedor entre 25,1ºC y 26ºC y sus temperaturas máximas entre 31ºC y 31,7ºC. El Dormitorio 3 tuvo la mayor temperatura 31,5ºC (28 de noviembre) seguido por el Dormitorio 1 con 31,1ºC. Las temperaturas exteriores estuvieron entre 16ºC (26 noviembre) y 35,1ºC (28 de noviembre). Cabe destacar que las temperaturas exteriores es la misma para las cuatro orientaciones.

Ahora analizaremos las temperaturas interiores del periodo primavera-verano de la orientación Oeste, Figura 6.66. Aquí las temperaturas mínimas del Comedor estuvieron entre 13,9ºC y 25,3ºC. Las mínimas de los Dormitorios estuvieron entre 14,2ºC (Dormitorio 2) y 21,9ºC (Dormitorio 3). Las temperaturas máximas del Comedor estuvieron entre 27,4ºC y 31,8ºC, mientras que los dormitorios entre 24,1ºC (Dormitorio 2) y 31,8ºC (Dormitorio 3).

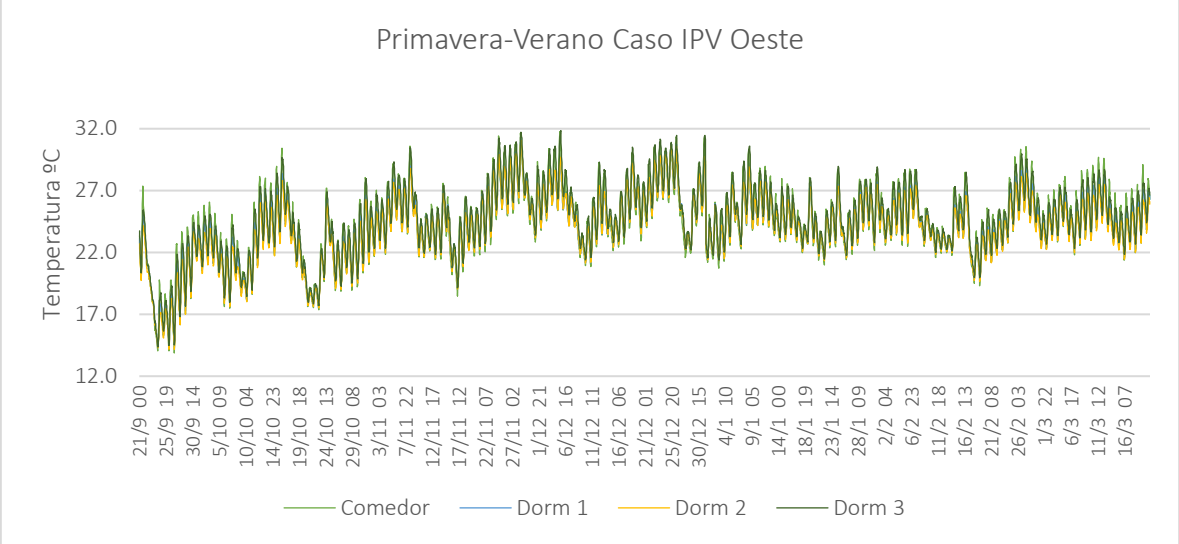


Fig. 6.66: Evolución de la temperatura de la vivienda del periodo primavera-verano del Caso IPV Oeste.

La Figura 6.67 muestra las temperaturas interiores para los días 26 al 28 de noviembre del Caso IPV orientación Oeste. Las temperaturas máximas de los dormitorios estuvieron entre 29,6ºC (Dormitorio 2) y los 31,7ºC (Dormitorio 3). El Comedor tuvo máximas entre 30,4ºC y 31,6ºC, sus mínimas entre 25ºC y 25,9ºC. Para

las temperaturas mínimas de los dormitorios, el Dormitorio 2 tuvo la menor mínima con 25,1ºC y el Dormitorio 3 la mayor mínima con 26,9ºC.

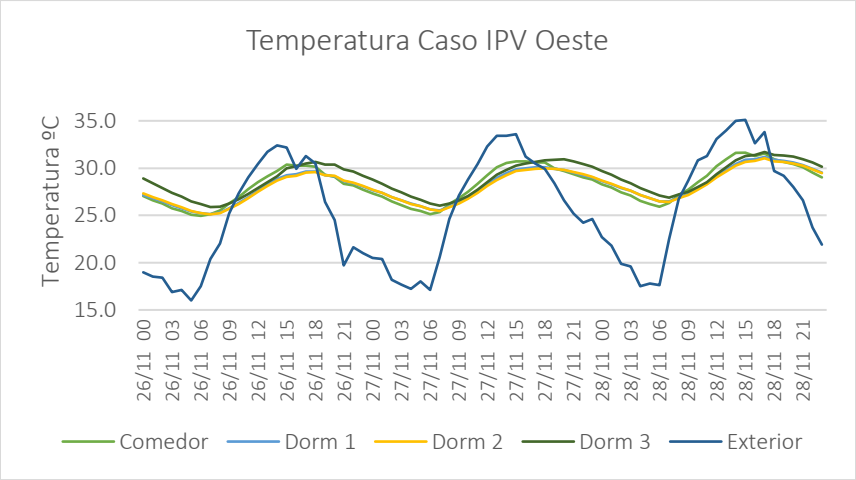


Fig. 6.67: Evolución de la temperatura de los días 26 al 28 de noviembre del Caso IPV Oeste.

A continuación, analizaremos el comportamiento de las temperaturas interiores de la vivienda para el caso IPV, periodo primavera-verano orientación Norte. Esta se detalla en la Figura 6.68, donde podemos apreciar que las temperaturas mínimas de los dormitorios estuvieron entre 14,1ºC (Dormitorio 1) y 21,5ºC (Dormitorio 3). Las máximas entre 24,1ºC (Dormitorio 1) y 31,2ºC (Dormitorio 3). El Comedor estuvo entre 13,4ºC y 31,2ºC.

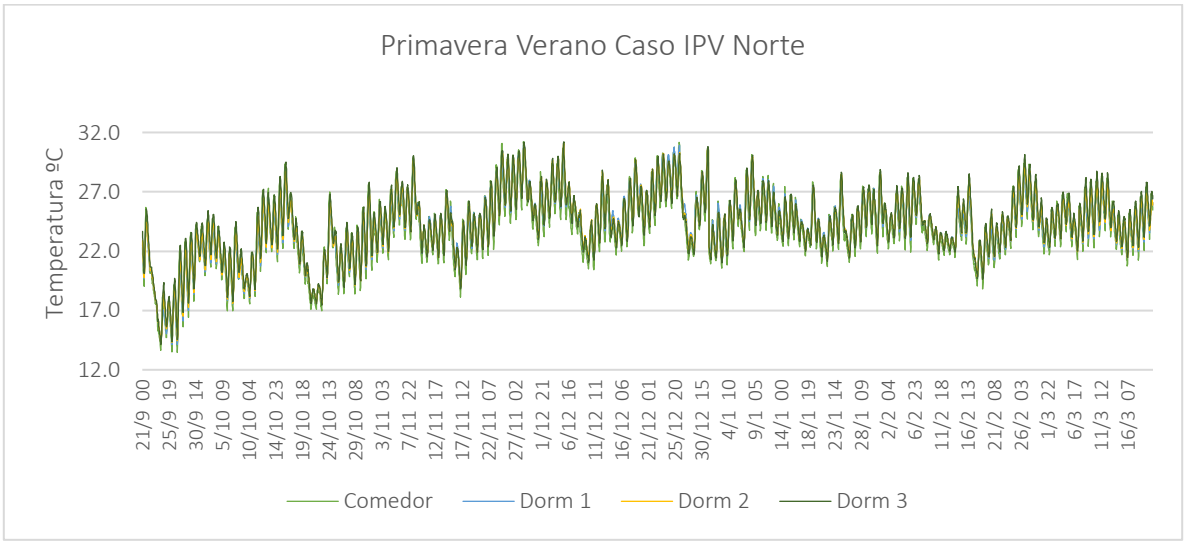


Fig. 6.68: Evolución de la temperatura de la vivienda del periodo primavera-verano del Caso IPV Norte.

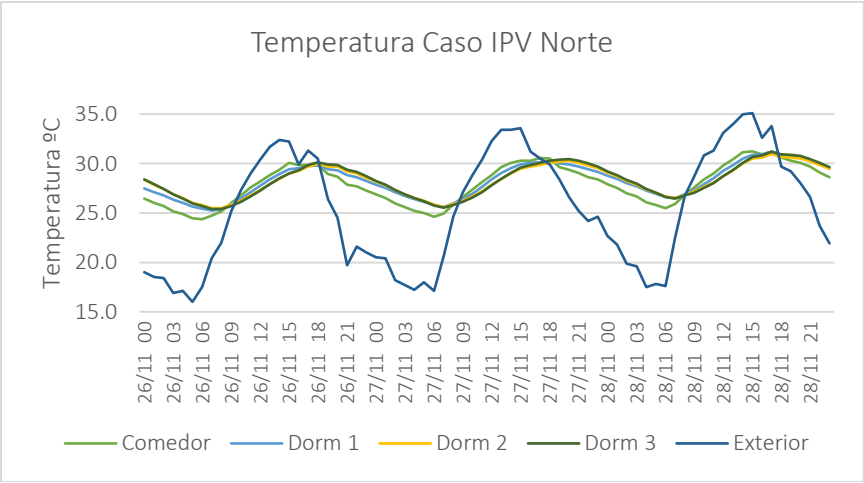


Fig. 6.69: Evolución de la temperatura de los días 26 al 28 de noviembre del Caso IPV Norte.

El grafico de la Figura 6.69 detalla el comportamiento de la temperatura interior de la vivienda para los días 26 al 28 de noviembre, orientación Norte Caso primavera-verano. Las temperaturas máximas de los dormitorios oscilaron entre 29,8ºC (Dormitorio 1, 26 de noviembre) y los 31,2ºC (Dormitorio 3, 28 de noviembre). Las temperaturas mínimas tuvieron oscilaciones entre 25,2ºC (Dormitorio 1, 26 de noviembre) y los 26,5ºC (Dormitorio 2, 28 de noviembre). El Comedor estuvo entre 24,4ºC de mínima y 31,2ºC de máxima.

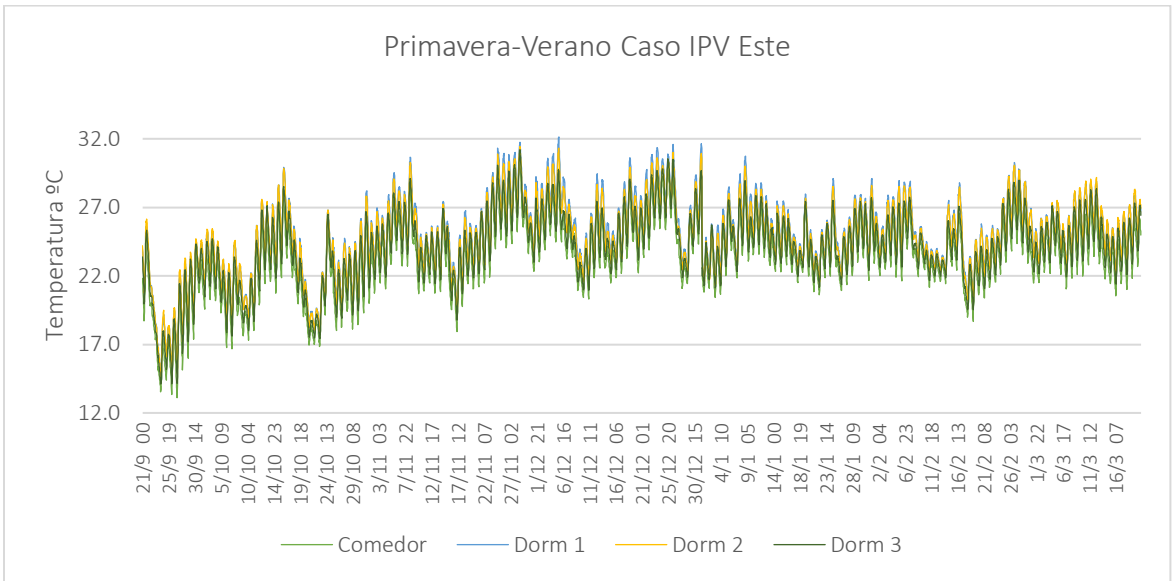


Fig. 6.70: Evolución de la temperatura de la vivienda del periodo primavera-verano del Caso IPV Este.

En la orientación Este, el Dormitorio 3 es el de menor temperatura mínima con 14,1ºC (septiembre), seguido por Dormitorio 2 y 3 ambos con 14,7ºC de mínima (Figura 6.70). Las máximas estuvieron entre 32,2ºC (Dormitorio 1) y 25,3ºC (Dormitorio 3). Las temperaturas medias del periodo para los dormitorios estuvieron entre 19,1ºC (Dormitorio 3) y los 26,9ºC (Dormitorio 1). El Comedor estuvo entre 18,3ºC y 25,1ºC.

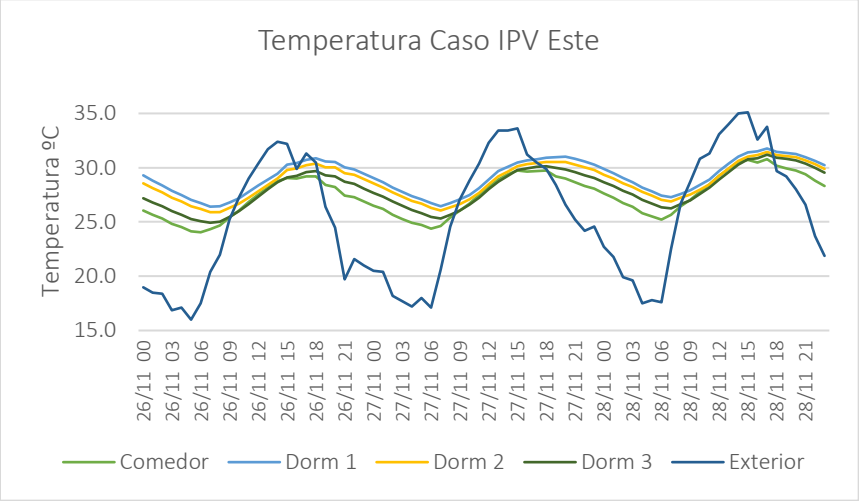


Fig. 6.71: Evolución de la temperatura de los días 26 al 28 de noviembre del Caso IPV Este.

Por último, analizamos la evolución de las temperaturas interiores de los días 26 a 28 de noviembre de la orientación Este (Figura 6.71). El Comedor tuvo mínimas que oscilaron entre 24,1ºC y 25,2ºC, mientras que los dormitorios oscilaron entre 24,9ºC (Dormitorio 3) y los 27,3ºC (Dormitorio 1). Las temperaturas máximas entre 29,7ºC (Dormitorio 3) y los 31,8ºC (Dormitorio 1). El Comedor entre 29,2ºC y los 30,8ºC.

Tabla 6.26: Temperaturas medias de los locales interiores y las amplitudes térmicas correspondientes al Caso IPV primavera verano.

Orientación	Dia	T_m [ºC] Comedor	T_m [ºC] Dor 1	T_m [ºC] Dor 2	T_m [ºC] Dor 3	T_m [ºC] Exterior
Sur	26-nov	28.0±5.8	27.8±4.4	27.4±4.7	27.7±5.0	24.1±16.4
	27-nov	28.4±6.3	28.2±4.5	28.0±4.7	28.2±5.0	25.6±16.5
	28-nov	29.1±5.7	29.0±4.5	28.8±4.8	29.1±5.1	26.6±17.6
Oeste	26-nov	27.7±5.4	27.4±4.5	27.4±4.5	28.4±4.8	24.1±16.4
	27-nov	28.2±5.6	28.0±4.6	28.0±4.5	28.7±4.9	25.6±16.5
	28-nov	29.0±5.7	28.9±4.7	28.8±4.6	29.5±4.8	26.6±17.6
Norte	26-nov	27.2±5.7	27.6±4.6	27.8±4.5	27.8±4.7	24.1±16.4
	27-nov	27.8±5.9	28.1±4.6	28.1±4.7	28.2±5.0	25.6±16.5
	28-nov	28.6±5.8	29.0±4.7	28.9±4.5	29.0±4.7	26.6±17.6
Este	26-nov	26.7±5.2	28.7±4.5	28.2±4.5	27.3±4.7	24.1±16.4
	27-nov	27.4±5.3	29.0±4.6	28.6±4.5	27.9±4.8	25.6±16.5
	28-nov	28.2±5.6	29.7±4.5	29.3±4.6	28.8±4.9	26.6±17.6

La Tabla 6.26 detalla las temperaturas medias y amplitudes térmicas de los locales interiores de la vivienda, corresponden a los días 26 al 28 de noviembre. Primero analizaremos el Comedor, las medias estuvieron entre 26,7ºC y una amplitud del 5.2ºC (26 de noviembre orientación Este) y los 29,1ºC con una amplitud del 5,7ºC (28 de noviembre orientación Sur). Para el caso de los dormitorios, en la orientación Este se dio la menor temperatura media de 27,3ºC (Dormitorio 3) con una amplitud de 4,7ºC, la mayor temperatura media estuvo en la orientación Oeste con 29,5ºC (también el Dormitorio 3) y una amplitud térmica del 4,8ºC. La temperatura media exterior a la vivienda estuvo entre 24,1ºC (26 de noviembre) con una amplitud térmica de 17,6ºC y los 26,6ºC (28 de noviembre) con una amplitud térmica de 17,6ºC.

6.7.2 Carga de enfriamiento del Caso IPV periodo primavera-verano.

Ahora procederemos analizar la carga energética para enfriamiento de la vivienda. Es la energía necesaria auxiliar para mantener la temperatura del local entre l intervalo de confort (18ºC a 24,4ºC). Comenzamos con la Figura 6.72 donde se muestra la carga energética del periodo primavera-verano orientación Sur. El promedio diario mensual del periodo para el Comedor fue de -282W (es valor negativo porque estamos analizando carga de enfriamiento), mientras que los dormitorios tuvieron de valor promedio; -189,5W (Dormitorio 1), -162,4W (Dormitorio 2) y -164,8W (Dormitorio 3). Los valores máximos de carga de enfriamiento oscilaron entre -795,2W (Dormitorio 3) y -1548W (Dormitorio 1). Para el Comedor la oscilación de las máximas de carga de enfriamiento estuvo entre -1126W y -2251W.

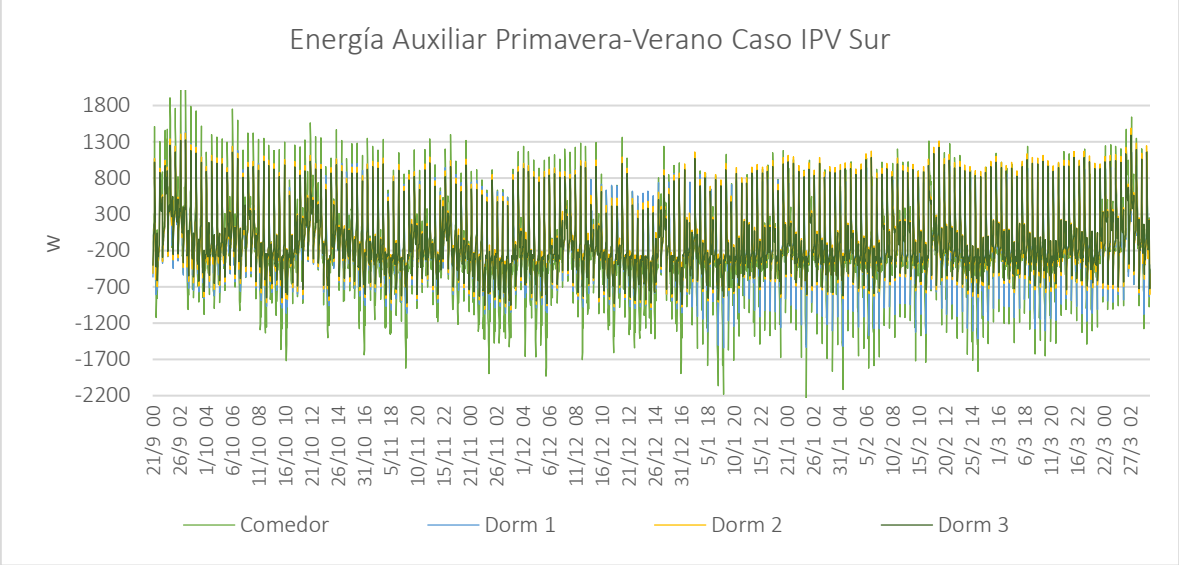


Fig. 6.72: Demanda de Energía auxiliar del periodo primavera-verano para el Caso IPV Sur.

Procedemos de manera similar con la orientación Oeste, que se muestra en la Figura 6.73. Para eta orientación los valores medios diarios mensuales estuvieron entre -206,7W (Dormitorio 1), -201,9W (Dormitorio 3) y -149,9W (Dormitorio 2). El Comedor tuvo de promedio en el periodo, un valor de -352,9W. Las máximas cargas de enfriamiento en los dormitorios fueron; -1297W para el Dormitorio 1, -1031W para el Dormitorio 2 y -1230W en el Dormitorio 3. Para el caso del Comedor fue -1916W.

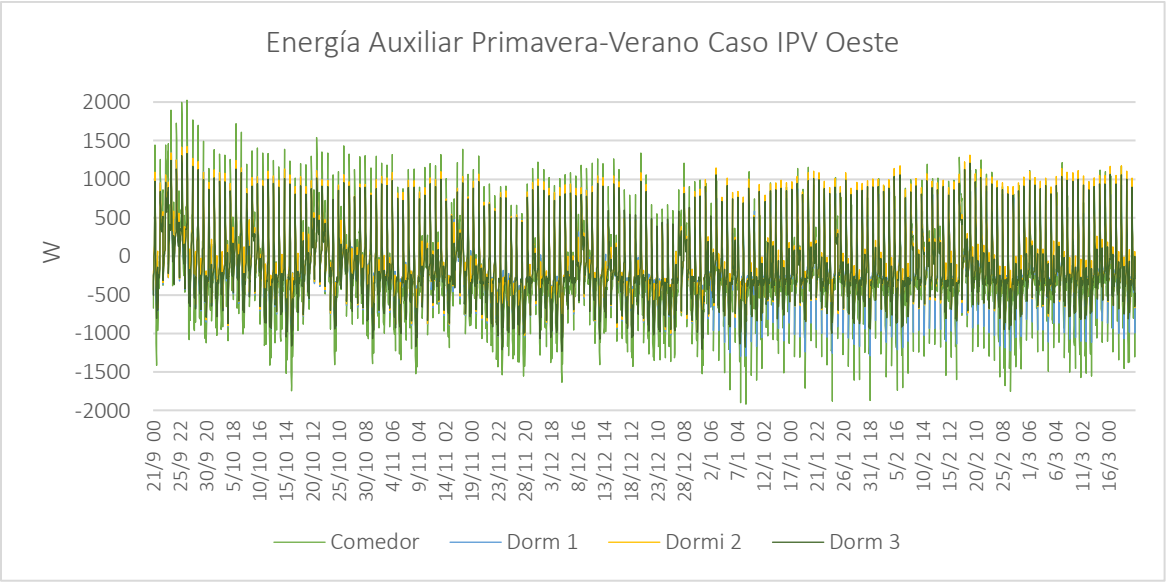


Fig. 6.73: Demanda de Energía auxiliar del periodo primavera-verano para el Caso IPV Oeste.

En la Figura 6.74 se muestran las cargas de enfriamiento de los días 26 al 28 de noviembre para la orientación Sur. Los valores máximos de los dormitorios oscilaron entre -864W (Dormitorio 3) y los -1070W (Dormitorio 1), mientras que el Comedor dio entre -1411W (27 de noviembre) y los -1527W (28 de noviembre). El menor valor promedio diario del Comedor fue de -617W (26 de noviembre) y el mayor fue de -739W (28 de noviembre). Para los dormitorios el menor promedio fue -369W (Dormitorio 1) y el mayor dio -485W (Dormitorio 2).

Para la orientación Oeste (Figura 6.75) los valores promedios diarios del Comedor estuvieron entre -591W (26 de noviembre) y los -751W (28 de noviembre). El Dormitorio 1 fue el de mayor promedio diario con -498W seguido por el Dormitorio 3 con -489W y por último el Dormitorio 2 con -484W. Los valores máximos de carga de enfriamiento estuvieron entre -1047W (Dormitorio 1) y -927W (Dormitorio 2), mientras que para el Comedor fue entre -1551W y -1330W.

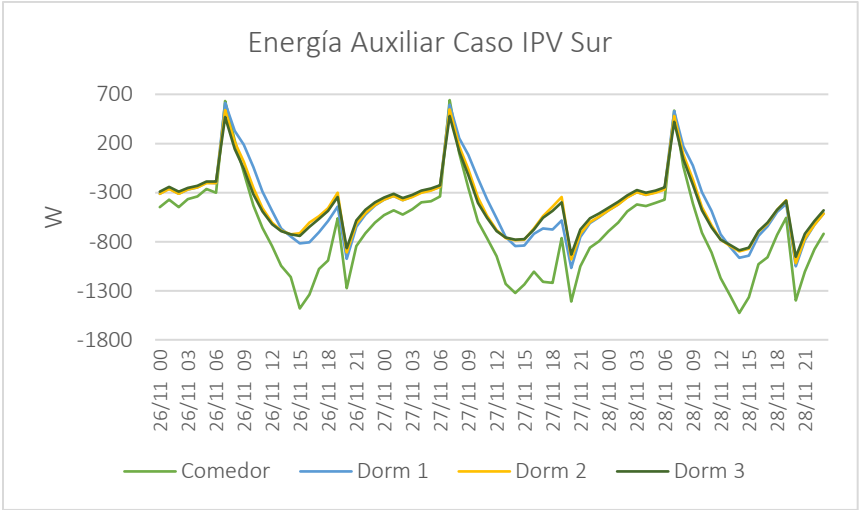


Fig. 6.74: Demanda de Energía auxiliar de los días 26 al 28 de noviembre para el Caso IPV Sur.

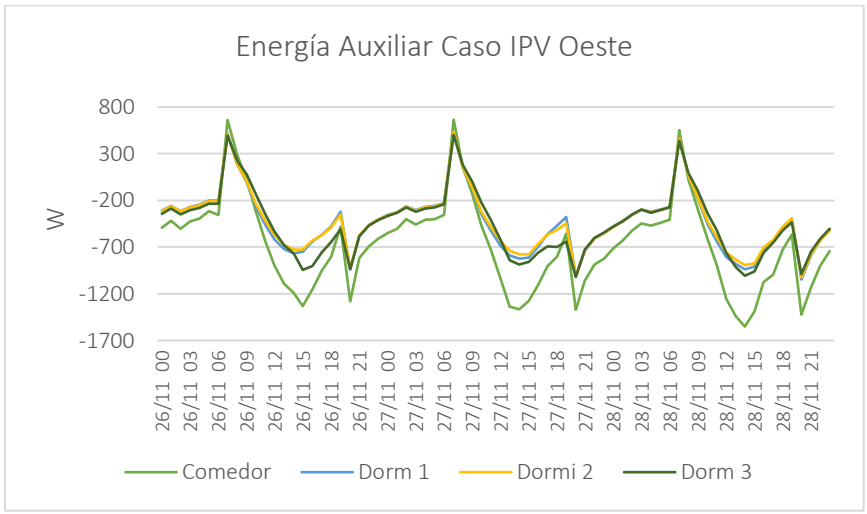


Fig. 6.75: Demanda de Energía auxiliar de los días 26 al 28 de noviembre para el Caso IPV Oeste.

Ahora procedemos analizar las orientaciones Norte (Figura 6.76) y Este (Figura 6.77). El promedio mensual de carga de enfriamiento para el Comedor fue de -338W en la orientación Norte y -243,4W en la orientación Este. En el caso de los dormitorios (orientación Norte), el Dormitorio 2 fue el de mayor promedio mensual con -238.5W, seguido por el Dormitorio 1 con -236,3W y el Dormitorio 3 con -235,6W. Para la orientación Este el Dormitorio 1 tuvo el mayor promedio con -261,4W, seguido por el Dormitorio 2 con -206,9W y por último el Dormitorio 3 con -155,2W.

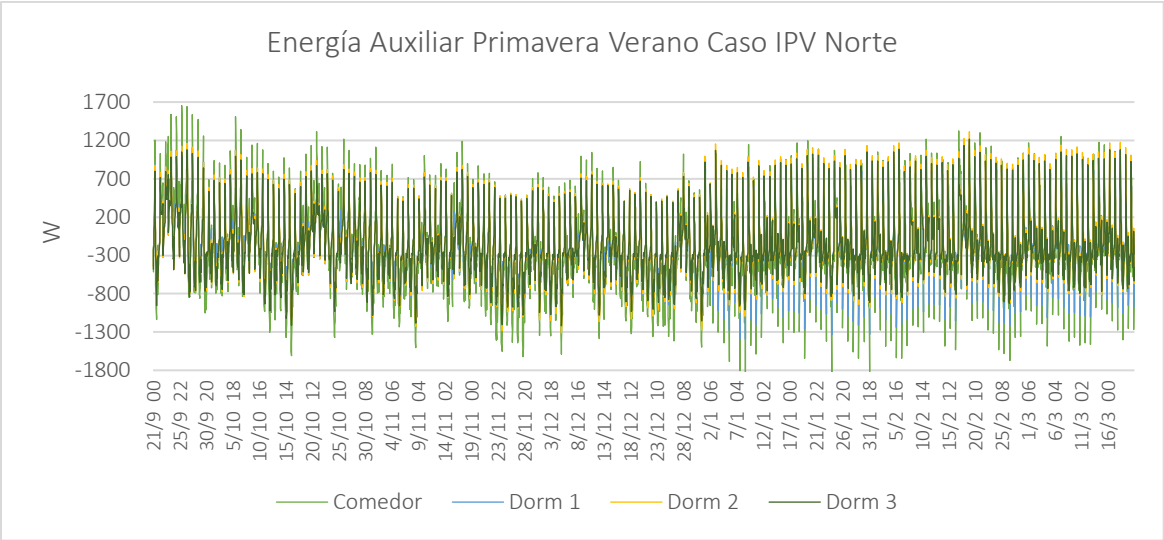


Fig. 6.76: Demanda de Energía auxiliar del periodo primavera-verano para el Caso IPV Norte.

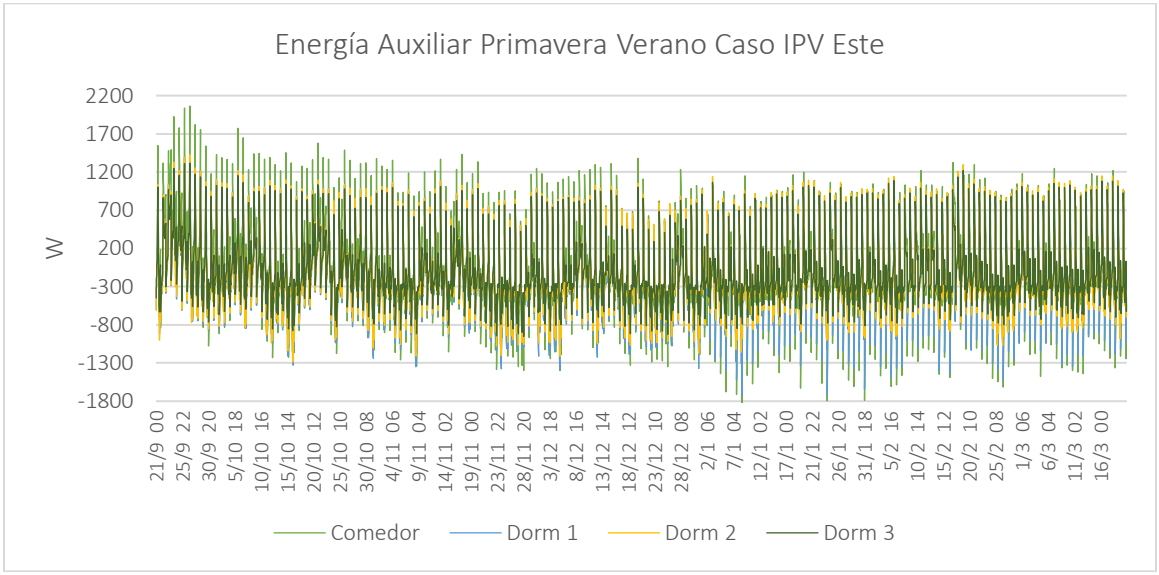


Fig. 6.77: Demanda de Energía auxiliar del periodo primavera-verano para el Caso IPV Este.

Para analizar la necesidad energética de enfriamiento para los días 26 al 28 de noviembre, utilizamos las Figuras 6.78 (orientación Norte) y 6.69 (orientación Este). En la orientación Norte el mayor promedio diario en los dormitorios estuvo entre -542W (Dormitorio 1, 28 de noviembre) y -501W (Dormitorio 3, 28 de noviembre). La misma tendencia en la carga de enriamiento se dio en los restantes días (26 y 27 de noviembre). El comedor oscilo entre -667W (26 de noviembre) y -813W (28 de noviembre). En cuanto a los valores máximos registrados, el Dormitorio

2 registro -1082W, seguido por el Dormitorio 1 con -1082W y por último el Dormitorio 3 con -1080W.

En el caso de la orientación Este (Figura 6.79), en los dormitorios el valor máximo registrado fue de -1132W (Dormitorio 1) seguido por -1065W (Dormitorio 2) y -918W (Dormitorio 3). Todos estos valores del día 27 de noviembre. El promedio diario máximo fue de -522W (Dormitorio 1, 28 de noviembre) y el menor de -357W (Dormitorio 3, 26 de noviembre). El Comedor registro valores promedios entre -518W y -694W, con un pico máximo horario de -1401W (28 de noviembre).

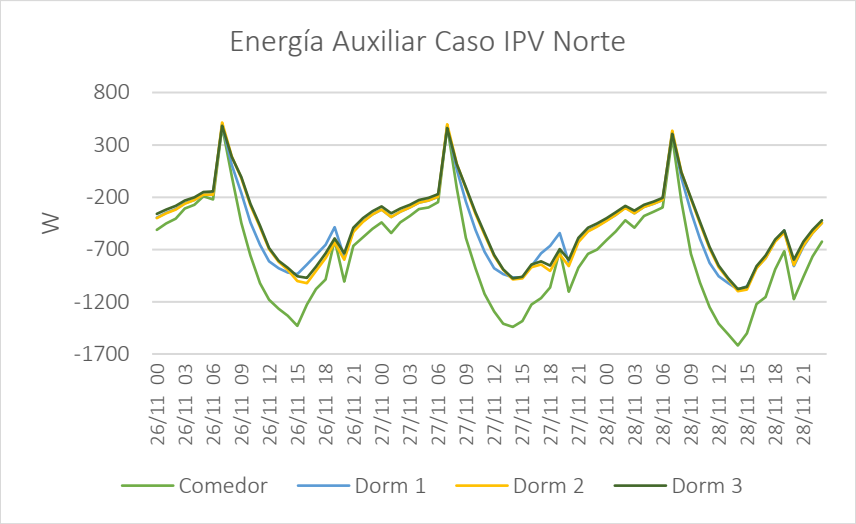


Fig. 6.78: Demanda de Energía auxiliar de los días 26 al 28 de noviembre para el Caso IPV Norte.

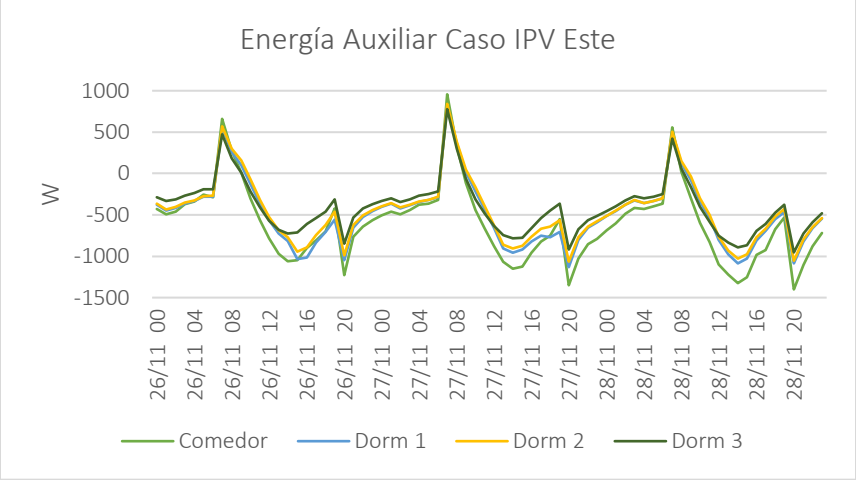


Fig. 6.79: Demanda de Energía auxiliar de los días 26 al 28 de noviembre para el Caso IPV Este.

La Tabla 6.27 detalla la carga térmica de enfriamiento total diaria, de cada local de la vivienda para las cuatro orientaciones, de los días 26 al 28 de noviembre. La orientación Norte fue la de mayor necesidad de consumo energético con -59,8KW (-63,9KW su mayor valor diario) de promedio diario, seguido por la orientación Sur con -54,8KW (-59,2KW su mayor valor diario), tercer puesto para la orientación Este con -54,6KW (-59,3KW su mayor valor diario) y la orientación de menor promedio diario fue la Oeste con -54,5KW (-60,1KW su mayor valor diario). En cuanto al análisis de los dormitorios , en la orientación Norte el Dormitorio 1 fue el de mayor necesidad energética con -13,4KW y el Dormitorio 3 el de menor valor con -12,4KW. En la Orientación Sur, el intervalo de carga térmica total diaria estuvo entre -12,2KW (Dormitorio 2) y -11,9KW (Dormitorio 3). Para la orientación Este, el Dormitorio 1 tuvo un total diario máximo de -13,1KW y el menor valor en el Dormitorio 3 con -9,2KW. Por último, en la orientación Oeste el Dormitorio 3 presento mayores valores de carga térmica con -12,5KW y el Dormitorio 2 -9,6KW fue su menor valor diario total. La tendencia de necesidad energética fue de menor a mayor desde el 26 al 28 de noviembre.

Tabla 6.27: Carga térmica de enfriamiento en KW del periodo primavera verano del Caso IPV, requerida en cada uno de los locales según la orientación correspondiente, para mantener la temperatura interior en el intervalo de confort.

Orientación	Días	Comedor [KW]	Dor 1 [KW]	Dor 2 [KW]	Dor 3 [KW]	Toilet [KW]	Pasillo [KW]	Total [KW]
Sur	26-nov	-15.7	-9.8	-9.6	-9.7	-3.5	-0.6	**-49.0**
	27-nov	-17.9	-11.3	-11.1	-11.0	-4.0	-0.9	**-56.2**
	28-nov	-18.3	-12.0	-12.2	-11.9	-4.0	-0.9	**-59.2**
Oeste	26-nov	-15.1	-9.8	-9.6	-10.7	-2.9	-0.8	**-48.8**
	27-nov	-16.9	-11.1	-10.9	-11.6	-3.2	-0.8	**-54.6**
	28-nov	-18.6	-12.3	-12.2	-12.5	-3.7	-0.9	**-60.1**
Norte	26-nov	-16.5	-11.5	-11.6	-10.9	-0.9	-3.6	**-55.0**
	27-nov	-18.4	-12.5	-12.6	-12.0	-1.0	-4.0	**-60.4**

	28-nov	-19.9	-13.4	-12.9	-12.4	-1.1	-4.2	**-63.9**
Este	26-nov	-13.4	-11.9	-11.0	-9.2	-3.1	-0.8	**-49.5**
	27-nov	-15.5	-12.8	-12.0	-10.5	-3.4	-0.8	**-55.0**
	28-nov	-17.2	-13.1	-12.6	-11.7	-3.7	-0.9	**-59.3**

6.8 Resultados de la simulación: primavera-verano del Caso Estratégico

A continuación, se analizarán los resultados de las simulaciones del Caso Estratégico para las cuatro orientaciones (Sur, Oeste, Norte y Este), correspondientes al periodo primavera-verano. En estas simulaciones se aplicaron los ladrillos PumaPunku en la mampostería, como así también estrategias constructivas bioclimáticas detalladas en los primeros incisos de este capítulo. Se aplico para la simulación el TMYPlus desarrollado en capítulos anteriores de esta tesis, para así tener las mismas condiciones meteorológicas que el caso base IPV. Comenzaremos analizando las temperaturas interiores de la vivienda y luego compararlas con las del caso IPV, de modo idéntico para las cargas térmicas de enfriamiento.

6.8.1 Temperaturas interiores periodo primavera-verano Caso Estratégico

En la Figura 6.80 se muestra la evolución de la temperatura exterior a la vivienda, correspondiente al periodo primavera-verano. Esta es la misma utilizada para el caso IPV y el caso Estratégico. La temperatura máxima del periodo primavera-verano fue de 35,5ºC y se dio en noviembre, mientras que la mínima fue de 2,4ºC y se presentó en septiembre. La temperatura media del periodo rondo los 20,2ºC.

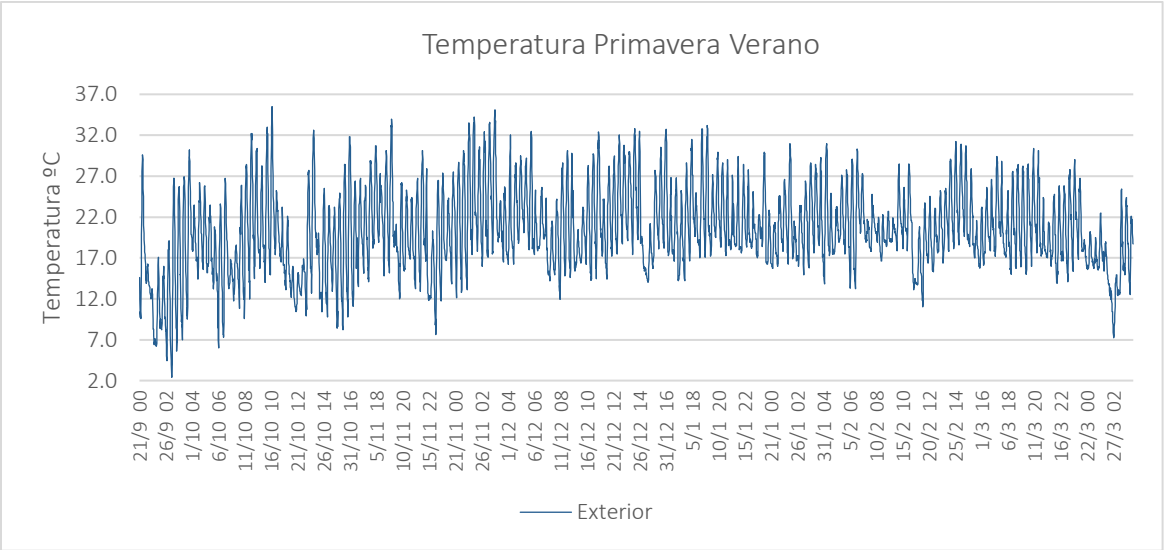


Fig. 6.80: Evolución de la temperatura exterior a la vivienda del periodo primavera-verano.

En la Figura 6.81 tenemos la evolución de las temperaturas interiores de la vivienda del caso Estratégico orientación Sur. El Comedor tuvo de mínima 15,4ºC y de máxima 30,6ºC, en el caso IPV la mínima era de 13,7ºC y el máximo 31,7ºC (Figura 6.64). En el caso de los dormitorios, sus temperaturas mínimas fueron 15,9ºC (Dormitorio 3), seguido por 16,1 (Dormitorio 2) y 16,5ºC (Dormitorio 1). Las temperaturas máximas registraron 27,8ºC (Dormitorio 2), 28ºC (Dormitorio 1) y 28,1ºC (Dormitorio 3). En el Caso IPV los dormitorios oscilaban entre 14ºC de mínima (Dormitorio 3) y 31,5ºC de máxima (Dormitorio 3).

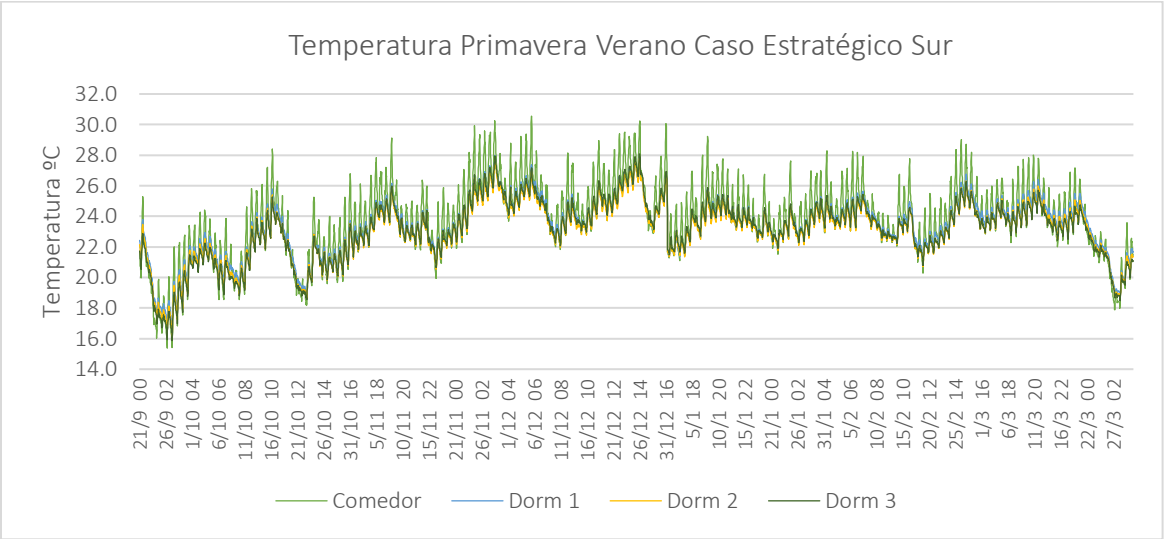


Fig. 6.81: Evolución de la temperatura de la vivienda del periodo primavera-verano del Caso Estratégico Sur.

Ahora analizamos la orientación Oeste del Caso Mejorado del periodo primavera-verano (Figura 6.82). El Comedor oscilo entre 15,6ºC de mínima y 30,1ºC de máxima. En el caso IPV eran de 13,9ºC de mínima y 31,8ºC de máximo (Figura 6.66).

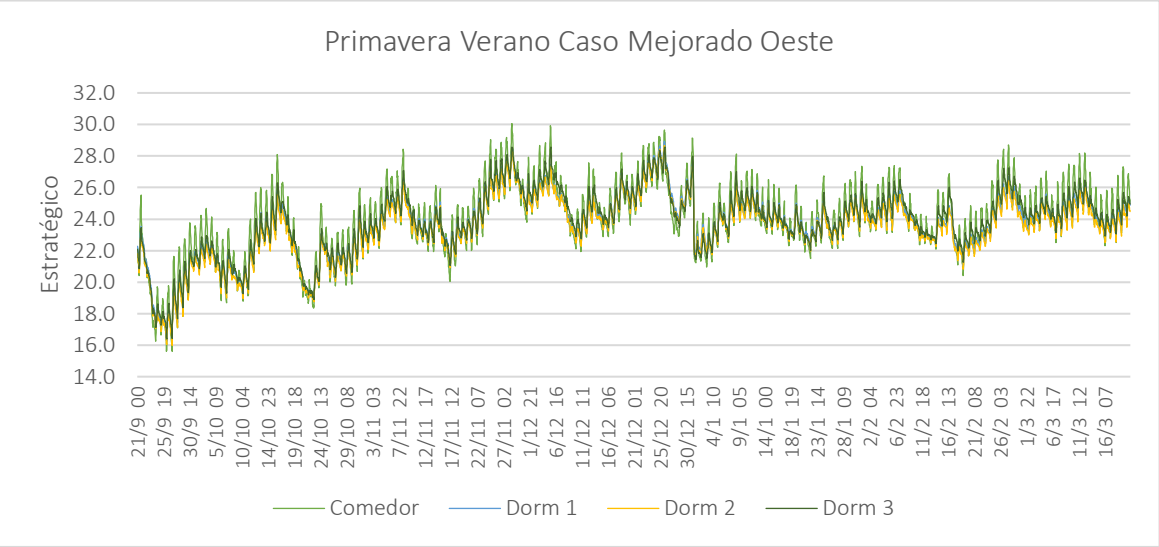


Fig. 6.82: Evolución de la temperatura de la vivienda del periodo primavera-verano del Caso Estratégico Oeste.

En la Figura 6.83 se detalla la evolución de las temperaturas interiores de la vivienda, para el caso Estratégico orientación Norte. Las temperaturas mínimas de los dormitorios en este fueron; 15,8ºC en el Dormitorio 1, 16ºC en el Dormitorio 2 y 16,3ºC en el Dormitorio 3. Las temperaturas máximas registraron; 28ºC en el Dormitorio 1, 27,8ºC en el Dormitorio 2 y 27,9ºC en el Dormitorio 3. El Comedor oscilo entre 15,1ºC y 29,4ºC. En el caso IPV (Figura 6.68) la temperatura mínima en los dormitorios fue 14,1ºC (Dormitorio 1) y la máxima 31,2ºC (Dormitorio 3), el Comedor estuvo entre 13,4ºC y 31,2ºC.

En los resultados de la orientación Este (Figura 6.84), el Comedor registro una mínima de 14,8ºC y una máxima de 29,5ºC, mientras que, en los dormitorios, los Dormitorios 1 y 2 registraron la misma mínima con 16,5ºC y el Dormitorio 3 una mínima de 16,2ºC. Las temperaturas máximas oscilaron entre 23,4ºC (Dormitorio 3) y 28,8ºC (Dormitorio 1). Si lo comparamos con la orientación Este del caso IPV (Figura 6.70), la mínima del Dormitorio 1 era 14,1ºC, la del Dormitorio 2 y 3 era

14,7ºC, las Temperaturas máximas llegaban hasta 32,2ºC (Dormitorio 1). El Comedor en el caso IPV oscilo entre 18,3ºC y 25,1ºC.

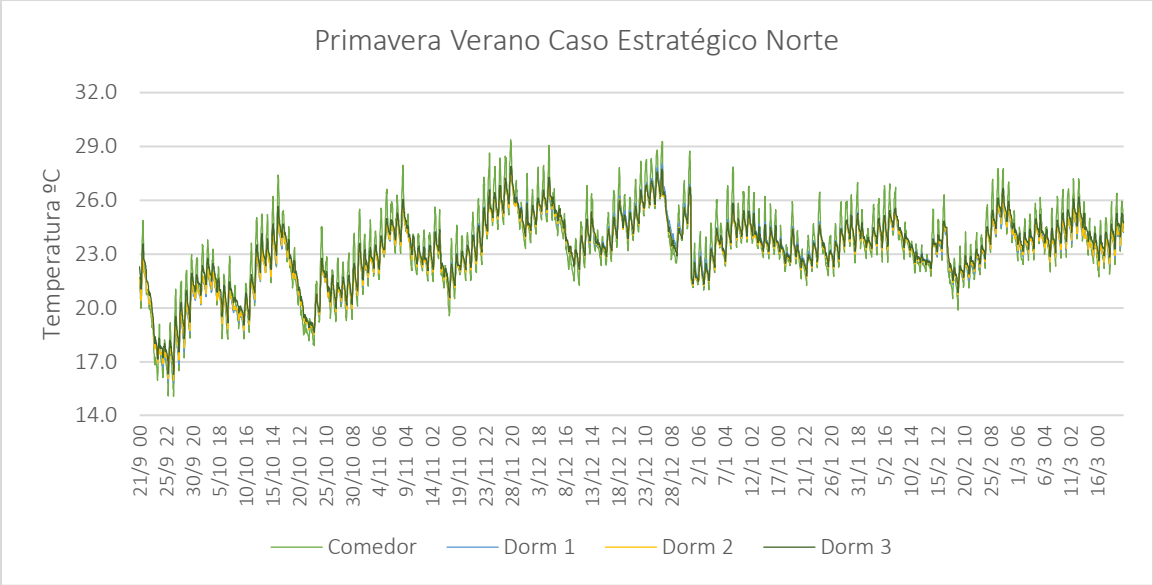


Fig. 6.83: Evolución de la temperatura de la vivienda del periodo primavera-verano del Caso Estratégico Norte.

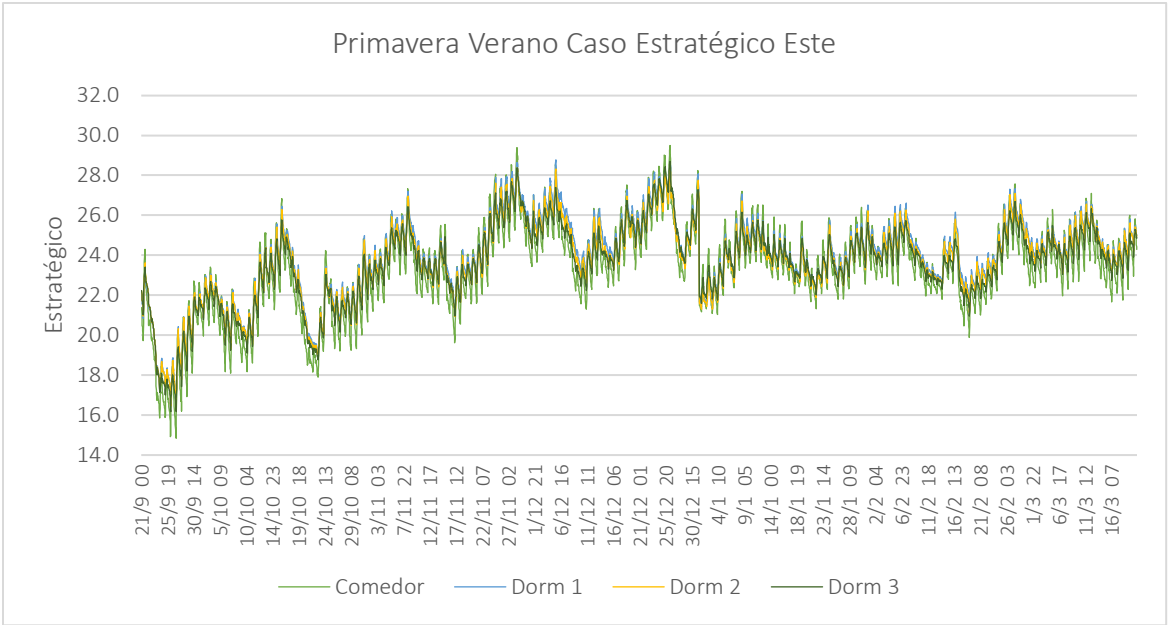


Fig. 6.84: Evolución de la temperatura de la vivienda del periodo primavera-verano del Caso Estratégico Este.

En las Figuras 7.85 y 7.86 se muestran las evoluciones de las temperaturas interiores de los días 26 al 28 de noviembre del caso Estratégico, para las

orientaciones Sur y Oeste respectivamente. En el caso de la orientación Sur, el Dormitorio 2 fue el de menor temperatura con 24,7ºC y se dio en el día 26 de noviembre (0,3ºC menos que el caso IPV) y la temperatura máxima se registró en el Dormitorio 3 con 28ºC el 28 de noviembre (3,5ºC menos que el Caso IPV, Figura 6.65). Para el Comedor las temperaturas estuvieron entre 25,1ºC el 26 de noviembre (igual que el Caso IPV) y de máxima 30,2ºC el 28 de noviembre (1,5ºC menos que el Caso IPV). Las temperaturas exteriores a la vivienda oscilaron entre 16 ºC (26 de noviembre) y 35,1ºC (28 de noviembre). Estas son las mismas en los dos casos (IPV y Estratégico) y orientaciones (Sur, Oeste, Norte y Este).

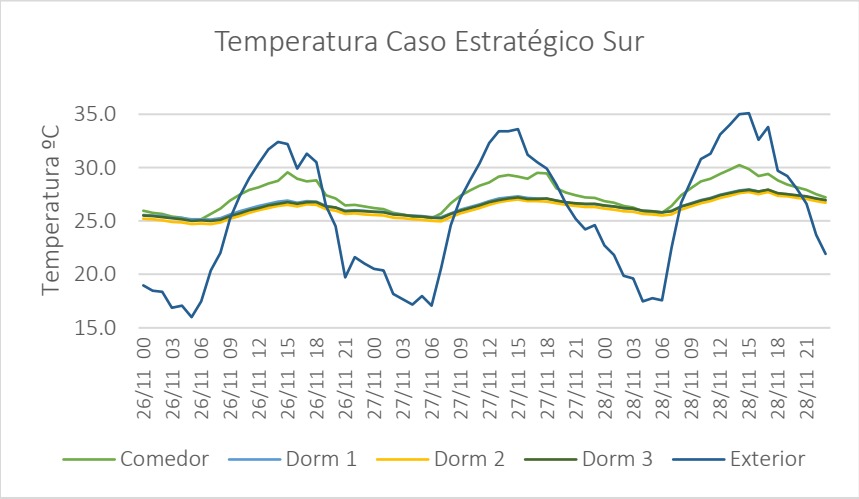


Fig. 6.85: Evolución de la temperatura de los días 26 al 28 de noviembre del Caso Estratégico Sur.

En la orientación Oeste (Figura 6.86), las temperaturas máximas de los dormitorios estuvieron entre 27,2ºC (Dormitorio 2) y 28,6ºC (Dormitorio 3). Unos 2,4ºC y 3,1ºC menos que el caso IPV (Figura 6.67). En cuanto a las temperaturas mínimas, las mismas rondaron los 25,3ºC (Dormitorio 2) y los 26,6ºC (Dormitorio 3), esto equivale a 0,2ºC más que el caso IPV (Dormitorio 2) y 0,3ºC menos (Dormitorio 3). El Comedor tuvo temperaturas entre 25,1ºC y 30,1ºC, 0,1ºC más que la mínima del caso IPV y 1,5ºC menos que la máxima del caso IPV.

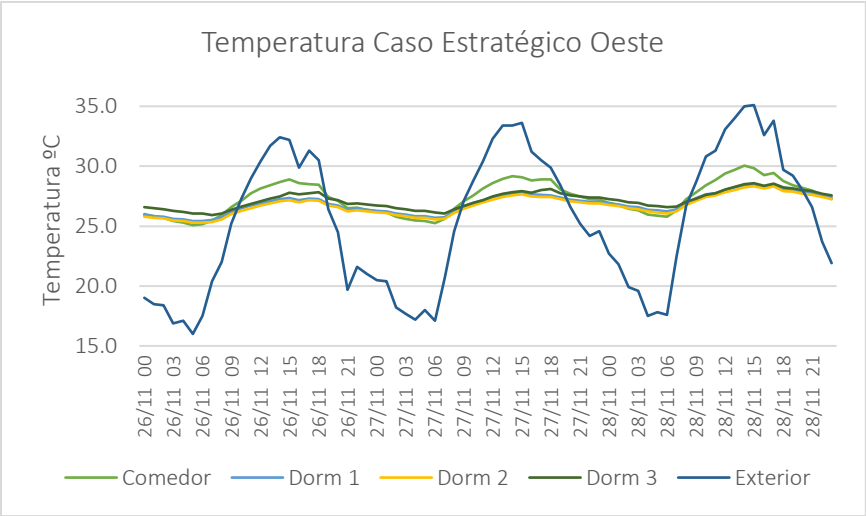


Fig. 6.86: Evolución de la temperatura de los días 26 al 28 de noviembre del Caso Estratégico Oeste.

El grafico de la Figura 6.87 se muestra la evolución de las temperaturas interiores de la vivienda del caso Estratégico Norte, para los días 26 al 28 de noviembre. Las temperaturas máximas de los dormitorios oscilaron entre 26,7ºC en el Dormitorio 1 (3,1ºC menos que en el caso IPV, Figura 6.69) y los 27,9ºC en el Dormitorio 3 (3,3ºC menos que en el Caso IPV). Las temperaturas mínimas tuvieron oscilaciones entre 24,9ºC en el Dormitorio 1 (0,3ºC menos que en el caso IPV) y los 25,8ºC en el Dormitorio 3 (0,7ºC menos que en el caso IPV). El Comedor estuvo entre 24,4ºC de mínima (igual que en el caso IPV) y 29,4ºC de máxima (1,8ºC menos que en el caso IPV).

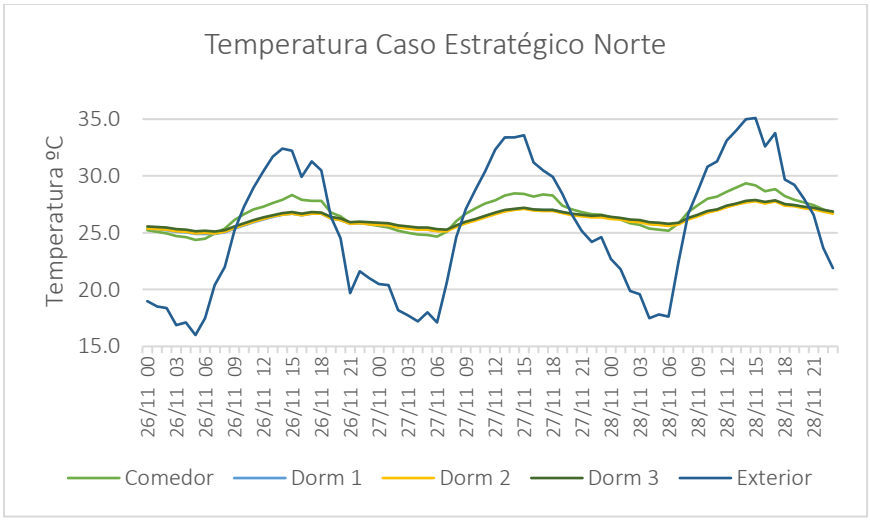


Fig. 6.87: Evolución de la temperatura de los días 26 al 28 de noviembre del Caso Estratégico Norte.

Por último, analizamos los días 26 al 28 de noviembre de la orientación Este Caso Estratégico (Figura 6.88). El Comedor tuvo mínimas que oscilaron entre 24,4ºC y 25,3ºC (0,3ºC menos y 0,1ºC más que el caso IPV, Figura 6.71), mientras que los dormitorios oscilaron entre 25,4ºC (Dormitorio 3) y los 26,6ºC (Dormitorio 1), si lo comparamos con el caso IPV serian 0,5ºC y 0,7ºC menos. Las temperaturas máximas entre 27,2ºC29,7ºC (Dormitorio 3) y los 28,6ºC 31,8ºC (Dormitorio 1), 2,5ºC y 3,2ºC menos que el caso IPV. El Comedor entre 24,4ºC (4,8ºC menos que el caso IPV) y los 29,4ºC (1,4ºC menos que el caso IPV).

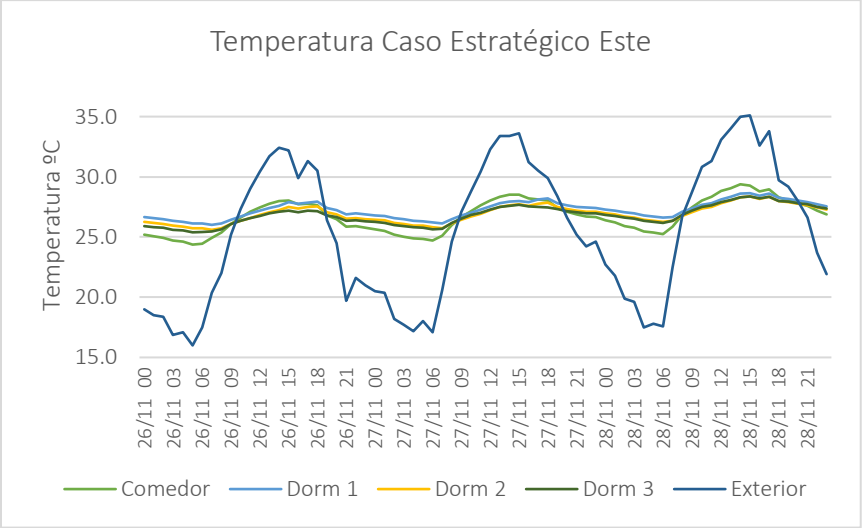


Fig. 6.88: Evolución de la temperatura de los días 26 al 28 de noviembre del Caso Estratégico Este.

La Tabla 6.28 detalla las temperaturas medias y amplitudes térmicas de los locales interiores de la vivienda, corresponden a los días 26 al 28 de noviembre. En el caso del Comedor, las temperaturas medias oscilaron entre 26,2ºC (0,5ºC menos que el caso IPV, Tabla 6.26) y una amplitud del 3,7ºC (1,5ºC menos que el Caso IPV), estos corresponden al 26 de noviembre orientación Este, y los 27,9ºC (1,2ºC menos que el caso IPV) con una amplitud del 4,5ºC (1,2ºC menos que el caso IPV), estos son del 28 de noviembre orientación Sur. Para el caso de los dormitorios, en la orientación Este Dormitorio 3 se calculó la menor temperatura media de 26,3ºC (1ºC menos que el caso IPV) con una amplitud de 1,8ºC (2,9ºC menos que el caso IPV), la mayor temperatura media estuvo también en el Dormitorio 3 pero en la orientación Oeste con 27,6ºC (1,9ºC menos que en el caso IPV) y una amplitud térmica del 2,0ºC

(2,8ºC menos que en el caso IPV). La temperatura media exterior a la vivienda (iguales a las de la Tabla 6.23) estuvo entre 24,1ºC (26 de noviembre) con una amplitud térmica de 17,6ºC y los 26,6ºC (28 de noviembre) con una amplitud térmica de 17,6ºC.

Tabla 6.28: Temperaturas medias de los locales interiores y las amplitudes térmicas correspondientes a los días 26 al 28 de noviembre del Caso Estratégico primavera verano.

Orientación	Dia	T_m [ºC] Comedor	T_m [ºC] Dor 1	T_m [ºC] Dor 2	T_m [ºC] Dor 3	T_m [ºC] Exterior
Sur	26-nov	27.0±4.5	26.0±1.8	25.6±1.8	25.9±1.8	24.1±16.4
	27-nov	27.4±4.2	26.4±2.0	26.1±2.0	26.3±1.9	25.6±16.5
	28-nov	27.9±4.5	26.9±2.2	26.7±2.2	26.9±2.1	26.6±17.6
Oeste	26-nov	26.9±3.8	26.4±1.9	26.2±1.9	26.8±1.9	24.1±16.4
	27-nov	27.3±3.9	26.8±2.1	26.7±2.1	27.1±2.1	25.6±16.5
	28-nov	27.9±4.3	27.4±2.3	27.3±2.3	27.6±2.0	26.6±17.6
Norte	26-nov	26.2±4.0	25.8±1.8	25.8±1.8	25.9±1.7	24.1±16.4
	27-nov	26.7±3.8	26.2±2.0	26.2±2.0	26.3±1.9	25.6±16.5
	28-nov	27.3±4.2	26.8±2.2	26.7±2.2	26.9±2.1	26.6±17.6
Este	26-nov	26.2±3.7	26.9±1.9	26.5±2.0	26.3±1.8	24.1±16.4
	27-nov	26.7±3.8	27.2±2.1	26.8±2.1	26.7±2.0	25.6±16.5
	28-nov	27.4±4.1	27.6±2.0	27.3±2.1	27.4±2.2	26.6±17.6

6.8.2 Carga de enfriamiento del Caso Estratégico periodo primavera-verano.

Procederemos a realizar el análisis de la carga energética para enfriamiento de la vivienda del caso Estratégico, del periodo primavera-verano. Comenzamos con la Figura 6.89, donde se muestra la carga energética del periodo primavera-verano orientación Sur. El promedio diario mensual del periodo para el Comedor fue de -190,8W (son -91,2W menos de carga térmica de enfriamiento que el caso IPV, Figura 6.72), mientras que los dormitorios tuvieron de valor promedio de ; -74,8W para el

Dormitorio 1 (-114,7W menos que el caso IPV), -46,1W para el Dormitorio 2 (-116,3W menos que el caso IPV) y -49,1W para el Dormitorio 3 (-115,7W menos que el caso IPV). Los valores máximos de carga de enfriamiento oscilaron entre -716,75 en el Dormitorio 3 (esto sería unos -78,45W menos que el caso IPV) y -1251,8W en el Dormitorio 1 (-296W menos que el caso IPV). Para el Comedor la oscilación de las máximas de carga de enfriamiento estuvo entre -1086,1W y -1860W (-40W y -391W menos que el caso IPV).

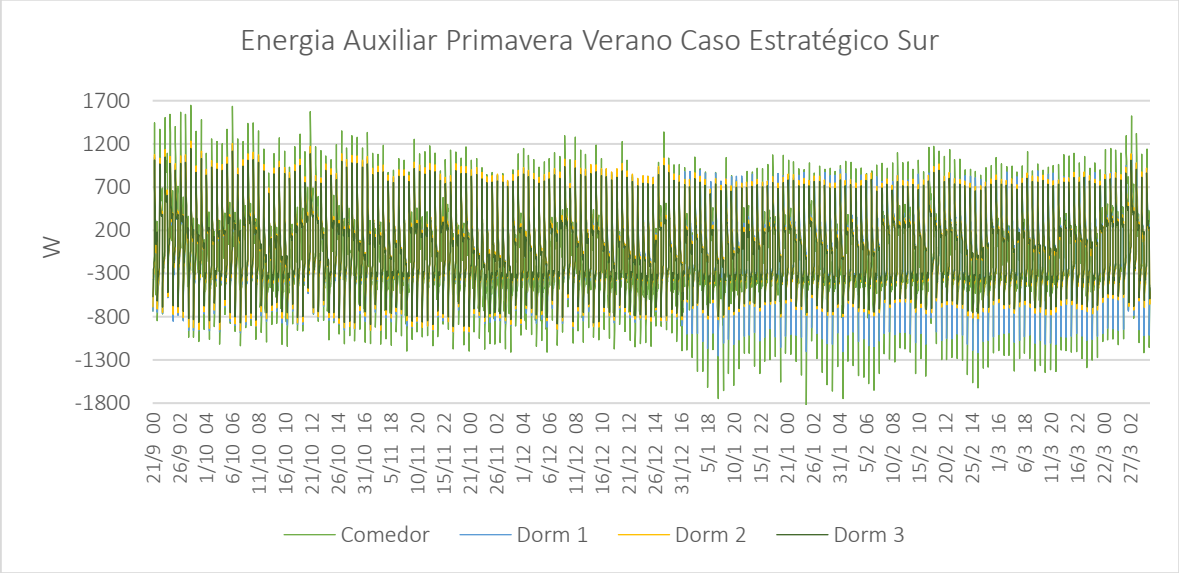


Fig. 6.89: Demanda de Energía auxiliar del periodo primavera-verano para el Caso Estratégico Sur.

Para la orientación Oeste (Figura 6.90), los valores medios diarios mensuales estuvieron entre -97,6W en el Dormitorio 1 (-109,1W menos que en el caso IPV, Figura 6.73), -78,7W en el Dormitorio 3 (-123,2W menos que en el caso IPV) y -66,5W en el Dormitorio 2 (-83,4W menos que en el caso IPV). El Comedor tuvo de promedio en el periodo, un valor de -215,4W (unos -137,5W menos que el caso IPV). Los valores de máxima carga de enfriamiento en los dormitorios fueron; -1159W para el Dormitorio 1 (-138W menos que caso IPV), -982,7W para el Dormitorio 2 (-48,3W menos que caso IPV) y -908,7W en el Dormitorio 3 (-321,3W menos que valor de Caso IPV). Para el caso del Comedor fue -1660W (-256W menos que en el caso IPV).

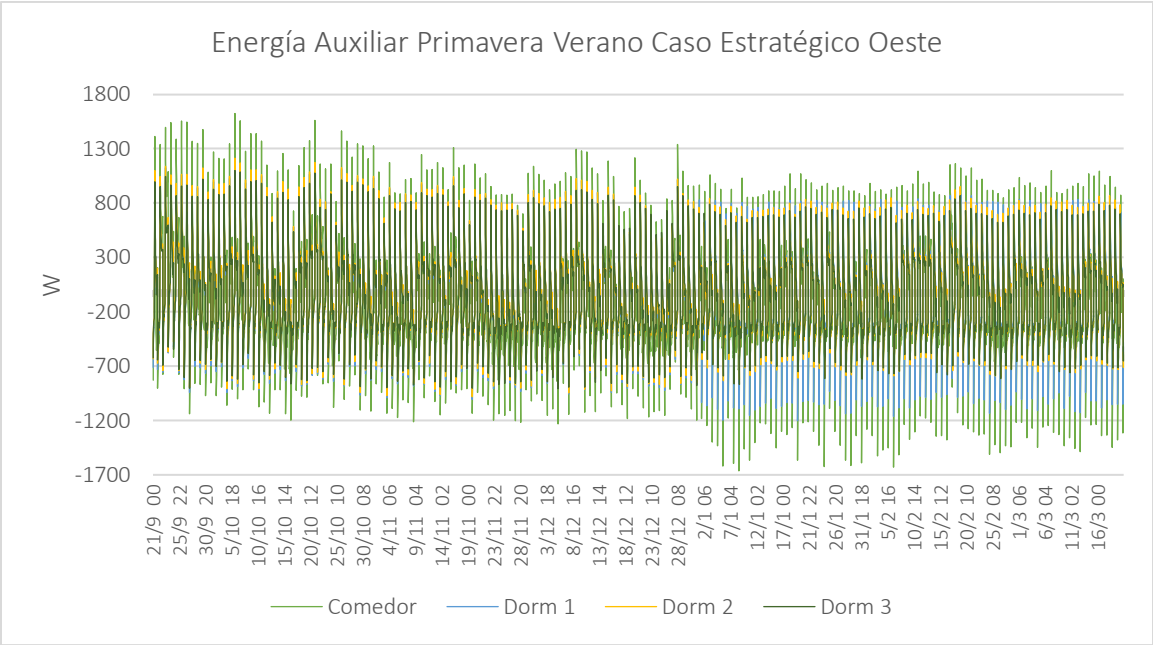


Fig. 6.90: Demanda de Energía auxiliar del periodo primavera-verano para el Caso Estratégico Oeste.

Analizamos los resultados para las orientaciones Norte (Figura 6.91) y Este (Figura 6.92). El promedio mensual de carga de enfriamiento para el Comedor fue de -241W en la orientación Norte (-97W menos que el caso IPV, Figura 6.76) y -171,3W en la orientación Este (-72,1W menos que en el caso IPV, Figura 6.77). En el caso de los dormitorios (orientación Norte), el Dormitorio 1 fue el de mayor promedio mensual con -119,2 (-123,3W menos que en el caso IPV), seguido por el Dormitorio 3 con -115,9W (-121,1W menos que caso IPV) y el Dormitorio 2 con -115,2W (-120,4W menos que el caso IPV). Para la orientación Este, el Dormitorio 1 tuvo el mayor promedio con -110W (-151,4W menos que el caso IPV), seguido por el Dormitorio 2 con -82,7W (-124,2W menos que el caso IPV) y por último el Dormitorio 3 con -78W (-77,2W menos que el caso IPV).

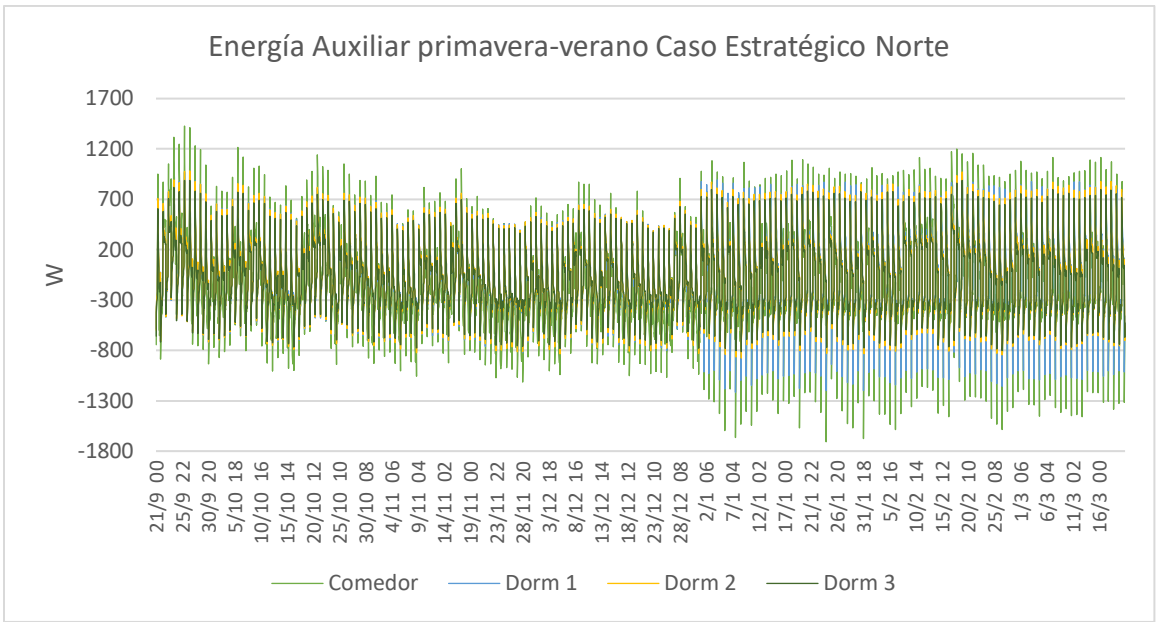


Fig. 6.91: Demanda de Energía auxiliar del periodo primavera-verano para el Caso Estratégico Norte.

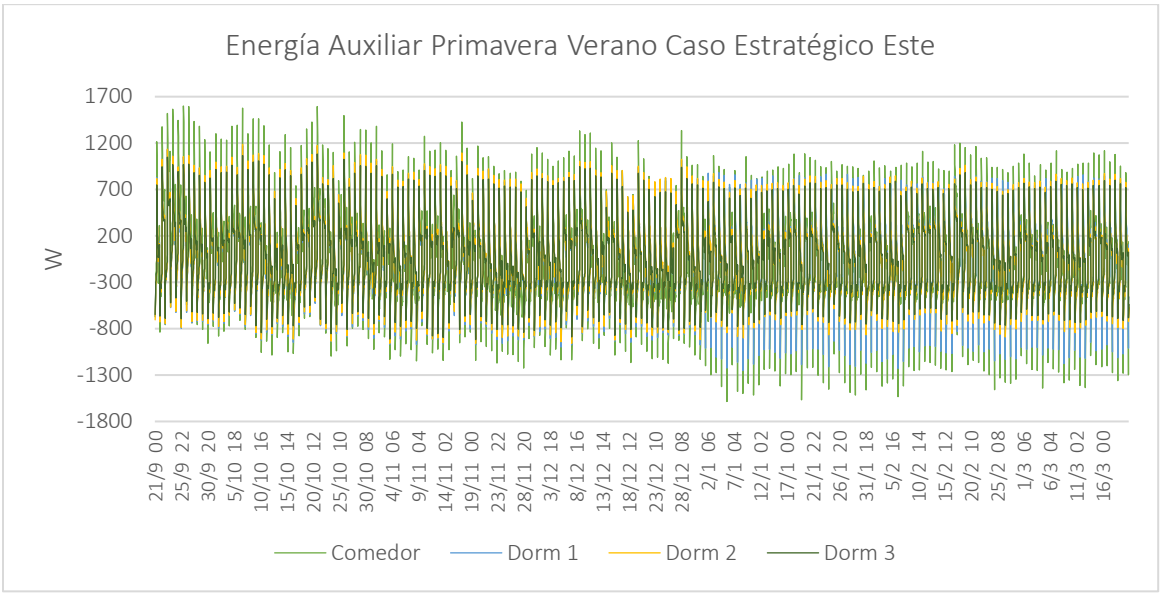


Fig. 6.92: Demanda de Energía auxiliar del periodo primavera-verano para el Caso Estratégico Este.

En la Figura 6.93 se muestran las cargas de enfriamiento de los días 26 al 28 de noviembre del caso Estratégico, para la orientación Sur. Los valores máximos de los dormitorios oscilaron entre -769,5W que se registró en el Dormitorio 3 (-94,5W menos que caso IPV, Figura 6.74) y los -905,1W que se registró en el Dormitorio 1 (-164,9W menos que caso IPV), mientras que el Comedor dio entre -1101.2W, el 27 de noviembre (-309,8W menos que el caso IPV), y los -1209W, el día 28 de noviembre

(-318W menos que el caso IPV). El menor valor promedio diario del Comedor fue de -403,9W corresponde al 26 de noviembre (-213,1W menos que caso IPV) y el mayor fue de -491W y corresponde al 28 de noviembre (-248W menos que caso IPV). Para los dormitorios el menor promedio fue el Dormitorio 2 con -143,5W (-225,5W menos que caso IPV) y el mayor se dio en el Dormitorio 2 también con -224,8W (-260.2W menos que caso IPV).

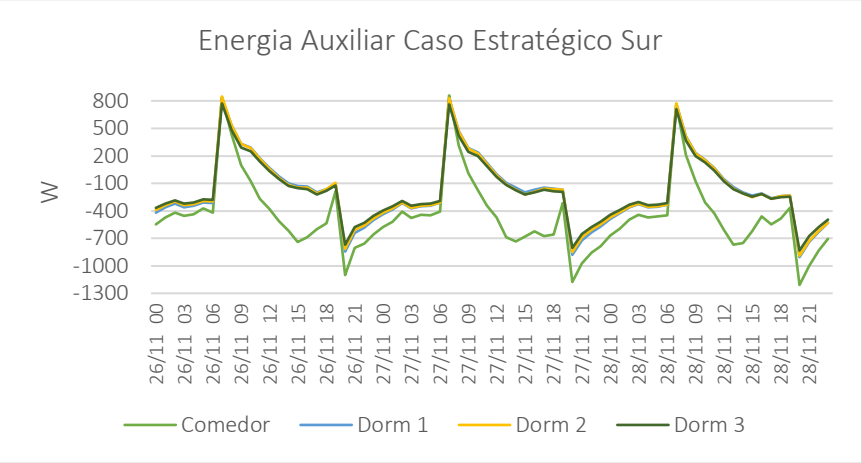


Fig. 6.93: Demanda de Energía auxiliar de los días 26 al 28 de noviembre para el Caso Estratégico Sur.

Para la orientación Oeste, que se muestra en la Figura 6.94, los valores promedios diarios del Comedor estuvieron entre -396W el 26 de noviembre (-195W menos que el caso IPV, Figura 6.75) y los -482,8W el 28 de noviembre (-268,2W menos que en el caso IPV). El Dormitorio 1 fue el de mayor promedio diario con -270,1W (-227,9W) seguido por el Dormitorio 2 con -259,4W (-229,6W menos que en el caso IPV) y por último el Dormitorio 3 con -235,2W (-248,8W menos que el caso IPV). Los valores máximos de carga de enfriamiento estuvieron entre -929W en el Dormitorio 1 (unos -118W menos que dio en el caso IPV) y el Dormitorio 2 con -903,4W (unos –23,6W menos que en el caso IPV), mientras que para el Comedor fue entre -1105,5W y -1216,9W (esto serian unos -445,5W y -113,1W menos que los que marco en el caso IPV).

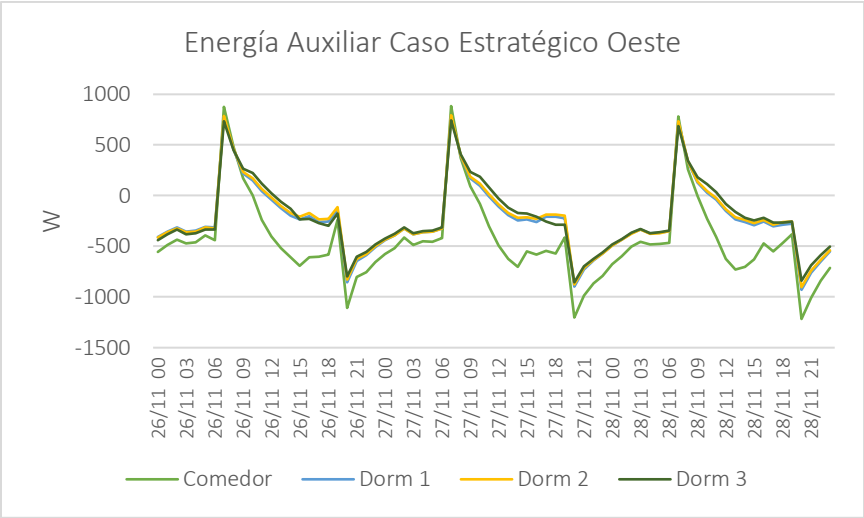


Fig. 6.94: Demanda de Energía auxiliar de los días 26 al 28 de noviembre para el Caso Estratégico Oeste.

En el análisis de la necesidad energética de enfriamiento para los días 26 al 28 de noviembre, de la orientación Norte (Figura 6.95), el mayor promedio diario en los dormitorios estuvo entre el Dormitorio 1 con -313,4W, en el día 28 de noviembre (-228,6W menos que el caso IPV, Figura 6.78) y los -242W del Dormitorio 3 para el mismo día (-259W menos que lo que se calculó en el caso IPV). La misma tendencia en la carga de enfriamiento se dio en los restantes días (26 y 27 de noviembre). El comedor oscilo entre -467,8W (-199W menos que el caso IPV del 26 de noviembre) y -571,2W (-241,8W menos que el caso IPV del 28 de noviembre). En cuanto a los valores máximos registrados, el Dormitorio 1 registro -825,2W (-256,8W menos que el caso IPV), seguido por el Dormitorio 2 con -810,7W (-271,3W menos que el caso IPV) y por último el Dormitorio 3 con -760,4W (-319,6W menos que dio en el caso IPV).

En el caso de la orientación Este (Figura 6.96), en los dormitorios el valor máximo registrado fue en el Dormitorio 1 con -920,9W (-211,1W menos que en el caso IPV, Figura 6.79) seguido por el Dormitorio 2 con -894,7W (-170,3W menos que caso IPV) y por último el Dormitorio 3 con -841W (-77W menos que el caso IPV). Todos estos valores del día 28 de noviembre. El promedio diario máximo fue de -247,2W (Dormitorio 1, 28 de noviembre) y el menor de -177W (Dormitorio 3, 26 de noviembre), esto sería un -274,8W y -180W menos que el caso IPV. El Comedor

registro valores promedios entre -356,2W y -471,1W (-161,8W y -222,9W menos que los valores del caso IPV), con un pico máximo horario de -1222,8W (unos -178,2W menos que caso IPV del día 28 de noviembre).

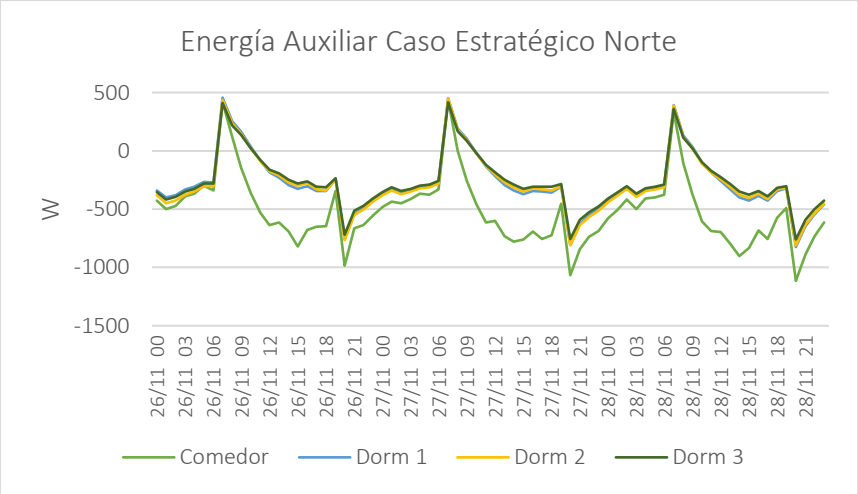


Fig. 6.95: Demanda de Energía auxiliar de los días 26 al 28 de noviembre para el Caso Estratégico Norte.

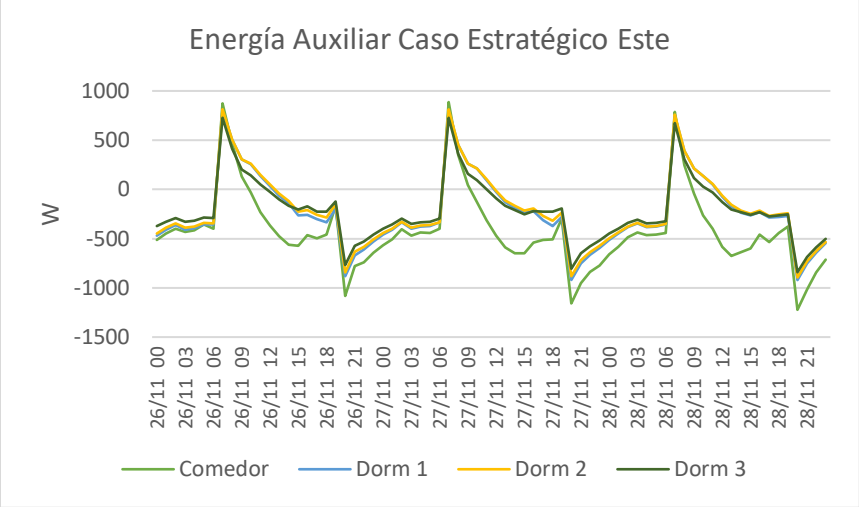


Fig. 6.96: Demanda de Energía auxiliar de los días 26 al 28 de noviembre para el Caso Estratégico Este.

La Tabla 6.29 detalla la carga térmica de enfriamiento promedio total diaria, de cada local de la vivienda para las cuatro orientaciones, correspondiente a los días 26 al 28 de noviembre. La orientación Norte fue la de mayor necesidad de consumo energético con -38,2KW (son unos -21,6KW menos que el caso IPV, Tabla 6.27) de promedio diario, seguido por la orientación Oeste con -35,5KW (-19KW menos que el caso IPV), tercer puesto para la orientación Este con -34,8KW (-19,8KW menos que

el caso IPV) y la orientación de menor promedio diario fue la Sur con -33,6KW (-21,2KW menos que lo dado en caso IPV). En cuanto al análisis individual de los dormitorios, en la orientación Norte el Dormitorio 1 fue el de mayor necesidad energética con -8,1KW (-5,3KW menos que el caso IPV) y el Dormitorio 3 el de menor valor con -7,5KW (-4,9KW menos que caso IPV), ambos dormitorios corresponden al día 28 de noviembre.

En la Orientación Sur, el intervalo de carga térmica de enfriamiento total diaria estuvo entre el Dormitorio 1 con -7KW (-5,2KW menos que caso IPV) y el Dormitorio 3 con -6,7KW (-5,2KW menos que caso IPV). Para la orientación Este, el Dormitorio 1 tuvo un total diario máximo de -7,4KW (-5,7KW menos que el caso IPV) y el menor valor en el Dormitorio 3 con -7KW (-2,2KW menos que caso IPV), ambos del 28 de noviembre.

Por último, en la orientación Oeste el Dormitorio 1 presento mayores valores de carga térmica con -7,7KW (-4,8KW menos que caso IPV) y el Dormitorio 3 -6,4KW fue su menor valor diario total (-3,2KW menos que caso IPV). La tendencia de necesidad energética para enfriamiento fue de menor a mayor desde el 26 al 28 de noviembre.

Tabla 6.29: Carga térmica de enfriamiento en KW del periodo primavera verano del Caso Estratégico, requerida en cada uno de los locales según la orientación correspondiente, para mantener la temperatura interior entre 18 °C y 24,4°C en los días 26 al 28 de noviembre.

Orientación	Días	Comedor [KW]	Dor 1 [KW]	Dor 2 [KW]	Dor 3 [KW]	Toilet [KW]	Pasillo [KW]	Total [KW]
Sur	26-nov	-10.7	-5.8	-5.6	-5.5	-2.4	-0.8	**-30.8**
	27-nov	-12.4	-6.0	-6.0	-5.9	-2.3	-0.8	**-33.5**
	28-nov	-12.4	-7.0	-7.0	-6.7	-2.6	-0.9	**-36.5**
Oeste	26-nov	-10.8	-6.5	-6.2	-6.4	-2.0	-0.9	**-32.8**
	27-nov	-12.0	-7.1	-6.8	-6.7	-2.2	-0.9	**-35.7**
	28-nov	-12.4	-7.7	-7.5	-7.0	-2.5	-0.9	**-38.0**

Norte	26-nov	-11.6	-6.8	-7.1	-6.6	-2.5	-0.8	**-35.4**
	27-nov	-12.8	-7.5	-7.5	-6.9	-2.7	-0.9	**-38.2**
	28-nov	-13.6	-8.1	-8.0	-7.5	-2.9	-1.0	**-41.0**
Este	26-nov	-9.9	-7.0	-6.5	-5.8	-2.2	-0.9	**-32.2**
	27-nov	-11.2	-7.4	-7.0	-6.5	-2.3	-1.0	**-35.3**
	28-nov	-12.0	-7.4	-7.1	-7.0	-2.5	-0.9	**-37.0**

6.9 Resultados de las simulaciones en SIMUSOL de los PCM

En este inciso se muestran primero los resultados de las caracterizaciones de las parafinas RT18HC y RT21HC, usadas en la simulación de SIMUSOL. También se detallan los resultados de las simulaciones del ladrillo PumaPunku con PCM, para los días 26 al 28 de noviembre y del 27 al 29 de junio.

6.9.1 Caracterización energética de los materiales de cambio de fase

Las Figuras 6.97 y 6.98, muestran las curvas de potencia de calor latente y el calor especifico, correspondientes a los resultados del DSC para las seis parafinas, mientras que la Tabla 6.9 resume la información térmica extraída de las pruebas de todos los coeficientes a, b, c y d. Los calores latentes de las muestras se calculan estableciendo un área triangular debajo de las curvas de capacidad calorífica, mientras se produce el cambio de fase. Los valores de calor latente y calor especifico obtenidos de las parafinas en la caracterización fueron; RT18 (Figura 6.97) dio 260,6 J/g de calor latente y 52,52 J/g°C, con R^2=0,93; para RT21 (Figura 6.98) midió 182,82 J/g y 25,92 J/g°C, con R^2=0,85.

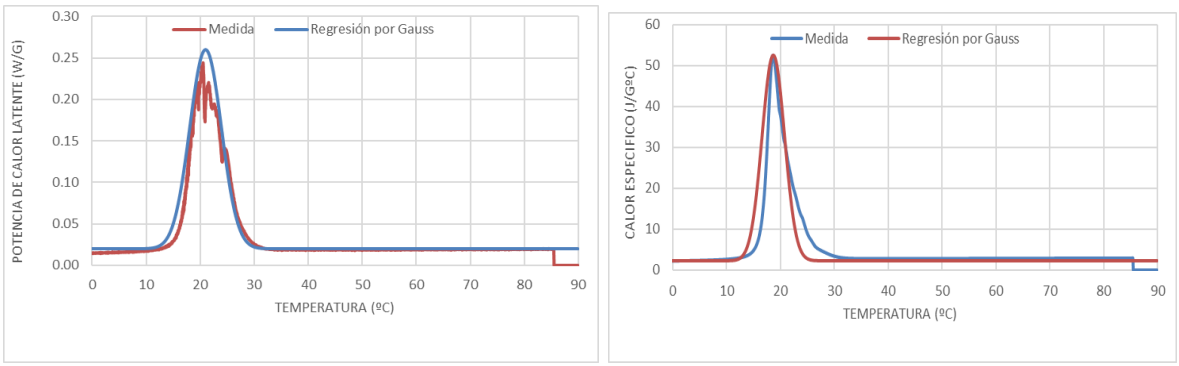


Fig. 6.97: A la izq. La curva representativa de la potencia de calor latente y a la der. el calor especifico de RT18 (Dellicompagni, 2020).

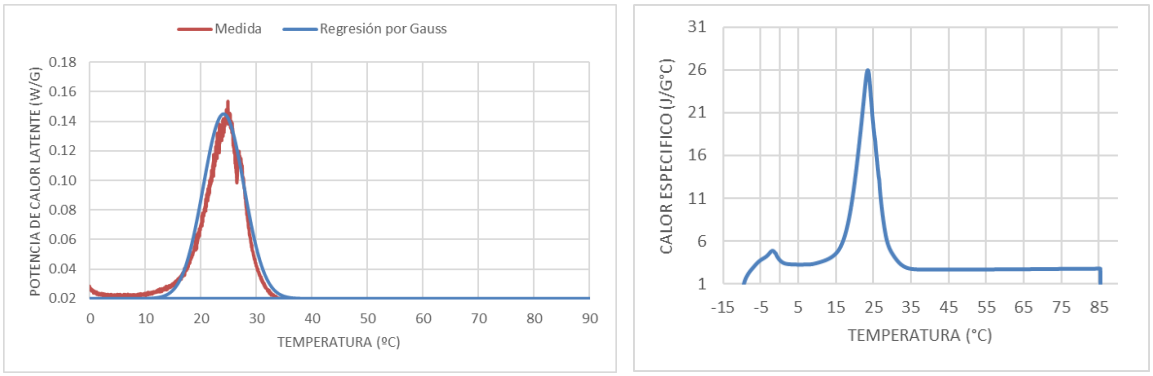


Fig. 6.98: A la izq. La curva representativa de la potencia de calor latente y a la der. el calor especifico de RT21.

6.9.2 Evolución de las temperaturas del recinto: periodo invierno

La Figura 103 muestra la temperatura ambiente para los tres días analizados, 27 al 29 de junio. La temperatura mínima llego a los -3,4ºC y la máxima a los 20ºC. El Comedor (correspondiente al del Caso IPV) estuvo entre los 7,2ºC (28 de junio) y los 15ºC (29 de junio). Para estos días se realizaron cuatro combinaciones posibles de los sistemas de control con los seis PCM diferentes. Lo que da un total de 24 resultados posibles.

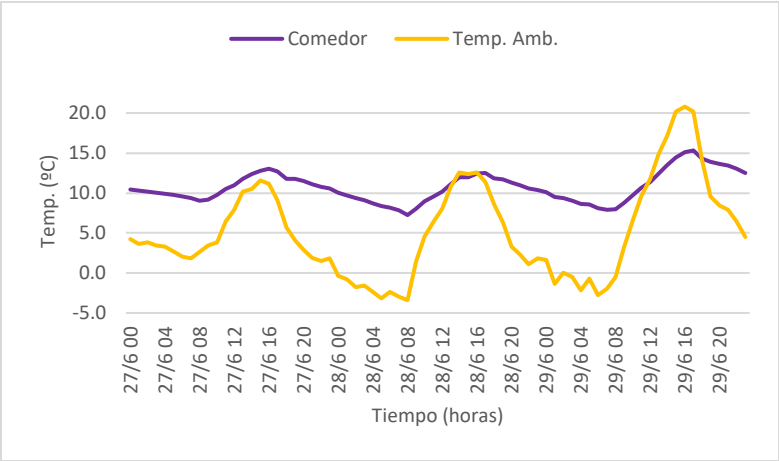


Fig.:6.103: Evolución de la temperatura ambiente y del comedor para los días 27 al 29 de junio.

La Figura 6.104 muestra cómo se comporta la temperatura del recinto y de los PCM, sin termostato y sin HVAC. Podemos notar que solo el PCM RT18 cambio de fase durante los tres días (se da a los 18ºC). El reciento estuvo entre los 8ºC y 21ºC (13ºC de amplitud térmica). El tercer día se da un aumento de temperatura mayor porque existe una acumulación de energía en el recinto (ya que no hay caudal masico de extracción). El PCM RT21 llego al cambio de fase al tercer día (29 de junio). En esta configuración comparado con el Caso IPV, aumento la temperatura máxima del recinto unos 4ºC los primeros dos días.

Cuando activamos el termostato y no el HVAC (Figura 6.105), las temperaturas del recinto oscilaron entre los 6ºC y los 17ºC para las paredes con los diferentes PCM (los dos primeros días). Al tercer día llego hasta los 22ºC. El PCM RT21 cambio de fase solo el tercer día, mientras que el PCM RT18 lo hizo los tres días. Comparando con el Caso IPV, aumento la temperatura máxima del recinto entre 2ºC y 7ºC con la incorporación del conjunto ladrillo-PCM-ladrillo.

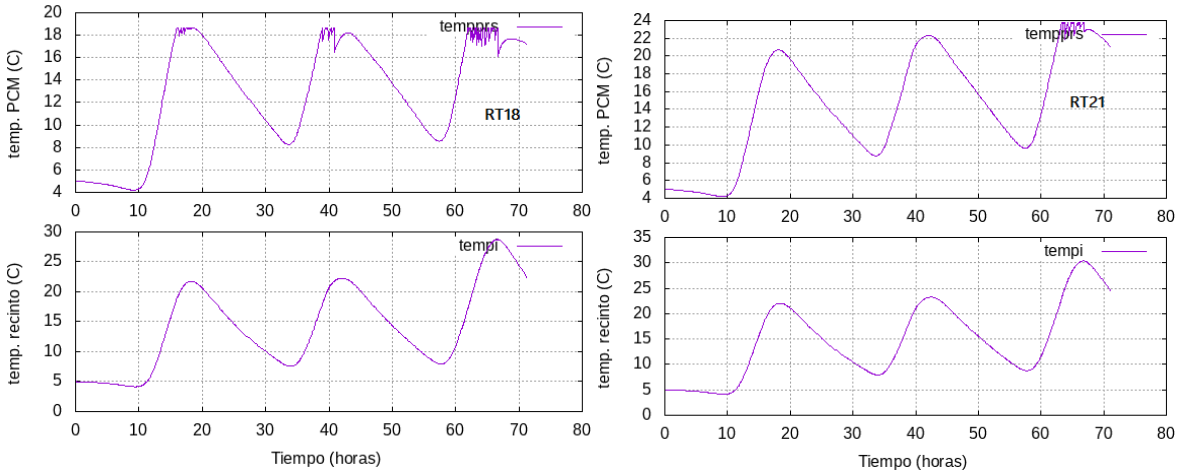


Fig. 6.104: Evolución de las temperaturas del recinto y de los seis PCM: sin HVAC y sin termostato.

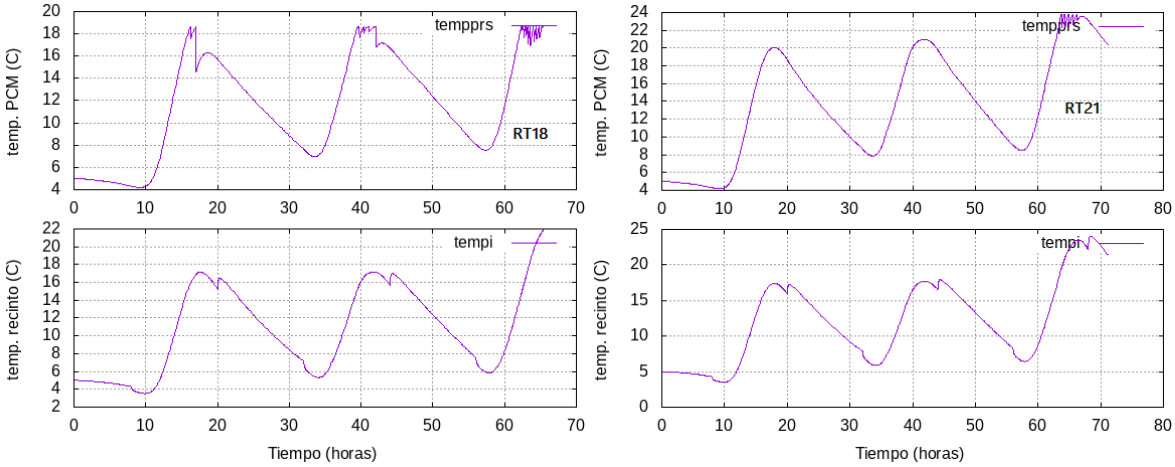


Fig. 6.105: Evolución de las temperaturas del recinto y de los seis PCM: sin HVAC y con termostato.

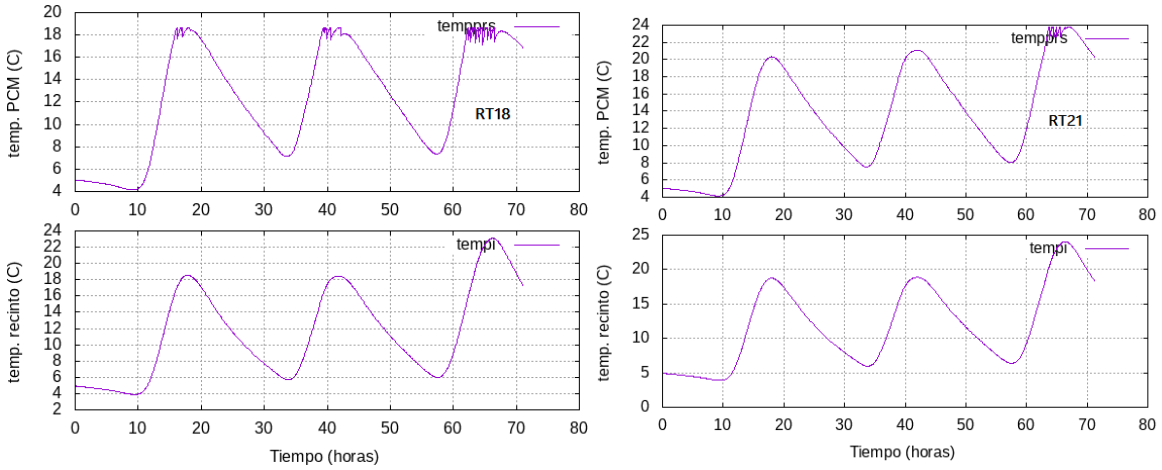


Fig. 6.106: Evolución de las temperaturas del recinto y de los seis PCM: con HVAC y sin Termostato.

Para la configuración de activar HVAC y no el Termostato (Figura 6.106), las temperaturas oscilaron los primeros dos días entre 8ºC y 18ºC. El cambio de fase de los PCM fue similar que los anteriores casos. Hubo un aumento de entre 2ºC y 5ºC de la máxima comparado con el Caso IPV.

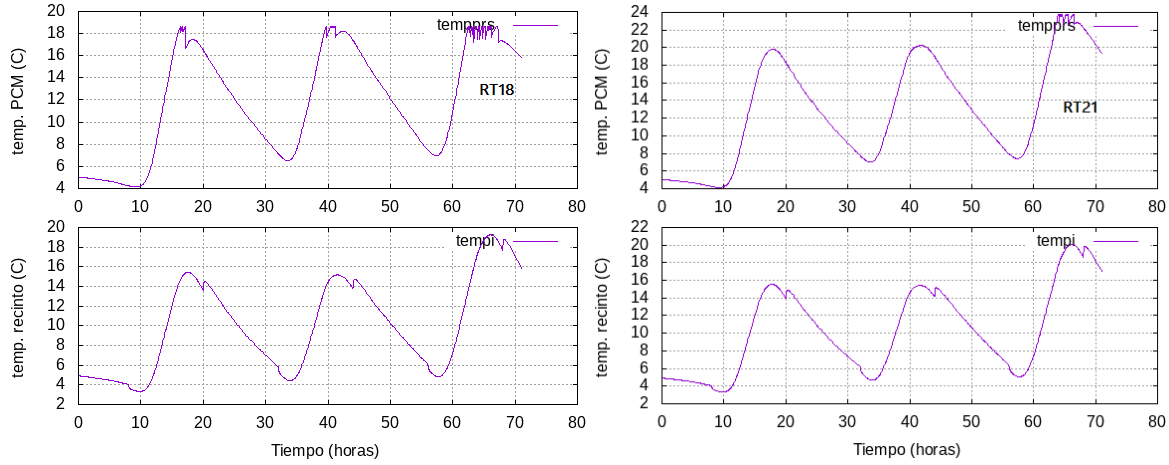


Fig. 6.107: Evolución de las temperaturas del recinto y de los seis PCM: con HVAC y con Termostato.

Si activamos los dos sistemas de control (HVAC y Termostato), lo que se muestra en la Figura 6.107, notamos que la temperatura del recinto oscilo entre los 8ºC y los 15ºC para los días 27 y 28 de junio, mientras que para el 29 de junio aumento hasta los 20ºC (5ºC más que el caso IPV). La Figura 6.108 muestra la potencia aportada promedio de las paredes con PCM. El 27 de junio tuvo un pico

máximo de aporte de 640W, el 28 de junio la pared aporto al recinto 610W y finalmente 29 de junio 790W. La pared estuvo aportando potencia al recinto unas 10 hs aproximadamente cada día, esto es gracias al a la acumulación de energía del conjunto ladrillo-PCM-ladrillo.

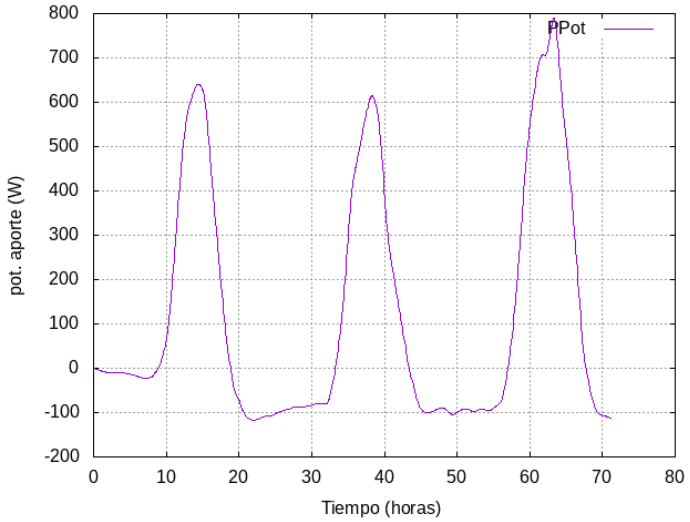


Fig. 6.108: potencia aportada por la pared con PCM hacia el recinto.

6.9.3 Evolución de las temperaturas del recinto: periodo verano.

En este inciso analizaremos el comportamiento de las paredes con PCM para los días 26 al 28 de noviembre. La Figura 6.109 muestra la temperatura ambiente de dichos días, la máxima llego a los 35ºC mientras que la mínima fue 17ºC. Las temperaturas del Comedor del Caso IPV (de ladrillo hueco de cerámico y sin PCM) estuvieron entre los 25ºC de mínima (26 de noviembre) y los 31,2ºC de máxima (28 de noviembre).

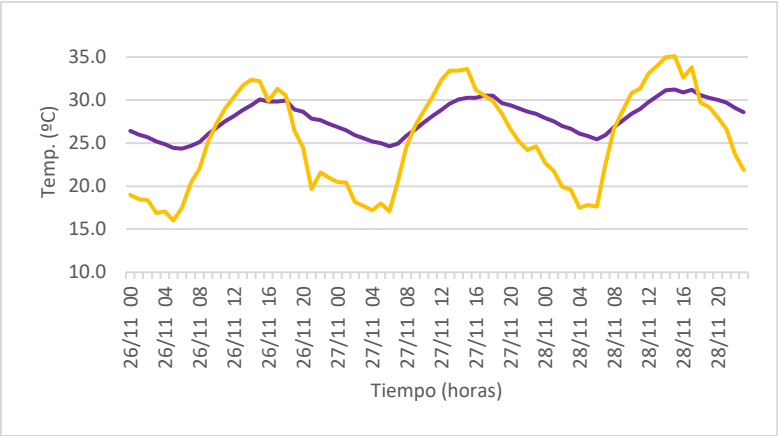


Fig. 6.109: Evolución de la temperatura ambiente y del Comedor del Caso IPV para los días 26 al 28 de noviembre.

La Figura 6.110 detalla la evolución de las temperaturas del recinto y de los seis PCM: sin HVAC y sin Termostato. Todos los PCM cambiaron de fase en los tres días de noviembre. En el caso del recinto con PCM RT18 la temperatura oscilo entre 20ºC y 35ºC. Para el recinto con PCM RT21 la temperatura estuvo entre 25ºC y 37ºC. El mismo comportamiento de aumento de las temperaturas máximas y mínimas se da en los restantes PCM, hasta llegar a los 43ºC en el caso del recinto con PCM RT35. El promedio de la amplitud térmica del reciento rondo los 15ºC. Con esta configuración los primeros dos días, la temperatura mínima del recinto bajo 5ºC y la máxima aumento 6ºC con respecto al caso IPV. En el tercer día se dio un aumento de 12ºC lo que da un sobrecalentamiento mayor que los días anteriores.

Para la obtención de la Figura 6.111 se activó el termostato y se desactivo el HVAC. Los PCM RT18 y RT21 llegaron a la temperatura de cambio de fase los tres días de noviembre. Para los restantes días (27 y 28 de noviembre) estos PCM si llegaron a cambiar de fase. En el caso del recinto con la pared con RT18, la temperatura oscilo entre los 16ºC y 24ºC los tres días. Para el RT21 la temperatura oscilo entre 17ºC y 25,5ºC. En esta configuración, la amplitud térmica del recinto promedio los 8ºC y las temperaturas de recinto estuvieron en la zona de confort.

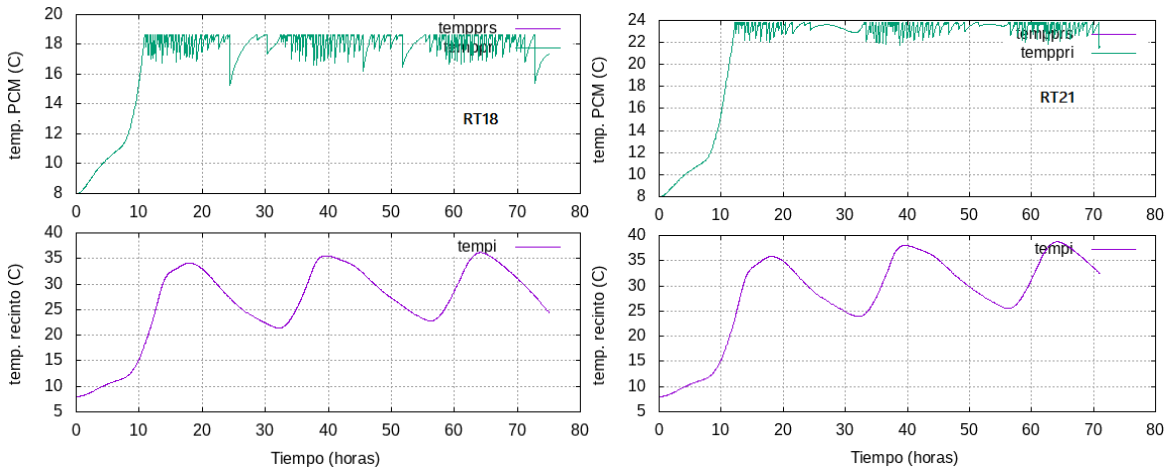


Fig. 6.110: Evolución de las temperaturas del recinto y de los seis PCM: sin HVAC y sin Termostato.

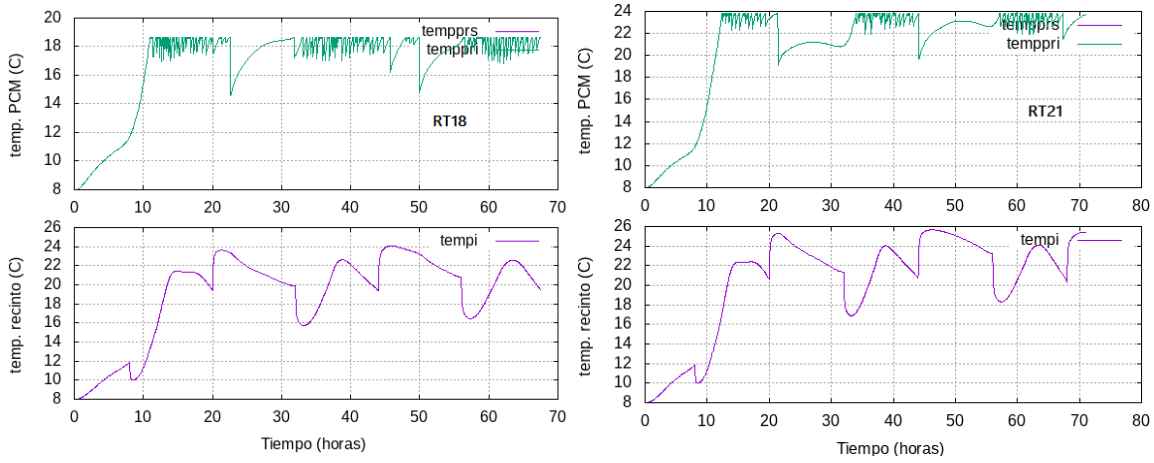


Fig. 6.111: Evolución de las temperaturas del recinto y de los seis PCM: sin HVAC y con Termostato.

La Figura 6.112 detalla la potencia promedio aportada por la pared (ladrillo-PCM-ladrillo) al recinto. El pico máximo del primer día (26 de noviembre) fue de 1110W, seguido por el segundo día (27 de noviembre) con 980W y el tercer día (28 de noviembre) el pico fue 850W. Las horas promedios de aporte de potencia estuvo en 10 horas aproximadamente.

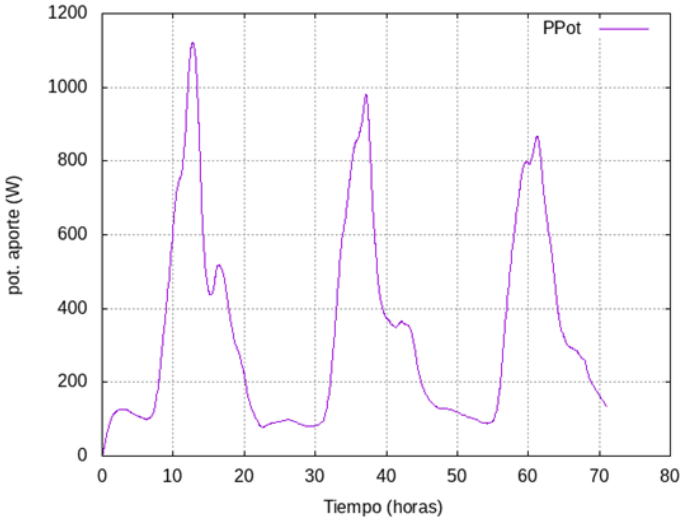


Fig. 6.112: Potencia promedio aportada por la pared con PCM al recinto, en el periodo de verano.

Cuando se activa el HVAC y no el termostato tenemos los resultados de la Figura 6.113, en donde los PCM se comportaron se manera similar que el caso anterior. La temperatura del recinto oscilo entre 14ºC y 23ºC en el caso del PCM RT18, mientras que para el recinto con RT21 la oscilación fue de 14,5ºC a 24ºC. Con esta configuración del sistema de control, el promedio de la amplitud térmica estuvo en 10ºC y las temperaturas máximas mermaron 6ºC con respecto al caso IPV, lo que la ubicó en la zona de confort.

La Figura 6.114 muestra las temperaturas del recinto y los PCM para los sistemas HVAC y Termostato activados. El cambio de fase de los PCM se dio de manera similar a los casos anteriores. Las temperaturas del recinto oscilaron; para el RT18 entre 11,8ºC y 17,8ºC, el RT21 entre 12ºC y 18,3ºC. Si bien mermaron en promedio 12ºC las máximas comparado con el caso IPV, las temperaturas de todas las combinaciones de los recintos están muy bajas con respecto a la zona de confort. Las amplitudes térmicas promedios son de 7ºC.

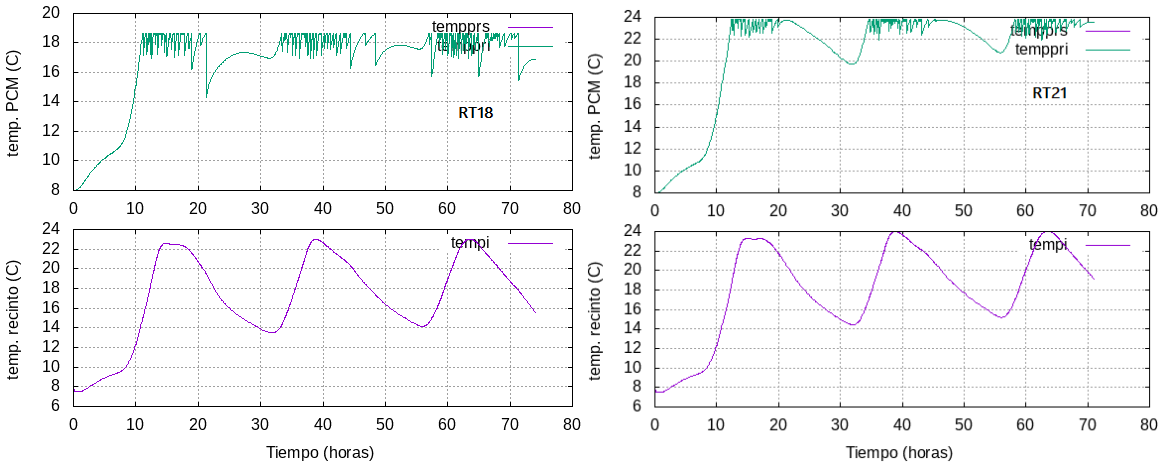


Fig. 6.113: Evolución de las temperaturas del recinto y de los seis PCM: con HVAC y sin Termostato.

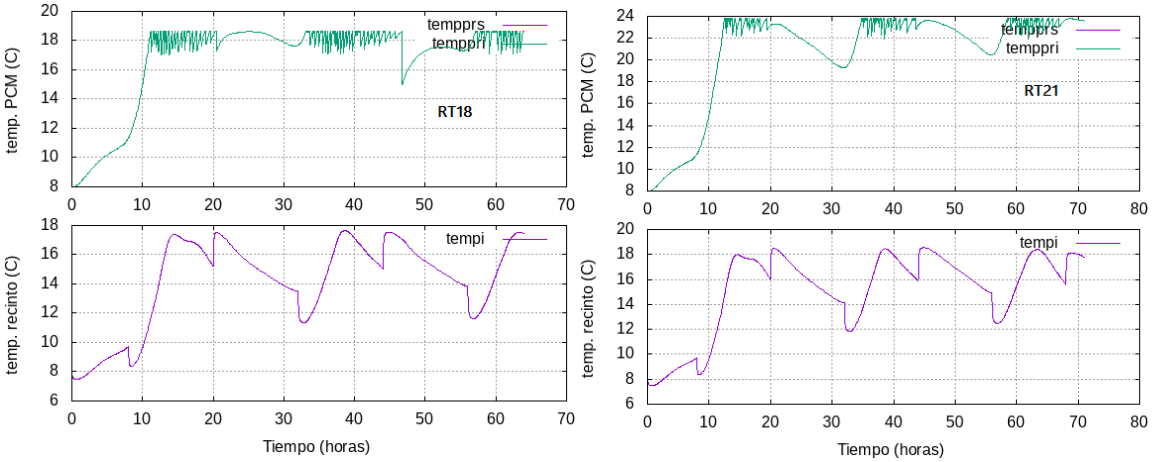


Fig. 6.114: Evolución de las temperaturas del recinto y de los seis PCM: con HVAC y con Termostato.

6.10 Diagrama de Givoni para la Ciudad de Salta Capital

En las Figura 6.115, Figura 6.116 y Figura 6.117 se muestran los resultados de la simulación con el programa ABC (Architectural Bioclimatic Classification, Downloads (roriz.eng.br)), donde se detallan las estrategias propuestas por el diagrama de Givoni. Se utilizo como fuente de datos meteorológicos el TMYPlus generado en el capítulo 3 de esta Tesis.

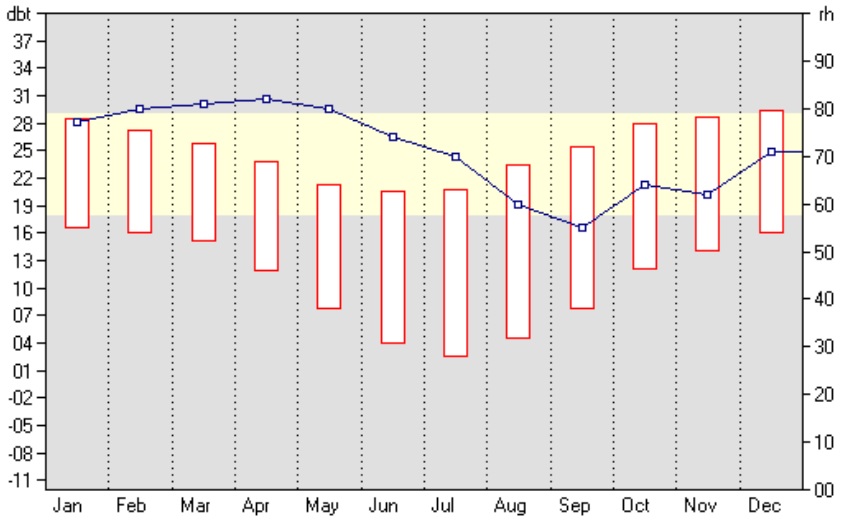


Fig. 6.115: Evolución de la temperatura de bulbo seco anual y de la humedad relativa anual.

En la Figura 6.115 Se muestra en barra la temperatura mínima y máxima de bulbo seca de cada mes, mientras que la curva azul detalla la evolución del porcentaje de humedad relativa. La franja amarilla es el intervalo de temperatura de confort y de humedad relativa.

Tenemos el diagrama de Givoni en el gráfico de la Figura 6.116 . Podemos ver en colores los límites para las estrategias bioclimáticas, los mismos se dividen en; rojo para enero hasta marzo, verde para abril hasta junio, negro para julio hasta septiembre y azul para octubre hasta diciembre. Las letras desde la A hasta la J son las estrategias bioclimáticas aconsejadas por el programa.

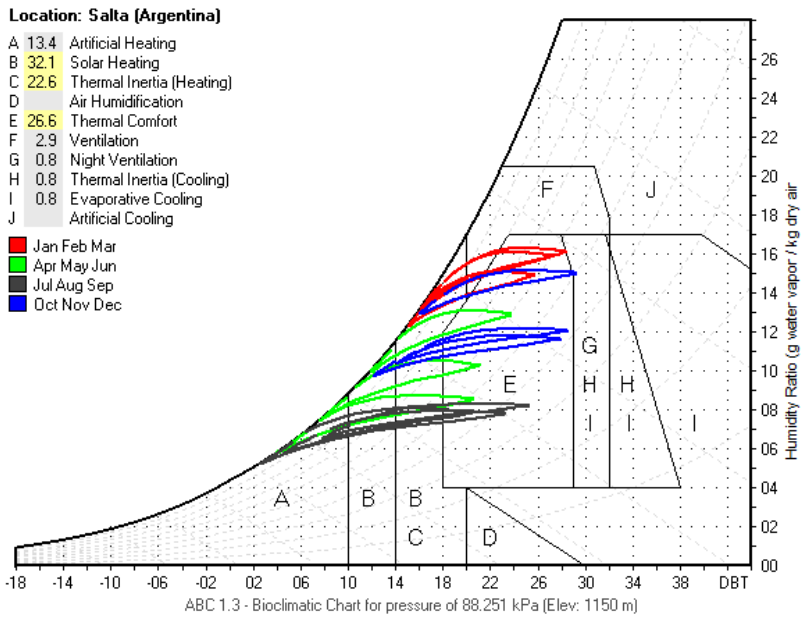


Fig. 6.116: Diagrama bioclimático para la Ciudad de Salta, resultado de la simulación.

De acuerdo a los resultados del diagrama bioclimático, se necesitan un 32,1 % de Calefacción Solar, se está un 26,6 % en Confort Térmico, se necesita también un 22,6 % de Inercia Térmica (Calefacción), un 13,4 % Calefacción Artificial, un 2,9 % de ventilación, un 0,8 % de Ventilación nocturna, Inercia Térmica (Enfriamiento) y de Enfriamiento evaporativo. Estos resultados se detallan también en la Figura 6.117.

Location: Salta (Argentina) Source: TMYPlus

Latitude: -24.8 Longitude: -65.4 Elevation (m): 1150

	DBTmin	DBTmax	RHavg
Jan	16.6	28.4	77
Feb	16.1	27.3	80
Mar	15.1	25.8	81
Apr	11.9	23.8	82
May	7.8	21.2	80
Jun	4.0	20.6	74
Jul	2.5	20.7	70
Aug	4.6	23.4	60
Sep	7.8	25.4	55
Oct	12.1	28.0	64
Nov	14.1	28.6	62
Dec	16.0	29.3	71

Bioclimatic Classification

Strategy	% (time)
Artificial heating	13.4
Solar heating	32.1
Thermal inertia	22.6
Air humidification	
Thermal confort	26.6
Ventilation	2.9
Night ventilation	0.8
Thermal inertia	0.8
Evaporative cooling	0.8
Artificial cooling	

Fig. 6.117: Estrategias bioclimáticas del programa ABC.

6.11 Conclusiones del capitulo

En este capítulo se realizó el comportamiento de las temperaturas interiores de una vivienda, mediante simulación computacional. La vivienda elegida para la simulación, es una vivienda social que entrega anualmente el Instituto de Vivienda de la provincia de Salta (IPV), la cual tiene la mampostería de ladrillo hueco cerámico, ventanas simples, orientación que el instituto propone que no siempre son las correctas. La simulación se dividió en dos casos: un Caso IPV, es el caso base ingresado al programa SIMEDIF, con las características constructivas convencionales antes mencionadas. Luego el Caso Estratégico, que es el propuesto por el tesista doctoral, donde se simula la vivienda con las siguientes características; la mampostería de ladrillos PumaPunku, material de cambio de fase implementado en los ladrillos PumaPunku, ventanas DVH, implementación del Colector de aire fabricado en el capítulo anterior, orientación optima de la vivienda, etc. Las mismas son ingresadas al programa SIMEDIF para la comparación con el caso base.

Los datos meteorológicos ingresados al programa fueron los del TMYPlus, el año meteorológico típico realizado en el capítulo 2 de esta tesis. Las simulaciones en SIMEDIF se dividieron en dos periodos: el periodo otoño-invierno y el periodo primavera-verano. Se realizo la simulación de estos periodos en cuatro diferentes orientaciones de la vivienda (Sur, Oeste, Norte y Este). Ídem para el Caso IPV y Caso Estratégico. En cada periodo se escogieron los 3 días consecutivos de peores condiciones climáticas, lo que arrojaron para el periodo otoño-invierno, los días 27 al 29 de junio, mientras que en el periodo primavera-verano los días 26 al 28 de noviembre. Utilizando la temperatura óptima de confort para cada periodo se propuso la zona de confort, lo que dio 18ºC a 24,4ºC para el periodo primavera-verano y entre 18ºC y 22,1ºC para el periodo otoño-invierno.

Para la implementación del PCM, primero se realizaron las caracterizaciones con el método DSC, donde se obtuvieron los calores latentes y específicos de las parafinas. Se aplico una regresión gaussiana a cada PCM con valores de los coeficientes R^2 de al menos en 0,82. Con las parafinas, llamadas RT18 y RT21, se simulo, mediante el programa Simusol, el comportamiento térmico de un recinto

(similar al comedor del caso IPV) con una pared formando el conjunto "ladrillo PumaPunku-PCM-ladrillo PumaPunku". Aquí también se dividieron en dos periodos las simulaciones, invierno (27 al 29 de junio) y verano (26 al 28 de noviembre). La zona de confort es la misma que la expresada en la simulación con SIMEDIF. En cada periodo se introdujeron dos sistemas de control de flujo volumétrico: el HVAC y el termostato. Se realizaron todas combinaciones posibles cuando el sistema este en encendido o apagado (para ambos controles). Lo que dio un total de 48 simulaciones en Simusol, sumadas a las 32 simulaciones que arrojo el SIMEDIF, dan un total de 80 situaciones diferentes del comportamiento térmico de la vivienda social.

Los resultados de las simulaciones en SIMEDIF dieron que la orientación Sur es la más óptima para la vivienda. Ya que esta presenta las menores necesidades de consumo energético, tanto de calefacción como de enfriamiento. Con el Caso Estratégico las temperaturas medias del interior de la vivienda, del periodo otoño-invierno, aumentaron en promedio un 2,5ºC con respecto al Caso IPV. Para los días 27 al 29 de junio, las temperaturas medias aumentaron en; 1,5ºC para el Comedor, en el caso de los dormitorios fueron entre 1,7ºC en el Dormitorio 1 y 1ºC en el Dormitorio 2. En cuanto a las amplitudes térmicas, se redujeron con respecto al caso IPV, el Comedor paso de 7,4ºC a 5,4ºC, en el Dormitorio 3 presentaba una amplitud térmica de 3,9ºC y se redujo con el Caso Estratégico a 1,7ºC, para el Dormitorio 2 de 7ºC de amplitud térmica a 3,4ºC. Las temperaturas exteriores estuvieron entre los -3,4ºC y 21ºC con grandes amplitudes que iban desde 10,1ºC (27 de junio) a 23,6ºC (29 de junio). En cuanto a la energía auxiliar de calefacción, el Comedor tuvo promedios diarios entre 487W en el 29 de junio y los 641W del 28 de junio, esto es entre un 30% y 32% menos que el caso IPV. El Dormitorio 1 fue el de menor demanda promedio diaria con 120W para el 29 de junio y 222W para el 28 de junio, mientras que el 27 de junio se obtuvo 208W. Esto representa una merma de demanda del 47% con respecto al Caso IPV (228W). El Dormitorio 3 tuvo la mayor demanda energética con 358W de promedio diario, un 39% menos que el caso IPV (584W).

También se analizó la carga térmica de calefacción total de cada día, el Dormitorio 3 fue el de mayor demanda con 8,6KW en el día 28 de junio, seguido por

el Dormitorio 2 con 6,6KW y el Dormitorio 1 con 5,3KW. La carga térmica total de la vivienda para ese día fue de 40,1KW, esto es un 35% menos de demanda energética que el mismo día del caso IPV (62,1KW). La orientación Sur tuvo una carga promedio diaria de 35,7KW, una merma considerable respecto a los 53,5KW del caso IPV.

En el caso del periodo primavera-verano, el Comedor tuvo de mínima 15,4ºC y de máxima 30,6ºC, en el caso IPV la mínima era de 13,7ºC y el máximo 31,7ºC. En el caso de los dormitorios, sus temperaturas mínimas fueron 15,9ºC (Dormitorio 3), seguido por 16,1 (Dormitorio 2) y 16,5ºC (Dormitorio 1). Las temperaturas máximas registraron 27,8ºC (Dormitorio 2), 28ºC (Dormitorio 1) y 28,1ºC (Dormitorio 3). En el Caso IPV los dormitorios oscilaban entre 14ºC de mínima (Dormitorio 3) y 31,5ºC de máxima (Dormitorio 3). En cuanto al análisis de los tres días consecutivos de peores condiciones climáticas, el Dormitorio 2 fue el de menor temperatura con 24,7ºC y se dio en el día 26 de noviembre (0,3ºC menos que el caso IPV) y la temperatura máxima se registró en el Dormitorio 3 con 28ºC el 28 de noviembre (3,5ºC menos que el Caso IPV). Para el Comedor las temperaturas estuvieron entre 25,1ºC el 26 de noviembre (igual que el Caso IPV) y de máxima 30,2ºC el 28 de noviembre (1,5ºC menos que el Caso IPV). Las temperaturas exteriores a la vivienda oscilaron entre 16 ºC (26 de noviembre) y 35,1ºC (28 de noviembre).

En el análisis de la energía auxiliar para enfriamiento de la vivienda del caso Estratégico, el promedio diario mensual del periodo para el Comedor fue de -190,8W (son -91,2W menos de carga térmica de enfriamiento que el caso IPV), mientras que los dormitorios tuvieron de valor promedio de ; -74,8W para el Dormitorio 1 (-114,7W menos que el caso IPV), -46,1W para el Dormitorio 2 (-116,3W menos que el caso IPV) y -49,1W para el Dormitorio 3 (-115,7W menos que el caso IPV). Los valores máximos de carga de enfriamiento oscilaron entre -716,75 en el Dormitorio 3 (esto sería unos -78,45W menos que el caso IPV) y -1251,8W en el Dormitorio 1 (-296W menos que el caso IPV). Para el Comedor la oscilación de las máximas de carga de enfriamiento estuvo entre -1086,1W y -1860W (-40W y -391W menos que el caso IPV).

En cuanto a las cargas de enfriamiento de los días 26 al 28 de noviembre, los valores máximos de los dormitorios oscilaron entre -769,5W que se registró en el Dormitorio 3 (-94,5W menos que caso IPV) y los -905,1W que se registró en el Dormitorio 1 (-164,9W menos que caso IPV), mientras que el Comedor dio entre -1101.2W, el 27 de noviembre (-309,8W menos que el caso IPV), y los -1209W, el día 28 de noviembre (-318W menos que el caso IPV). El menor valor promedio diario del Comedor fue de -403,9W corresponde al 26 de noviembre (-213,1W menos que caso IPV) y el mayor fue de -491W y corresponde al 28 de noviembre (-248W menos que caso IPV). Para los dormitorios el menor promedio fue el Dormitorio 2 con -143,5W (-225,5W menos que caso IPV) y el mayor se dio en el Dormitorio 2 también con -224,8W (-260.2W menos que caso IPV). La carga térmica de enfriamiento promedio total diaria, de cada local de la vivienda, fue de -33,6KW (-21,2KW menos que lo dado en caso IPV). Los valores estuvieron entre el Dormitorio 1 con -7KW (-5,2KW menos que caso IPV) y el Dormitorio 3 con -6,7KW (-5,2KW menos que caso IPV).

Los valores de calor latente y calor especifico obtenidos de las parafinas en la caracterización fueron; para RT18 dio 260,6 J/g de calor latente y 52,52 J/g°C, con R^2=0,93; para RT21 midió 182,82 J/g y 25,92 J/g°C, con R^2=0,85. Ambas parafinas se analizaron térmicamente con Simusol. Para el periodo del 27 al 29 de junio, sin termostato y sin HVAC, solo el PCM RT18 cambio de fase durante los tres días, PCM RT21 llego al cambio de fase al tercer día (29 de junio). En esta configuración comparado con el Caso IPV, aumento la temperatura máxima del recinto unos 4°C los primeros dos días. Cuando activamos el termostato y no el HVAC , las temperaturas del recinto oscilaron entre los 6°C y los 17°C para las paredes con los diferentes PCM. Comparando con el Caso IPV, aumento la temperatura máxima del recinto entre 2°C y 7°C.

Para la configuración de activar HVAC y no el Termostato, las temperaturas oscilaron los primeros dos días entre 8°C y 18°C. El cambio de fase de los PCM fue similar que los anteriores casos. Hubo un aumento de entre 2°C y 5°C de la máxima comparado con el Caso IPV. Si activamos los dos sistemas de control (HVAC y

Termostato), , notamos que la temperatura del recinto oscilo entre los 8ºC y los 15ºC para los días 27 y 28 de junio, mientras que para el 29 de junio aumento hasta los 20ºC (5ºC más que el caso IPV). En cuanto a la potencia aportada promedio de las paredes con PCM. El 27 de junio tuvo un pico máximo de aporte de 640W, el 28 de junio la pared aporto al recinto 610W y finalmente 29 de junio 790W. La pared estuvo aportando potencia al recinto unas 10 hs aproximadamente cada día, esto es gracias al a la acumulación de energía del conjunto ladrillo-PCM-ladrillo.

En cuanto al comportamiento de las paredes con PCM para los días 26 al 28 de noviembre, para la configuración sin HVAC y sin Termostato, todos los PCM cambiaron de fase en los tres días. En el caso del recinto con PCM RT18 la temperatura oscilo entre 20ºC y 35ºC. Para el recinto con PCM RT21 la temperatura estuvo entre 25ºC y 37ºC. El promedio de la amplitud térmica del reciento rondo los 15ºC. Con esta configuración los primeros dos días, la temperatura mínima del recinto bajo 5ºC y la máxima aumento 6ºC con respecto al caso IPV. En el tercer día se dio un aumento de 12ºC lo que da un sobrecalentamiento mayor que los días anteriores. Cuando se activó el termostato y se desactivo el HVAC, los PCM RT18 y RT21 llegaron a la temperatura de cambio de fase los tres días de noviembre. Para los restantes días (27 y 28 de noviembre) estos PCM si llegaron a cambiar de fase. En el caso del recinto con la pared con RT18, la temperatura oscilo entre los 16ºC y 24ºC los tres días. Para el RT21 la temperatura oscilo entre 17ºC y 25,5ºC. En esta configuración, la amplitud térmica del recinto promedio los 8ºC y las temperaturas de recinto estuvieron en la zona de confort.

Cuando se activa el HVAC y no el termostato, la temperatura del recinto oscilo entre 14ºC y 23ºC en el caso del PCM RT18, mientras que para el recinto con RT21 la oscilación fue de 14,5ºC a 24ºC. Con esta configuración del sistema de control, el promedio de la amplitud térmica estuvo en 10ºC y las temperaturas máximas mermaron 6ºC con respecto al caso IPV, lo que la ubicó en la zona de confort. Si activamos ambos sistemas HVAC y Termostato, las temperaturas del recinto oscilaron; para el RT18 entre 11,8ºC y 17,8ºC, el RT21 entre 12ºC y 18,3ºC. Si

bien mermaron en promedio 12ºC las máximas comparado con el caso IPV, las temperaturas de todas las combinaciones de los recintos están muy bajas con respecto a la zona de confort. Las amplitudes térmicas promedios son de 7ºC.

En este periodo, el pico máximo de potencia aportada de la pared del primer día (26 de noviembre) fue de 1110W, seguido por el segundo día (27 de noviembre) con 980W y el tercer día (28 de noviembre) el pico fue 850W. Las horas promedios de aporte de potencia estuvo en 10 horas aproximadamente.

De acuerdo a los resultados del diagrama bioclimático de Givoni, para el Caso IPV, se necesitan un 32,1 % de Calefacción Solar, se está un 26,6 % en Confort Térmico, se necesita también un 22,6 % de Inercia Térmica (Calefacción), un 13,4 % Calefacción Artificial, un 2,9 % de ventilación, un 0,8 % de Ventilación nocturna, Inercia Térmica (Enfriamiento) y de Enfriamiento evaporativo.

Capítulo 7

Conclusiones

El foco de esta tesis es el desarrollo y evaluación termo-energética de nuevos materiales de construcción y dispositivos de colección solar a emplear en la construcción de viviendas de interés social. El objetivo principal de este trabajo es reducir el alto consumo energético de calefacción y de enfriamiento que se registra en el sector, contribuyendo así a disminuir la generación plásticos y de gases de efecto invernadero (GEI) y sus impactos sobre el medio ambiente. Los puntos más destacados y los avances obtenidos en esta tesis son los siguientes:

- *Generación, a partir de datos me teorológicos medidos en la ciudad de Salta, de una base de datos meteorológica horaria para cada día del año bajo el concepto de Año Meteorológico Típico*: Los resultados reflejaron que los métodos elegidos para diseñar el año meteorológico típico surgen de la combinación de los métodos llamados TMY1, TMY2 y CHAN, dicho método se nombró TMYPlus. El método TMY1 se escogió para la elección del TMM para la variable meteorológica de temperatura de bulbo seco, mientras que el método TMY2 fue seleccionado para los TMMs de las variables meteorológicas de temperatura de punto de rocío y velocidad del viento. La radiación solar total diaria sobre plano horizontal estuvo con su factor de ponderación correspondiente al método de CHAN. La combinación de todos estos factores de ponderación forma el TMYPlus. Este año meteorológico típico fue transformado a los formatos *.txt, .xlsx* y *.epw*, .esto permite su utilización en todos los programas de simulación térmica y de generación eléctricas.

- *Diseño y fabricación de un aparato para la medición de las propiedades térmicas:* Se ha desarrollado un equipo que permite medir las propiedades térmicas de hormigones comunes, hormigones con agregados especiales, más precisamente Polietileno de Alta y de Baja Densidad y Perlita como también hormigones celulares con agregados de desechos. Este aparato cumple con las especificaciones técnicas de las normas nacionales IRAM 11559, IRAM 11549 e IRAM 11601 de Argentina. Mediante datos conocidos de propiedades térmicas de

diferentes hormigones, se validaron los resultados del aparato obteniéndose valores dentro del orden +/-2%. El circuito cerrado de la Unidad de Enfriamiento permitió ahorrar al menos 360 litros de fluido por cada ensayo. El bajo consumo eléctrico y peso hacen del aparato de Caja Caliente de fácil traslado. El aparato HD20 será de gran utilidad para realizar STAN, laboratorios de las materias transferencia de calor, Laboratorio de Mediciones, cursos de postgrados de la maestría en energía renovables como Introducción a las transformaciones energéticas y Mediciones e Instrumentación. Con esto se cubre una necesidad que el instituto INENCO y la Universidad Nacional de Salta para la medición de propiedades térmicas de nuevos materiales.

- *Diseño, fabricación y evaluación térmica de bloques de construcción termo-aislantes construidos con materiales reciclados:* La dosificación que cumplió con las normas IRAM fue la MEP_3, esta dio una resistencia a la compresión axial de 50 kg/cm^2, 0,46 W/mK de conductividad térmica y 958 kg/m^3 de densidad (en consecuencia, flotan). Lo siguiente fue desarrollar dos tipos de ladrillos usando la dosificación MEP_3, uno llamado Puma Punku en forma de "H" de 30 cm x 18 cm x 18 cm y otro llamado Punku de forma rectangular de 28 cm x 18 cm x 6 cm. Estos ladrillos por sus propiedades térmicas y edilicias, pueden ser usados en viviendas de hasta dos pisos. Además, son de sencilla fabricación y sus agregados se encuentran en el mercado local. La resistencia térmica del ladrillo Puma Punku nos da 0,60 m^{2}K/W. Algunos de los valores de resistencias térmicas sacados de la norma IRAM 11.601 son: para mampostería de ladrillos y bloques cerámicos usados comúnmente en las viviendas, van desde 0,21 m^{2}K/W a los 0,50 m^{2}K/W. Otra propiedad de importancia es el calor especifico, el mismo dio 850 J/kg °C para la probeta MEP_3.

- *Diseño, fabricación y evaluación térmica de revestimientos termo-aislantes para pisos:* el objetivo era desarrollar baldosas de baja conductividad térmica y buena resistencia a la flexión. Para ello se utilizaron agregados reciclados de EPS y HDPE. Para darle un color firme a toda la mezcla se le agrego un pigmento rojo (ferrite rojo). Se realizaron tres dosificaciones diferentes, las mismas estuvieron bajo ensayos de resistencia a la flexión, ensayo de choque, absorción y

conductividad térmica. Las probetas que cumplieron con todos los ensayos fueron B_2 y B_3, siendo B_2 la que mejor comportamiento tuvo, teniendo 7,64 daN/cm^2 de resistencia a la flexión, 0,72 W/mK de conductividad térmica, 7,4 % de absorción y 1100 kg/m^3 de densidad. En el ensayo de choque las baldosas de agrietaron cuando se les arrojo de una altura de 2,5 metros, una esfera de hierro de 650 gramos. Las dimensiones de las baldosas rojas son de 30 cm x 30 cm x 2 cm. El ferrite rojo usado como pigmento de color en las mezclas se lo puede cambiar por otra gama de colores, ya sea azul, amarillo, etc.

- *Diseño, construcción y evaluación termo-energética de un colector solar calentadores de aire con matriz porosa:* El colector fue instalado en el campus del INENCO (Universidad Nacional de Salta), con orientación Norte y pendiente de 39°. Fue ensayado con flujo forzado a circuito abierto. Los resultados experimentales arrojaron eficiencias promedios diarias de 55 %, 53 % y 44 %, para flujos másicos de aire de 0,027 Kg/s; 0,025 Kg/s y 0,021 Kg/s, respectivamente. El salto térmico medio entre la temperatura del aire de entrada y el aire de salida del colector fue de 19 °C, 27 °C y 33 °C, respectivamente. El prototipo desarrollado fue monitoreado por medio de adquisidores de datos especializados para la complejidad de esta tarea. El colector fue operado a tres velocidades de aire diferentes (1,7; 2,05 y 2,23 m/s). Se encontró que la eficiencia térmica instantánea máxima, para un flujo másico de 0,027 Kg/s (2,23 m/s), es del 70 %, valor muy aceptable y alto para un colector calentador de aire. Para los flujos másicos de 0,025 Kg/s y 0,021 Kg/s (2,03 y 1,7 m/s) la eficiencia térmica instantánea máxima encontrada fue del 68 % y 45 % aproximadamente. Uno de los objetivos principales de este desarrollo tecnológico es el de ser transferido a los organismos públicos relacionados con la construcción de viviendas sociales para disminuir los costos funcionales de calefacción y el consumo de energías convencionales y contaminantes del medio ambiente.

- *Diseño, construcción y evaluación termo-energética de dispositivos de acumulación térmica con materiales de cambio de fase para su inclusión en la construcción de edificios de interés social*: Se analizaron dos tipos de parafinas diferentes para su inclusión como PCM en la vivienda social. Llamadas RT18 y RT21.

Para la implementación del PCM, primero se realizaron las caracterizaciones con el método DSC, donde se obtuvieron los calores latentes y específicos de las parafinas. Los valores de calor latente y calor especifico obtenidos de las parafinas variaron entre 260,6 J/g (RT18) con calor especifico de 52,52 J/g°C, hasta los 171,84 J/g (RT21) con 15,7 J/g°C de calor especifico. Con las parafinas, se simulo, mediante el programa Simusol, el comportamiento térmico de un recinto con una pared formando el conjunto "ladrillo PumaPunku-PCM-ladrillo PumaPunku". Aquí también se dividieron en dos periodos las simulaciones, invierno (27 al 29 de junio) y verano (26 al 28 de noviembre). En cada periodo se introdujeron dos sistemas de control de flujo volumétrico: el HVAC y el termostato. Se realizaron todas combinaciones posibles cuando el sistema este en encendido o apagado (para ambos controles). Se recomienda la configuración de activar HVAC y no el Termostato, en el periodo invernal. Tenemos que en el periodo invernal una potencia aportada promedio es de al menos 610W por las paredes con PCM. La pared estuvo aportando potencia al recinto unas 10 hs aproximadamente cada día, esto es gracias al a la acumulación de energía del conjunto ladrillo-PCM-ladrillo.

En cuanto al comportamiento de las paredes con PCM para los días veránales, se recomienda dos configuraciones, una es si se activa el termostato y se desactivo el HVAC, los PCM. En esta configuración, la amplitud térmica del recinto promedio los 8°C y las temperaturas de recinto estuvieron en la zona de confort. La otra configuración es cuando se activa el HVAC y no el termostato, la temperatura del recinto oscilo entre 14°C y 23°C en el caso del PCM RT18, mientras que para el recinto con RT21 la oscilación fue de 14,5°C a 24°C. Con esta configuración del sistema de control, el promedio de la amplitud térmica estuvo en 10°C y las temperaturas máximas mermaron 6°C con respecto al caso IPV, lo que la ubicó en la zona de confort. En este periodo, la potencia aportada promedio de la pared con PCM es de al menos 850W. Las horas promedios de aporte de potencia estuvo en 10 horas aproximadamente. Se recomienda la parafina RT18 para la época invernal y de verano. Mientras que las demás parafinas se comportaron térmicamente correcto (están en la zona de confort) pero solo en la época de verano.

➢ *Evaluación comparativa, mediante simulación computacional, del comportamiento termo-energético de prototipos de vivienda social con y sin los nuevos materiales de construcción desarrollados:* Se realizó la comparación del comportamiento de las temperaturas interiores de una vivienda, mediante simulación computacional. La vivienda elegida para la simulación, es una vivienda social que entrega anualmente el Instituto de Vivienda de la provincia de Salta (IPV), la cual tiene los materiales convencionales. La simulación se dividió en dos casos: un Caso IPV, es el caso base ingresado al programa SIMEDIF, con las características constructivas convencionales antes mencionadas. Luego el Caso Estratégico, que es el propuesto por el tesista doctoral, donde se simula la vivienda con las siguientes características; la mampostería de ladrillos PumaPunku, material de cambio de fase implementado en los ladrillos PumaPunku, ventanas DVH, implementación del Colector de aire fabricado en esta tesis, orientación optima de la vivienda, etc.

En cuanto a la energía auxiliar de calefacción, el Comedor tuvo promedios diarios entre 487W en el 29 de junio y los 641W del 28 de junio, esto es entre un 30% y 32% menos que el caso IPV. El Dormitorio 1 fue el de menor demanda promedio diaria con 120W para el 29 de junio y 222W para el 28 de junio, mientras que el 27 de junio se obtuvo 208W. Esto representa una merma de demanda del 47% con respecto al Caso IPV (228W). El Dormitorio 3 tuvo la mayor demanda energética con 358W de promedio diario, un 39% menos que el caso IPV (584W). También se analizó la carga térmica de calefacción total de cada día, el Dormitorio 3 fue el de mayor demanda con 8,6KW en el día 28 de junio, seguido por el Dormitorio 2 con 6,6KW y el Dormitorio 1 con 5,3KW. La carga térmica total de la vivienda para ese día fue de 40,1KW, esto es un 35% menos de demanda energética que el mismo día del caso IPV (62,1KW). La orientación Sur tuvo una carga promedio diaria de 35,7KW, una merma considerable respecto a los 53,5KW del caso IPV.

Para el periodo primavera-verano, el Dormitorio 2 fue el de menor temperatura con 24,7°C y se dio en el día 26 de noviembre (0,3°C menos que el caso IPV) y la temperatura máxima se registró en el Dormitorio 3 con 28°C el 28 de noviembre (3,5°C menos que el Caso IPV). Para el Comedor las temperaturas

estuvieron entre 25,1ºC el 26 de noviembre (igual que el Caso IPV) y de máxima 30,2ºC el 28 de noviembre (1,5ºC menos que el Caso IPV). Las temperaturas exteriores a la vivienda oscilaron entre 16 ºC (26 de noviembre) y 35,1ºC (28 de noviembre). En el análisis de la energía auxiliar para enfriamiento de la vivienda del caso Estratégico, el promedio diario mensual del periodo para el Comedor fue de -190,8W (son -91,2W menos de carga térmica de enfriamiento que el caso IPV), mientras que los dormitorios tuvieron de valor promedio de ; -74,8W para el Dormitorio 1 (-114,7W menos que el caso IPV), -46,1W para el Dormitorio 2 (-116,3W menos que el caso IPV) y -49,1W para el Dormitorio 3 (-115,7W menos que el caso IPV). Los valores máximos de carga de enfriamiento oscilaron entre -716,75 en el Dormitorio 3 (esto sería unos -78,45W menos que el caso IPV) y -1251,8W en el Dormitorio 1 (-296W menos que el caso IPV). Para el Comedor la oscilación de las máximas de carga de enfriamiento estuvo entre -1086,1W y -1860W (-40W y -391W menos que el caso IPV).

Finalmente, el trabajo a futuro, se desarrollarán más experimento con la serie de Hormigón Celular, aquí el objetivo fue desarrollar un hormigón liviano con agregados de Neumáticos Triturados Usados (NTU). Para ello se realizarán dosificaciones diferentes, un espumante de bajo costo y abundante en el mercado local y se fabricara una pistola casera generadora de aire. El objetivo a futuro para esta serie es desarrollar una dosificación con más resistencia a la compresión y menor densidad (con esto nos aseguramos la baja conductividad térmica). Lo ideal a futuro, también seria construir un prototipo habitacional con los materiales y tecnologías desarrollados en esta tesis.

ANEXO: Lista de Figuras

Fig. 1.1: Consumo mundial de energía primaria por región (BTU).

Fig. 1.2: Consumo de energía del sector de la construcción (cuatrillones BTU)

Fig. 1.3: Consumo de energía residencial por persona (millones de BTU)

Fig. 1.4: Consumo de energía del sector residencial por combustible (cuatrillones BTU)

Fig. 1.5: Población (millones), PBI (miles de dólares), Intensidad de la Energía (BTU) e Intensidad de Carbono (toneladas métricas de CO_2 por billones BTU)

Fig. 1.6: Emisiones de dióxido de carbono relacionadas con la energía (mil millones de toneladas métricas)

Fig. 1.7: Consumo Final de Energía por Sector (55.687 kTep).

Fig. 1.8: Matriz de Oferta Primaria (kTep) y Matriz de generación eléctrica (kTep)

Fig. 1.9: Porcentajes de desechos en nuestro país.

Fig. 2.1: Detalle del mapa bioambiental de la República Argentina (extracto de la norma IRAM 11603, 1996).

Fig. 2.2: Valores medios mensuales de la temperatura de bulbo seco.

Fig. 2:3 Valores medios mensuales de la radiación solar total horizontal de todos los generadores de TMY.

Fig.2.4: Valores medios mensuales de la temperatura del punto de rocío.

Fig.2.5: Valores horarios medios mensuales horarios de la velocidad del viento.

Fig. 2.7: Valores promedios mensuales del porcentaje de humedad relativa.

Fig. 3.1: Caja caliente de Ghosh

Fig. 3.2: Esquema de placa caliente de Wernery. De arriba hacia abajo: placa fría (azul), muestra de referencia de EPS de conductividad térmica conocida (gris), placa caliente con sección de protección y medición (rojo), manta de goma (gris oscuro), muestra de ladrillo (matriz 4x4), manta de goma (gris oscuro) y placa fría (azul).

Fig. 3.3: Caja caliente con guarda utilizada por Di Maio

Fig. 3.4: Caja Caliente Taurus utilizada por Dalla Santa.

Fig. 3.5: esquema para medir la conductividad térmica de un objeto cilíndrico.
Fig. 3.6: Esquema de la caja caliente construida para probar ensamblajes de pared con VIP
Fig. 3.7: aparato de placa caliente de la UNNE.
Fig.3.8: modos de transferir calor: conducción, convección y radiación.
Fig. 3.9: Difusión de energía debida a la actividad molecular.
Fig. 3.10: ondas reticulares inducidas por el movimiento atómico.
Fig. 3.11: transferencia unidimensional de calor por conducción en una pared (cortesía Incropera).
Fig.3.12.: Esquema del Método de Placa Caliente con Guarda.
Fig. 3.13: a) Placa calefactora central y de guarda. b) Placa de superficie caliente con guarda.
Fig. 3.14: unidad calefactora en el centro y placas de aluminio cubriéndola.
Fig. 3.15: Tanques de acero inoxidable para enfriamiento.
Fig. 3.16: esquema de la unidad de enfriamiento.
Fig. 3.17: Configuración de la aislación lateral y envolvente del aparato HD20.
Fig. 3.18: Termocuplas utilizada en las probetas
Fig. 3.19: a) sistema de control electrónico. b) curva V-I de la unidad calefactora.
Fig. 3.20: Autotransformador que alimenta la Unidad Calefactora.
Fig. 3.21: Apartamiento de la superficie de la probeta respecto de un plano de la placa.
Fig. 3.22: Sistema de obtención de las propiedades térmicas de los materiales.
Fig. 3.23: Intervalo asociado al resultado de una medición.
Fig. 3.24: Influencia de la incertidumbre de una magnitud x en la determinación de la incertidumbre de una magnitud derivada.
Fig. 4.1: Primeras Cisternas Romanas de hormigón.
Fig. 4.2.: Cemento utilizado en esta tesis.
Fig. 4.3: Agregados gruesos y finos provenientes del rio Rosario y utilizados para esta Tesis

Fig. 4.4: Clasificación de los hormigones livianos según el American Concrete Institute (Sánchez, 2015).

Figura 4.5: Partes típicas de un neumático.

Figura 4.6: Proceso de triturado de los neumáticos usados.

Fig. 4.7: Desecho de neumático triturado utilizado en esta tesis.

Fig. 4.8: Tendencia histórica para la gestión y eliminación de desechos plásticos (Geyer, 2017).

Fig. 4.9: A la izquierda el PEBD y ala derecha de color verde el PEAD.

Fig. 4.10: Otro tipo de Polietileno de Baja Densidad reciclado.

Fig. 4.11: Poliestireno Expandido reciclado.

Fig. 4.12: Finos de perlita provenientes de San Antonio de los cobres.

Fig. 4.13: Curva granulométrica del agregado grueso.

Fig. 4.14: Curva granulométrica del agregado fino.

Fig. 4.15: Curvas granulométricas de los ARLINC.

Fig. 4.16: Demanda de agua en función del asentamiento y MF.

Fig. 4.17: Relación agua-cemento vs resistencia a la compresión.

Figura 4.18: a) Balanza para las dosificaciones y b) Hormigonera de 60 litros.

Fig. 4.19: a) Moldes de acero con la mezcla y b) Pileta de curado para las probetas. Fig. 4.20: A la izquierda agregados de ARLINC y a la derecha toma de temperatura.

Fig. 4.21: Mezcla del EPS y Neumático Usado.

Fig 4.22: a) Mezclado con pala a mano de los agregados. b) Luego de 7 minutos de mezclado la pasta esta lista.

Fig. 4.23: Mezcladora casera construida a base de barra de hierro.

Fig. 4.24: Pistola casera construida para generar espuma.

Fig. 4.25: Proceso de mezclado de la serie hormigón celular.

Fig. 4.26: Ingredientes utilizados para la elaboración de la Serie de Baldosas.

Fig. 4.27: Agregados de todos los ingredientes para la realización de la baldosa.

Fig. 4.28: Etapa final de la pasta.

Fig. 4.29: Llenado de los moldes para sus posteriores ensayos.

Fig. 4.30: Ensayo de asentamiento para probetas de Serie Estructural.

Fig. 4.31: Velocidad de exudación de la Serie Estructural.

Fig. 4.32: a) Probeta durante el ensayo de compresión y b) Luego del ensayo.

Fig. 4.33: Resultados de la resistencia a la compresión de la Serie Estructural.

Fig. 4.34: Resultados de las densidades y conductividades térmicas de las dos etapas de ensayos de la Serie Estructural.

Fig. 4.35: Resultados de las dos etapas de ensayos de Tracción y Elasticidad de la Serie Estructural.

Fig. 4.36: Resultados de la resistencia a la compresion de la Serie de Mamposteria.

Fig. 4.37: Resultados de las densidades y la conductividad termica de la Serie de Mamposteria.

Fig. 4.38: a) probetas de desechos plasticos y b) de caucho luego del ensayo.

Fig. 4.39: Moldes de acero y arriba moldes para la conductividad térmica de la serie mampostería.

Fig. 4.40: Curvas de ΔT producto del ensayo de conductividad térmica de las probetas MEP_3 y MEC.

Fig. 4.41: Resultados de la resistencia a la compresion de la Serie de Hormigon Celular.

Fig. 4.42: Densidades y conductividades termicas de la Serie de Hormigon Celular.

Fig. 4.43: a) Probeta antes del ensayo y b) luego del ensayo de compresión de la serie hormigón celular.

Fig. 4.44: Ensayo de la resistencia a la flexión para la Serie de Baldosas.

Fig. 4.45: Resultados de la resistencia a la flexión de la Serie de Baldosas.

Fig. 4.46: Probetas B_3 y B_2 luego del ensayo de resistencia a la flexión.

Fig. 4.47: Resultados de la densidad y la conductividad térmica de la Serie de Baldosas.

Fig. 4.48: a) Caja de arena y b) Esfera de hierro para ensayo de choque.

Fig. 4.49: A la izquierda tenemos la probeta B_2 y a la derecha la probeta B_1.

Fig. 4.50: Grietas producto del ensayo de choque en las baldosas.

Fig. 4.51: Dimensiones del ladrillo Puma Punku.

Fig. 4.52: Llenado de los moldes para los ladrillos Puma Punku.

Fig. 4.53: Corte de una de las partes del ladrillo Puma Punku.

Fig. 4.54: a) Ensayo de flotación y b) Apilado para curado de los ladrillos Puma Punku.

Fig. 4.55: A la izquierda ladrillo Punku y a la derecha ladrillo macizo.

Fig. 4.56: Esquema utilizado para el cálculo de la resistencia térmica del ladrillo.

Fig. 4.57: Muestra del ladrillo colocada en el aparato de Calorimetría.

Fig. 4.58: Sistema de adquisición de datos para la Calorimetría.

Fig. 4.59: Pesaje de la muestra del ladrillo PumaPunku.

Fig. 5.1: Ángulos característicos de la posición del sol y del plano colector (hemisferio Norte).

Fig. 5.2. Irradiancia solar directa sobre superficie horizontal y sobre superficie inclinada.

Fig. 5.3: Ángulos de incidencia y refracción en medios con índices de refracción n_1 y n_2.

Fig. 5.4: Transmisión a través de una cubierta no absorbente.

Figura 5.5: Transmitancia para sistemas de cubiertas no absorbentes con índice de refracción de 1,526.

Figura 5.6: Curvas de transmitancia (considerando absorción y reflexión) de 1, 2, 3 y 4 cubiertas de tres tipos de vidrios.

Fig. 5.7. Ángulo de incidencia efectivo para radiación difusa de cielo y reflejada del suelo sobre superficie inclinada.

Fig. 5.8: Absorción de radiación solar por la placa absorbente bajo el sistema de cubiertas.

Fig. 5.9: Red térmica para un colector de cubierta simple en términos de (a) conducción, convección y radiación; (b) resistencia entre placas; y (c) una red simple del colector.

Fig. 5.10: Tipo de colector solar de aire según el tipo de flujo de aire. (a) Colector solar de paso simple con flujo por debajo de la placa absorbedora; (b) Colector solar de paso simple con flujo por debajo de la cubierta transparente y encima de la placa absorbedora; (c) Colector solar de aire de paso doble con el primer paso entre la cubierta y la placa absorbedora y el segundo paso entre la placa absorbedora y la base del colector.

Fig. 5.11: Tipos de placa absorbedora a) placa absorbedora con aletas longitudinales b) placa absorbedora de matriz porosa.

Fig. 5.12: Colector solar de doble paso con matriz porosa. (a) De flujo paralelo con material poroso arriba del absorbedor, (b) De flujo en contracorriente con material poroso arriba del absorbedor, y (c) flujo en contracorriente con material poroso abajo del absorbedor.

Fig. 5.13: Esquema del colector calentador de aire de matriz porosa.

Fig. 5.14: Esquema de la entrada de aire en el colector.

Fig. 5.15: Caja soporte del colector.

Fig. 5.16: Viruta reciclada distribuida en el colector.

Fig. 5.17: Esquema de la configuración del absorbedor utilizado.

Fig. 5.18: Varillas dentadas remachadas a la placa absorbedora.

Fig. 5.19: Cubierta de policarbonato utilizada, cortesía (López, 2018).

Fig. 5.20: Aislación térmica de poliestireno expandido de alta densidad.

Fig. 5.21: Aislación térmica de espuma de polietileno aluminizada.

Fig. 5.22: Ventilador axial y a la derecha la instalación en el ducto de salida.

Fig. 5.23: Dimmer utilizado para regular velocidad del ventilador axial.

Fig. 5.24: Sombreado de la termocupla de entrada del colector.

Fig. 5.25: Ubicación de las termocuplas en el colector.

Fig. 5.26: a) Solarímetro fotovoltaico y b) Datalogger utilizados para la toma de datos.

Fig. 5.27: Colector en operación y toma de datos de las temperaturas.

Fig. 5.28: Aumento de la temperatura de entrada al colector mediante a) Caloventor y b) Velas de cuarzo. c) Sistema de variación de Potencia.

Fig. 5.29: Colocacion de las termoculplas interiores.

Fig. 5.30: Anemómetro digital de hilo caliente y punta telescópica.

Fig. 5.31: Estación meteorológica DAVIES.

Fig. 5.32: Valores de irradiancia solar global, G_p y de temperatura ambiente, T_a para los días 1,6 y 8 de junio.

Fig. 5.33: Valores de irradiancia solar global, G_p y de temperatura ambiente, T_a para los días 13,15 y 30 de junio.

Fig. 5.34: Valores de irradiancia solar global, G_p y de temperatura ambiente, T_a para los días 1, 7, 12, 15, 19, 26 y 27 de julio.

Fig. 5.35: Valores de irradiancia solar global, G_p y de temperatura ambiente, T_a para los días 1, 2, 18 y 19 de agosto con un flujo másico de 0,027 kg/s.

Fig. 5.36: Evolución temporal de las temperaturas de entrada, T_{fi}, y salida, T_{fo}, del colector. Con un flujo másico de 0,021 Kg/s.

Fig. 5.37: Evolución temporal del segundo periodo de las temperaturas de entrada, Tfi, y salida, Tfo, del colector. Con un flujo másico de 0,025 Kg/s.

Fig. 5.38: Evolución temporal del tercer periodo de las temperaturas de entrada, Tfi, y salida, Tfo, del colector. Con un flujo másico de 0,027 Kg/s.

Fig. 5.39. Valores medidos de energía útil, Qu, producida por el colector y de irradiancia solar global, Gp, sobre el plano del colector para el primer periodo. Con un flujo másico de 0,021 Kg/s.

Fig. 5.40. Valores medidos de energía útil, Qu, producida por el colector y de irradiancia solar global, Gp, sobre el plano del colector para el segundo periodo. Con un flujo másico de 0,025 Kg/s.

Fig. 5.41.: Valores medidos de energía útil, Qu, producida por el colector y de irradiancia solar global, Gp, sobre el plano del colector para el tercer periodo. Con un flujo másico de 0,027 Kg/s.

Fig. 5.42: colector calefaccionando el prototipo habitacional.

Fig. 5.43: Evolución de las temperaturas del colector y del prototipo habitacional.

Fig. 5.44: Comparación entre la energía disponible y la energía generada por el colector, correspondiente a un flujo másico de 0,021 Kg/s Fig. 5.45: Comparación entre la energía disponible y la energía generada por el colector, correspondiente a un flujo másico de 0,025 Kg/s.

Fig. 5.46: Comparación entre la energía disponible y la energía generada por el colector, correspondiente a un flujo másico de 0,027 Kg/s.

Fig. 5.47: Mediciones de un día totalmente nublado y ubicación de las termocuplas.

Fig. 5.48: Evolución de la temperatura del aire dentro del colector. Para un flujo másico de 0,027 Kg/s.

Fig. 5.49: Curva de eficiencia instantánea del colector cuña de malla porosa para el flujo másico de 0,021 Kg/s.

Fig. 5.50: Curva de eficiencia instantánea del colector cuña de malla porosa para el flujo másico de 0,025 Kg/s.

Fig. 5.51: Curva de eficiencia instantánea del colector cuña de malla porosa para el flujo másico de 0,027 Kg/s.

Fig. 6.1: Balance térmico de un ambiente térmico donde esta una persona interactuando. Fuente: www.dspace.uazuay.edu.ec

Fig. 6.2: Confort: balance energético del cuerpo humano.

Fig. 6.3: Diagrama general de Givoni

Fig. 6.4: Diagrama de cálculo de la temperatura efectiva y temperatura efectiva corregida.

Fig. 6.5: Temperaturas máximas y mínimas absolutas (TMAA, TMIA); temperaturas máximas y mínimas medias (TMAM, TMIN) y temperatura media (TM).

Fig. 6.6: Recepción y emisión de radiación en superficie, adaptado de http://www.esi.unav.es/asignaturas/ecologia/Hipertexto/10CAtm1/353BalEn.htm

Fig. 6.7: Balance de radiación (promedio): Adaptado de Andrew P. Ingersoll, "La atmósfera", Investigación y Ciencia, Temas 12.

Fig. 6.8: Humedad relativa y precipitaciones mensuales para Salta capital. Fuente: adaptación a partir del SMN periodo 1991-2020.

Fig. 6.9: Direcciones predominantes y velocidades del viento para Salta Capital. Fuente: Estadísticas del viento y del tiempo Aeropuerto Internacional de Salta Martín Miguel de Güemes - Windfinder (2006-2020).

Fig. 6.10: Frecuencia de las velocidades del viento para la ciudad de Salta capital. Fuente: Estadísticas del viento y del tiempo Aeropuerto Internacional de Salta Martín Miguel de Güemes - Windfinder (2006-2020).

Fig. 6.11: Algunos materiales aislantes existentes en el mercado:

Fig. 6.12: Ejemplos de K de diversos muros. Fuente: (Esteves, 2017).

Fig. 6.13: Escuela de Algarrobo del Águila, La Pampa.

Fig. 6.14: Construcción de un hospital con pared de doble muro y aislación central. Fuente: (Hernández, 2010)

Fig. 6.15: Ejemplos de K de diversos techos. Fuente (Esteves, 2017).

Fig. 6.16: ventanas con simple, doble y triple vidriado.

Fig. 6.17: Ganancias y pérdidas en un edificio.

Fig. 6.18: Esquema que plantea el uso de energía disponible y la demanda.

Fig. 6.19: Irregularidades en la disponibilidad de energía solar.

Fig. 6.20: Mampostería de ladrillo PumaPunku con la implementación de PCM.

6.21: Curva representativa del calor especifico del PCM RT25.

Fig. 6.22: Variación on-off del parámetro θ_m

Fig. 6.23: Gráfica de calor latente obtenida de MDSC y la regresión gaussiana.

Fig. 6.24: HVAC: configuración de flujo de aire volumétrico de extracción: a la izquierda solo activado termostato y a la derecha activado HVAC y termostato.

Fig. 6.25: Esquema del recinto considerado para el análisis térmico.

Fig. 6.26: Circuito térmico del ladrillo.

Fig. 6.27: Cuadros de diálogos y tablas empleadas en la programación.

Fig. 6.28: Tablas con datos climáticos ingresados en la interfase Dia, correspondientes a los días 26 al 28 de noviembre y del 27 al 29 de junio.

Fig. 6.29: Izq.) Vista en planta de la vivienda analizada y Der.) Vista en corte de la vivienda (Ruiz López, 2021).

Fig. 6.30: Movimiento aparente del sol sobre la esfera celeste.

Fig.6.30: Evolución de la temperatura exterior del periodo otoño-invierno.

Fig. 6.31: Evolución de la temperatura de la vivienda del periodo otoño-invierno del Caso IPV Sur.

Fig. 6.32: Evolución de la temperatura de la vivienda del periodo otoño-invierno del Caso IPV Oeste.

Fig. 6.33: Evolución de la temperatura de los días 27 al 29 de junio del Caso IPV Sur.

Fig. 6.34: Evolución de la temperatura de los días 27 al 29 de junio del Caso IPV Oeste.

Fig. 6.35: Evolución de la temperatura de la vivienda del periodo otoño-invierno del Caso IPV Norte.

Fig. 6.36: Evolución de la temperatura de la vivienda del periodo otoño-invierno del Caso IPV Este.

Fig. 6.37: Evolución de la temperatura de los días 27 al 29 de junio del Caso IPV Norte.

Fig. 6.38: Evolución de la temperatura de los días 27 al 29 de junio del Caso IPV Este.

Fig. 6.39: Demanda de Energía auxiliar del periodo otoño-invierno para el Caso IPV Sur.

Fig. 6.40: Demanda de Energía auxiliar del periodo otoño-invierno para el Caso IPV Oeste.

Fig. 6.41: Demanda de Energía auxiliar de los días 27 al 29 de junio para el Caso IPV Sur.

Fig. 6.42: Demanda de Energía auxiliar de los días 27 al 29 de junio para el Caso IPV Oeste.

Fig. 6.43: Demanda de Energía auxiliar del periodo otoño-invierno para el Caso IPV Norte.

Fig. 6.44: Demanda de Energía auxiliar del periodo otoño-invierno para el Caso IPV Este.
Fig. 6.45: Demanda de Energía auxiliar de los días 27 al 29 de junio para el Caso IPV Norte.
Fig. 6.46: Demanda de Energía auxiliar de los días 27 al 29 de junio para el Caso IPV Este.
Fig. 6.47: Evolución de la temperatura de la vivienda del periodo otoño-invierno del Caso Estratégico Sur.
Fig. 6.48: Evolución de la temperatura de los días 27 al 29 de junio del Caso Estratégico Sur.
Fig. 6.49: Evolución de la temperatura de la vivienda del periodo otoño-invierno del Caso Estratégico Oeste.
Fig. 6.50: Evolución de la temperatura de los días 27 al 29 de junio del Caso Estratégico Oeste.
Fig. 6.51: Evolución de la temperatura de la vivienda del periodo otoño-invierno del Caso Estratégico Norte.
Fig. 6.52: Evolución de la temperatura de los días 27 al 29 de junio del Caso Estratégico Norte.
Fig. 6.53: Evolución de la temperatura de la vivienda del periodo otoño-invierno del Caso Estratégico Este.
Fig. 6.54: Evolución de la temperatura de los días 27 al 29 de junio del Caso Estratégico Este.
Fig. 6.55: Demanda de Energía auxiliar del periodo otoño-invierno para el Caso Estratégico Sur.
Fig. 6.56: Demanda de Energía auxiliar del periodo otoño-invierno para el Caso Estratégico Oeste.
Fig. 6.57: Demanda de Energía auxiliar del periodo otoño-invierno para el Caso Estratégico Norte.
Fig. 6.58: Demanda de Energía auxiliar del periodo otoño-invierno para el Caso Estratégico Este.

Fig. 6.59: Demanda de Energía auxiliar de los días 27 al 29 de junio para el Caso Estratégico Sur.
Fig. 6.60: Demanda de Energía auxiliar de los días 27 al 29 de junio para el Caso Estratégico Oeste.
Fig. 6.61: Demanda de Energía auxiliar de los días 27 al 29 de junio para el Caso Estratégico Norte.
Fig. 6.62: Demanda de Energía auxiliar de los días 27 al 29 de junio para el Caso Estratégico Este.
Fig. 6.63: Evolución de la temperatura exterior para el periodo primavera-verano.
Fig. 6.64: Evolución de la temperatura de la vivienda del periodo primavera-verano del Caso IPV Sur.
Fig. 6.65: Evolución de la temperatura de los días 26 al 28 de noviembre del Caso IPV Sur.
Fig. 6.66: Evolución de la temperatura de la vivienda del periodo primavera-verano del Caso IPV Oeste.
Fig. 6.67: Evolución de la temperatura de los días 26 al 28 de noviembre del Caso IPV Oeste.
Fig. 6.68: Evolución de la temperatura de la vivienda del periodo primavera-verano del Caso IPV Norte.
Fig. 6.69: Evolución de la temperatura de los días 26 al 28 de noviembre del Caso IPV Norte.
Fig. 6.70: Evolución de la temperatura de la vivienda del periodo primavera-verano del Caso IPV Este.
Fig. 6.71: Evolución de la temperatura de los días 26 al 28 de noviembre del Caso IPV Este.
Fig. 6.72: Demanda de Energía auxiliar del periodo primavera-verano para el Caso IPV Sur.
Fig. 6.73: Demanda de Energía auxiliar del periodo primavera-verano para el Caso IPV Oeste.

Fig. 6.74: Demanda de Energía auxiliar de los días 26 al 28 de noviembre para el Caso IPV Sur.

Fig. 6.75: Demanda de Energía auxiliar de los días 26 al 28 de noviembre para el Caso IPV Oeste.

Fig. 6.76: Demanda de Energía auxiliar del periodo primavera-verano para el Caso IPV Norte.

Fig. 6.77: Demanda de Energía auxiliar del periodo primavera-verano para el Caso IPV Este.

Fig. 6.78: Demanda de Energía auxiliar de los días 26 al 28 de noviembre para el Caso IPV Norte.

Fig. 6.79: Demanda de Energía auxiliar de los días 26 al 28 de noviembre para el Caso IPV Este.

Fig. 6.80: Evolución de la temperatura exterior a la vivienda del periodo primavera-verano.

Fig. 6.81: Evolución de la temperatura de la vivienda del periodo primavera-verano del Caso Estratégico Sur.

Fig. 6.82: Evolución de la temperatura de la vivienda del periodo primavera-verano del Caso Estratégico Oeste.

Fig. 6.83: Evolución de la temperatura de la vivienda del periodo primavera-verano del Caso Estratégico Norte.

Fig. 6.84: Evolución de la temperatura de la vivienda del periodo primavera-verano del Caso Estratégico Este.

Fig. 6.85: Evolución de la temperatura de los días 26 al 28 de noviembre del Caso Estratégico Sur.

Fig. 6.86: Evolución de la temperatura de los días 26 al 28 de noviembre del Caso Estratégico Oeste.

Fig. 6.87: Evolución de la temperatura de los días 26 al 28 de noviembre del Caso Estratégico Norte.

Fig. 6.88: Evolución de la temperatura de los días 26 al 28 de noviembre del Caso Estratégico Este.

Fig. 6.89: Demanda de Energía auxiliar del periodo primavera-verano para el Caso Estratégico Sur.
Fig. 6.90: Demanda de Energía auxiliar del periodo primavera-verano para el Caso Estratégico Oeste.
Fig. 6.91: Demanda de Energía auxiliar del periodo primavera-verano para el Caso Estratégico Norte.
Fig. 6.92: Demanda de Energía auxiliar del periodo primavera-verano para el Caso Estratégico Este.
Fig. 6.93: Demanda de Energía auxiliar de los días 26 al 28 de noviembre para el Caso Estratégico Sur.
Fig. 6.94: Demanda de Energía auxiliar de los días 26 al 28 de noviembre para el Caso Estratégico Oeste.
Fig. 6.95: Demanda de Energía auxiliar de los días 26 al 28 de noviembre para el Caso Estratégico Norte.
Fig. 6.96: Demanda de Energía auxiliar de los días 26 al 28 de noviembre para el Caso Estratégico Este.
Fig. 6.97: A la izq. La curva representativa de la potencia de calor latente y a la der. el calor especifico de RT18 (Dellicompagni, 2020).
Fig. 6.98: A la izq. La curva representativa de la potencia de calor latente y a la der. el calor especifico de RT21.
Fig. 6.99: A la izq. La curva representativa de la potencia de calor latente y a la der. el calor especifico de RT25.
Fig. 6.100: A la izq. La curva representativa de la potencia de calor latente y a la der. el calor especifico de RT28.
Fig. 6.101: A la izq. La curva representativa de la potencia de calor latente y a la der. el calor especifico de RT31.
Fig. 6.102: A la izq. La curva representativa de la potencia de calor latente y a la der. el calor especifico de RT35.
Fig.:6.103: Evolución de la temperatura ambiente y del comedor para los días 27 al 29 de junio.

Fig. 6.104: Evolución de las temperaturas del recinto y de los seis PCM: sin HVAC y sin termostato.
Fig. 6.105: Evolución de las temperaturas del recinto y de los seis PCM: sin HVAC y con termostato.
Fig. 6.106: Evolución de las temperaturas del recinto y de los seis PCM: con HVAC y sin Termostato.
Fig. 6.107: Evolución de las temperaturas del recinto y de los seis PCM: con HVAC y con Termostato.
Fig. 6.108: potencia aportada por la pared con PCM hacia el recinto.
Fig. 6.109: Evolución de la temperatura ambiente y del Comedor del Caso IPV para los días 26 al 28 de noviembre.
Fig. 6.110: Evolución de las temperaturas del recinto y de los seis PCM: sin HVAC y sin Termostato.
Fig. 6.111: Evolución de las temperaturas del recinto y de los seis PCM: sin HVAC y con Termostato.
Fig. 6.112: Potencia promedio aportada por la pared con PCM al recinto, en el periodo de verano.
Fig. 6.113: Evolución de las temperaturas del recinto y de los seis PCM: con HVAC y sin Termostato.
Fig. 6.114: Evolución de las temperaturas del recinto y de los seis PCM: con HVAC y con Termostato.
Fig. 6.115: Evolución de la temperatura de bulbo seco anual y de la humedad relativa anual.
Fig. 6.116: Diagrama bioclimático para la Ciudad de Salta, resultado de la simulación.
Fig. 6.117: Estrategias bioclimáticas del programa ABC.

ANEXO: Lista de Tablas

Tabla. 2.1: Ciudades del Litoral con TMY

Tabla 2.2: Conjuntos de factores de ponderación para varios índices climáticos.

Tabla 2.3: estadísticas de Finkelstein-Schafer de enero a mayo del 2006.

Tabla 2.4: suma ponderada para cada índice climático de enero 2006.

Tabla 2.5: Índices WS de todos los eneros correspondientes a los años de muestra para los cinco diferentes tipos de generadores de TMY.

Tabla 2.6: Índices WS de todos los febreros correspondientes a los años de muestra para los cinco diferentes tipos de generadores de TMY.

Tabla 2.7: Índices WS de todos los marzos correspondientes a los años de muestra para los cinco diferentes tipos de generadores de TMY.

Tabla 2.8: Índices WS de todos los abriles correspondientes a los años de muestra para los cinco diferentes tipos de generadores de TMY.

Tabla 2.9: Índices WS de todos los mayos correspondientes a los años de muestra para los cinco diferentes tipos de generadores de TMY.

Tabla 2.10: Índices WS de todos los junios correspondientes a los años de muestra para los cinco diferentes tipos de generadores de TMY.

Tabla 2.11: Índices WS de todos los julios correspondientes a los años de muestra para los cinco diferentes tipos de generadores de TMY.

Tabla 2.12: Índices WS de todos los agostos correspondientes a los años de muestra para los cinco diferentes tipos de generadores de TMY.

Tabla 2.13: Índices WS de todos los setiembres correspondientes a los años de muestra para los cinco diferentes tipos de generadores de TMY.

Tabla 2.14: Índices WS de todos los octubres correspondientes a los años de muestra para los cinco diferentes tipos de generadores de TMY.

Tabla 2.15: Índices WS de todos los noviembres correspondientes a los años de muestra para los cinco diferentes tipos de generadores de TMY.

Tabla 2.16: Índices WS de todos los diciembres correspondientes a los años de muestra para los cinco diferentes tipos de generadores de TMY.

Tabla 2.17: error de desviación medio y el error cuadrático medio de los índices climáticos para los 5 generadores de TMY.
Tabla 2.18: Meses Meteorológicos Típicos con sus años correspondientes.
Tabla 3.2: Conductividad térmica para diferentes materiales (IRAM 11601, 2002)
Tabla 3.3: Propiedades térmicas obtenidas con el aparato HD20.
Tabla 3.4: Características generales del aparato HD20.
Tabla 4.1: Composición y tipo de cemento.
Tabla 4.2: Requisitos de las Normas para el Cemento.
Fig. 4.3: Agregados gruesos y finos provenientes del rio Rosario y utilizados para esta Tesis
Tabla 4.4: composición promedio de un neumático en % del peso.
Tabla 4.5: Propiedades físicas de los finos de perlita.
Tabla 4.6: Propiedades Químicas de los finos de Perlita
Tabla 4.7: Propiedades físicas del agregado grueso.
Tabla 4.8: Resultados de los ensayos con los tamices para el agregado grueso.
Tabla 4.9: Resultados de los ensayos con los tamices para el agregado fino.
Tabla 4.10: Propiedades físicas del agregado fino.
Tabla 4.11: Propiedades físicas de los agregados plásticos.
Tabla 4.12: Ámbitos de consistencia, asentamiento y métodos de compactación, extractados del Reglamento CIRSOC 201.
Tabla 4.13: Relaciones para el uso de los tamaños máximos de los agregados.
Tabla 4.14: Tipos de aditivos para las mezclas clementicas.
Tabla 4.15: Tabla resumen de los cálculos.
Tabla 4.16: tipo de series, tipo de agregado reciclado usado y nomenclatura.
Tabla 4.17: Dosificaciones de la primera prueba (serie estructural).
Tabla 4.18: Dosificaciones de la segunda prueba (serie estructural).
Tabla 4.19: Dosificaciones de la serie mampostería.
Tabla 4.20: Dosificaciones de la serie de hormigón celular.
Tabla 4.21: Dosificaciones de la serie de baldosas.

Tabla 4.22: Resultado de los asentamientos y capacidad de exudación de la serie estructural.
Tabla 4.23: resultado de los asentamientos de la Serie Mampostería.
Tabla 4.24: resultado de los asentamientos de la Serie de Baldosas.
Tabla 4.25: Resultados de la resistencia a la compresión y conductividad para la primera Serie Estructural.
Tabla 4.26: Ensayos de compresión axial de la segunda etapa de la Serie Estructural.
Tabla 4.27: Ensayos de tracción por compresión diametral y módulo de elasticidad de la primera etapa de la serie estructural.
Tabla 4.28: Ensayos de tracción por compresión diametral y módulo de elasticidad de la segunda etapa de serie estructural
Tabla 4.29: Resultados de los ensayos en las probetas de la serie mampostería.
Tabla 4.30: Resultados de los ensayos para la serie hormigón celular.
Tabla 4.31: Resultados de los ensayos sobre la Serie de Baldosas.
Tabla 4.32: Valores de las propiedades de cada sección del ladrillo Puma Punku.
Tabla 4.33: Resistencia térmica de mampostería de ladrillos y bloques cerámicos
Tabla 5.1: Índice de refracción promedio (n) en el espectro solar para algunos materiales.
Tabla 5.2: Tipo de colector solar de aire según número de cubiertas transparentes. a) colector de cubierta simple, b) colector de cubierta doble.
Tabla 5.3: Días de ensayo del colector en el invierno de 2022.
Tabla 5.4: Periodo de medición según la velocidad de aire circundante.
Tabla 5.5: Posiciones del Dimmer en el circuito de calentamiento auxiliar del aire durante los ensayos.
Tabla 5.6: Eficiencia diaria del colector en porcentajes para los 3 periodos de monitoreo.
Tabla 6.1: Nivel de metabolismo en función de la tarea realizada.
Tabla 6.2: Resistencia térmica del nivel de vestimenta para distintas situaciones.

Tabla 6.3: temperaturas operativas en diferentes situaciones y su variación posible para el 80% de personas en confort.

Tabla 6.4: Resistencias térmicas superficiales en m^2 ºC/W. Fuente: IRAM 11601.

Tabla 6.5: Materiales aislantes, conductividad térmica y temperatura máxima de trabajo. Fuente: norma IRAM 11601, (Roaf et al., 2003) y (European Commision, 2010).

Tabla 6.6: Valores de resistencia térmica de cámaras de aire R_{ca}

Tabla 6.7: Conductancia térmica de ventanas. Adaptado de (Goulding et al., 1994)

Tabla 6.8: Comparación de los diferentes tipos de materiales de cambio de fase.

Tabla 6.9: Valores de los coeficientes a, b, c y d obtenidos de la caracterización.

Tabla 6.10: Propiedades térmicas de los materiales de muros y techos requeridos para la simulación del Caso IPV.

Tabla 6.11: Coeficiente convectivo exterior y Temperatura de confort adaptadas para la simulación de los periodos.

Tabla 6.12: Locales y características de las zonas térmicas usados en los casos de estudio.

Tabla 6.13: Números de renovaciones de aire por cada local. Fuente: IRAM 11604.

Tabla 6.14: Propiedades térmicas de los materiales de muros y techos requeridos para la simulación del Caso Estratégico.

Tabla 6.16: Temperaturas medias de los locales interiores y las amplitudes térmicas correspondientes al Caso IPV Sur y Oeste.

Tabla 6.17: Temperaturas medias de los locales interiores y las amplitudes térmicas correspondientes al Caso IPV Norte y Este.

Tabla 6.18: Carga térmica de calefacción en KW requerida en cada uno de los locales, según la orientación correspondiente al periodo otoño-invierno del caso IPV, para mantener la temperatura interior entre 18 ºC y 22,1°C.

Tabla 6.19: Grados día mensual del periodo otoño-invierno.

Tabla 6.20: Temperaturas medias y amplitudes térmicas Caso Estratégico Orientación sur.

Tabla 6.21: Temperaturas medias y amplitudes térmicas Caso Estratégico Orientación Oeste.

Tabla 6.22: Temperaturas medias y amplitudes térmicas Caso Estratégico Orientación Norte.

Tabla 6.23: Temperaturas medias de los locales interiores y las amplitudes térmicas correspondientes al Caso Estratégico Este.

Tabla 6.24: Carga térmica de calefacción en KW, del Caso Estratégico, requerida en cada uno de los locales según las orientaciones Sur y Oeste, para mantener la temperatura interior en el intervalo de confort.

Tabla 6.25: Carga térmica de calefacción en KW, del Caso Estratégico, requerida en cada uno de los locales según las orientaciones Norte y Este, para mantener la temperatura interior en el intervalo de confort.

Tabla 6.26: Temperaturas medias de los locales interiores y las amplitudes térmicas correspondientes al Caso IPV primavera verano.

Tabla 6.27: Carga térmica de enfriamiento en KW del periodo primavera verano del Caso IPV, requerida en cada uno de los locales según la orientación correspondiente, para mantener la temperatura interior en el intervalo de confort.

Tabla 6.28: Temperaturas medias de los locales interiores y las amplitudes térmicas correspondientes a los días 26 al 28 de noviembre del Caso Estratégico primavera verano.

Tabla 6.29: Carga térmica de enfriamiento en KW del periodo primavera verano del Caso Estratégico, requerida en cada uno de los locales según la orientación correspondiente, para mantener la temperatura interior entre 18 ºC y 24,4°C en los días 26 al 28 de noviembre.

ANEXO: Publicaciones

Diaz A., HD20: Aparato de placa caliente con guarda para la medición de las propiedades de transferencia de calor por conducción en hormigones. Energías Renovables y Medio Ambiente Vol. 47, pp. 49- 57, 2021 ISSN en línea: 2684-0073 / ISSN impreso: 0328-932.

Diaz Andres Emanuel, Judith Franco, 2018. Destilador Multietapa con Acumulador de Calor por Cambio de Fase. Editorial Académica Española, Libro ISSN 978-620-2-11011-2.

Díaz Andrés Emanuel; franco Judith. análisis de un sistema de acumulación de calor con cambio de fase para un destilador multietapa. Argentina. Mendoza. 2015. Libro. Artículo Completo. Congreso. XXXVIII Reunión de Trabajo de la Asociación Argentina de Energías Renovables y Medio Ambiente. Facultad Regional San Rafael Universidad Tecnológica Nacional.

Tilca F.; Díaz Andrés Emanuel: experiencias en proyectos de extensión de energías renovables en salta. Argentina. La Plata. 2016. Libro. Artículo Completo. Congreso. XXXIX Reunión de Trabajo de la Asociación Argentina de Energías Renovables y Medio Ambiente. Facultad de Arquitectura y Urbanismo de la Universidad Nacional de La Plata.

Díaz Andrés Emanuel; Hernández Alejandro l. . Diseño del año meteorológico típico para la ciudad de salta capital. Argentina. Salta capital. 2017. Libro. Artículo Completo. Congreso. XL Reunión de Trabajo de la Asociación Argentina de Energías Renovables y Ambiente. Afianzando hábitats resilientes y sustentables. Facultad de Arquitectura, Urbanismo y Diseño de la Universidad Nacional de San Juan.

Díaz Andrés Emanuel; Hernández Alejandro l.. Ensayos destructivos de mezclas de concreto con desechos plásticos y perlita cruda en Perú. Perú. Lima. 2018. Revista. Artículo Completo. Simposio. XXV Simposio Peruano de Energía Solar y del Ambiente-APES. La Asociación Peruana de Energía Solar y del Ambiente (APES).

Quiñones J.; Díaz Andrés Emanuel. Automatización de un colector solar calentador de aire. Argentina. Jujuy. 2019. Libro. Artículo Completo. Congreso. XLII Reunión de Trabajo de la Asociación Argentina de Energías Renovables y Medio Ambiente. Facultad de Ingeniería de la Universidad Nacional de Jujuy.

Díaz Andrés Emanuel; Hernández Alejandro l.. Construcción de un equipo térmico aplicando el método de la placa caliente con guarda. Argentina.

Jujuy. 2022. Libro. Artículo Completo. Congreso. XLII Reunión de Trabajo de la Asociación Argentina de Energías Renovables y Medio Ambiente. Facultad de Ingeniería de la Universidad Nacional de Jujuy.

Díaz Andrés Emanuel; Hernández Alejandro L.. Apparatus for measuring the properties of heat transfer by conduction in specials concrete. Brasil. Itajubá. 2022. Revista. Artículo Completo. Congreso. ARCT - Advances in Renewable and Clean Energy Technologies. Federal University of Itajubá (UNIFEI) and Northumbria University (NU).

Díaz andres Emanuel; Hernández Alejandro L.. Aplicación del TMYPlus a la ciudad de Salta para dimensionar el consumo energético de las viviendas sociales. Londres: Dodo Books Indian Ocean Ltd.. 2022. pag.129. ISBN 978-620-2-10314-5.

Díaz Andrés Emanuel; Hernández Alejandro L.. TMYPlus: Typical Meteorological Year for thermal application design: Application of TMYPlus to the city of Salta for sizing the energy consumption of social housing. 120 High Road, East Finchley, London: ScienciaScripts. 2023. pag.132. ISBN 978-620-5-59346-2.

Diaz Andres Emanuel; Hernández Alejandro l.. diseño del año meteorológico tipico para la ciudad de salta capital. Avances en Energías Renovables y Medio Ambiente - AVERMA. San Rafael-Mendoza: Asociación Argentina de Energías Renovables y Medio Ambiente. 2017 vol.21 n°. p1 - 13. ISSN 2314-1433. e ISSN 2796-8111.

Díaz Andrés Emanuel; Hernández Alejandro l.. Ensayo de dosificaciones para bloques, ladrillos y contrapisos de hormigón con desechos plásticos y finos de perlitas. Avances en Energías Renovables y Medio Ambiente - AVERMA. Córdoba: Asociación Argentina de Energías Renovables y Medio Ambiente. 2018 vol.22 n°. p71 - 82. ISSN 2314-1433. e ISSN 2796-8111.

Díaz Andrés Emanuel; Hernández Alejandro l.. HD20: aparato de placa caliente con guarda para la medición de las propiedades de transferencia de calor por conducción en hormigones. Energías Renovables y Medio Ambiente. Buenos Aires: Asociación Argentina de Energías Renovables y Ambiente. 2021 vol.47 n°. p49 - 57. ISSN 0328-932X.

Díaz Andrés Emanuel; Hernández Alejandro l.; Di Lalla Nicolás. Colector solar de alta eficiencia con matriz porosa reciclada. Energías Renovables y Medio Ambiente. Catamarca: Asociación Argentina de Energías Renovables y Ambiente. 2022 vol.49 n°. p21 - 29. ISSN 0328-932X. e ISSN 2684-0073.

ANEXO: Bibliografía

Abrams 1986, Stein B. y Reynolds J.S. "Mechanical and Electrical Equipment for Buildings". Wiley. 1992.

Albano, C., et al., Influence of content and particle size of waste pet bottles on concrete behavior at different w / c ratios. Waste Management, 2009. 29 (10): p. 2707-2716.

Arkin D. 2006. Towards a Sustainable Future. Homebuilding Review, N° 179, 2006.

ASHRAE, Handbook Fundamentals, Chapter 24, American Society of Heating Refrigerating and Air-Conditioning Engineers, 1989.

ASHRAE, International Weather for Energy Calculations (IWEC Weather Files) User's Manual, Version 1.1, 2002.

Attia S., de Herde A. 2009. Designing the Malquaf for Summer Cooling in Low-Rise Housing an Experimental Study. PLEA 2009 - 26th Conference on Passive and Low Energy Architecture, Quebec, Canada.

Balcomb J. D., Barley D., McFarland R., Perry J., Wray W. and Noll S. 1982. Passive Solar Design Handbook Vol. 1,2. United States Department of Energy.

Baldwin C., Cruickshank C., 2015. Comparison of steady-state and in-situ testing of high thermal resistance walls incorporating vacuum insulation panels. Energy Procedia 78, 3246-3251.

Bartoletti M. 1981. Gufa Practica del Aislamiento Térmico. Ed. Everest. Madrid.

Behling S. y Behling S. 2002. Solar power - La evolución de la arquitectura sostenible. Ed. Gustavo Gili. Barcelona.

Boschi, C. 2006. Determinación de Resistencia acústica de muro de bloques de hormigón rellenos con arena. Informe UTN 09/06.

Cabeza, A. Castell, C. Barreneche, A. de Gracia, A.I. Fernández, Materials used as PCM in thermal energy storage in buildings: a review, Renew. Sustain. Energy Rev. 15 (2011) 1675e1695.

Cadena, C. (2003). La Cocina Solar: aplicaciones comunales y productos. Tesis Doctoral

Canton M.A., Cortegoso J.L., Mesa N.A., de Rosa C. 2001. Sustentabilidad energética del parquet edilicio en entornos urbanos forestados. Análisis de la disponibilidad del recurse solar en la estación fría. AVERMA Vol. 5, Secc. 01, pp.27-32. Salta.

Carbonaro C., Cascone Y., 2015. Energy assessment of a PCM – embedded plaster: embodied energy versus operational energy. Energy Procedia 78, 3210-3215.

Chan A., Generation of typical meteorological years using genetic algorithm for different energy systems, ELSEVIER Renewable Energy 90 (2016) 1e13.

Chaudhary, M., Srivastava V., and Agarwal V., Effect of waste low density polyethylene on mechanical properties of concrete. Journal of Academia and Industrial Research (JAIR) Volume, 2014. 3: p. 123-126.

Chen, H.S. Ling, Z.Q. Zhai, Y. Li, F.G. Yang, F.T. Han, S. Wei, Thermal performance of an active-passive ventilation wall with phase change material in solar greenhouses, Appl. Energy 216 (2018) 602–612.

Choi, Y.-W., et al., Effects of waste PET bottles aggregate on the properties of concrete. Cement and Concrete Research, 2005. 35 (4): p. 776- 781.

Cuitifio G; Esteves A; Maldonado G, Rotondaro R. 2010a. Análisis y reflexiones sabre el comportamiento higrotérmico de construcciones con quincha. Estudio del case de un taller experimental en Mendoza. Revista AREA. ISSN 0328-1337.

Cuitifio G; Esteves A; Rotondaro R; Maldonado G. 2009. Análisis económico comparative de soluciones habitacionales alternativas con quincha respecto de las construcciones tradicionales. Avances en Energías Renovables y Media Ambiente (Vol. 13. Argentina. ISSN 0329-5184).

Cuitifio G; Maldonado G; Esteves A. 2014. Analysis of the Mechanical Behavior of Prefabricated Wattle and Daub Walls. International Journal of Architecture, Engineering and Construction. Vol 3, N° 4. Pp. 235-246. ISSN 1911-1118.

Cuitifio G; Rotondaro R; Esteves A; Maldonado G. 2010b. Clasificación y estudio experimental del comportamiento de suelos Mendocinos para la construcción de quinchas. Comunicación expuesta en poster. XXXII Congreso Asociación Argentina de Energías Renovables y Ambiente, realizado en Cafayate - Salta.

DAI C., GUO X., 2017. Thermal Conductivity Measurement of A Bar-like Object. Energy Procedia 142, 3975-3981.

Dalla Santa G., Peron F., 2017. Laboratory Measurements of Gravel Thermal Conductivity: An Update Methodological Approach. Energy Procedia 125, 671–677.

Dellicompagni P., Castro N., Franco J., Heim D., Wieprzkowicz A., Vera S., Uribe D. Caracterización energetica de materiales de cambio de fase para

uso en acondi-cionamiento edilicio. Avances en Energías Renovables y Medio Ambiente Vol. 21, pp 08.23-08.35, 2017. ISSN 2314-1433.

Dellicompagni, L. Saravia, M. Altamirano, J. Franco, Simulation and testing of a solar reciprocating steam engine, Energy 151 (2018) 662–674, https://doi.org/10. 1016/j.energy.2018.03.110.

Devaux, M.M. Farid, Benefits of PCM underfloor heating with PCM wallboards for space heating in winter, Appl. Energy 191 (2017) 593–602.

Di Lalla N., Juanicó L. E., (2016). Nuevo colector solar térmico de bajo costo de flujo forzado autónomo por panel fotovoltaico. Avances en Energías Renovables y Medio Ambiente Vol. 20, pp 03.33-03.44.

Di Maio L., Coppola B., 2018. Data on thermal conductivity, water vapor permeability and water absorption of a cementitious mortar containing end-of-waste plastic aggregates. DOI:https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.03.083.

Diaz A., HD20: Aparato de placa caliente con guarda para la medición de las propiedades de transferencia de calor por conducción en hormigones. Energías Renovables y Medio Ambiente Vol. 47, pp. 49- 57, 2021 ISSN en línea: 2684-0073 / ISSN impreso: 0328-932.

Díaz Andrés E. and Hernández A., 2018. Dosage test for concrete blocks, bricks and subfloors with plastic waste and pearlite fines. Advances in Renewable Energies and the Environment. Vol. 22, pp 01.71-01.82.

Diaz Andres Emanuel, Judith Franco, 2018. Destilador Multietapa con Acumulador de Calor por Cambio de Fase. Editorial Académica Española, Libro ISSN 978-620-2-11011-2.

Dobos A., M. Kasberg, P. Gilman, P50/P90 analysis for solar energy systems using the system advisor model, in: 2012 World Renewable Energy Forum, Denver, Colorado, May 13-17, 2012.

DOE-2, Reference Manual Part 2, Chapter VIII, National Technical Information Services, US Department of Commerce, 1980.

Duffie J. and Beckman W. 2013. Solar Engineering of Thermal Processes. Wiley Interscience. 4a Ed. NY.

Duffie, J. A. y Beckman, W. A., Solar Engineering of Thermal Processes, 3rd edition, John Wiley & Sons, USA, 2006.

Echazu R., Saravia L, Cadena C. 2003. Cap. 4 - Estudio de Materiales en Las cocinas solares de Iberoamérica. Editores: Esteves A., Román R. Ed CYTED. Madrid.

EPA, Advancing Sustainable Materials Management: Facts and Figures Report, United States Environ. Prot. Agency. (2019).

https://www.epa.gov/facts-and-figures-about-materials-waste-and-recycling/advancing-sustainable- materials-management%0Ahttps://www.epa.gov/smm/advancing-sustainable-materials-management-facts-and-figures-report.

Erbs D.G. (1987). "Degree Day for Variable Base Temperatures". Proceedings of International Solar Energy Society (SES). Vol. N° 6, pp. 387-391. Ed. J. Hages and W. Kollar.

ESP-r community. Repository of ESP-r routine. Energy Systems Research Unit, University of Strathclyde, Glasgow Scotland. (2018). Available on https://github. com/ESP-rCommunity/ESP-rSource/blob/master/src/ebld/spmatl.F. (last version updated at July, 2018).

Esteves A., Gelardi D. 2003. "Docencia En Arquitectura Sustentable: Programa de Optimizaci6n de Proyectos de Arquitectura Basado en el Balance Térmico". Revista Avances en Energías Renovables y Medio Ambiente. Vol. 7, Ed. En CD ISSN 0329-5184. Torno II, Secc. 10, pp. 31-36.

Esteves A., Gelardi D. 2006. Técnicas constructivas y materiales de bajo costo energético en la arquitectura sustentable. caso proyecto y construcci6n de vivienda en centro-oeste de argentina. XI Encontró Nacional de Tecnología no Ambiente Construido. (ENTAC 2006). Florianópolis. Brasil. Pp.657-665.

Esteves A., Gelardi D., Ganem C., Mercado M.V. 2013a, Sustentable architecture. Analysis of the passive solar system of Greenhouse - PSSG incorporated to buildings in temperate continental dimates. Solar World Congress 2013. Cancún, México.

Esteves A., y Gelardi D. 2008. Método para el cálculo de Grados-día de cualquier temperatura base y cualquier localidad. AVERMA. Vol. 12, Secc.5, pp 153-158.Salta.

Esteves, A. 2013b. "Desarrollo de factores que vinculan el comportamiento energético-ambiental y econ6mico de edificios con el media ambiente exterior". Tesis Doctoral. FAUD. Universidad de Mendoza.

Finkelstein J., R.E. Schafer, Improved goodness-of-fit tests, Biometrical 58 (1971) 641e645.

Flores Larsen Silvina, 2001. Modelo térmico del programa SIMEDIF de simulación de edificios. Energías Renovables y Medio Ambiente. Vol. 9, pp. 15-24 , 2001. Impreso en la Argentina. ISSN 0328-93.

From PonteF., Di Filippo P., 1974. Design Criteria for Guarded Hot Plate Apparatus. In ASTM STP No. 544, Philadelphia, pp. 97-117.

Gandage A., Vinayaka Rao V., 2013. Effect of Perlite on Thermal Conductivity of Self-Compacting Concrete. Procedia - Social and Behavioral Sciences 104,188-197.

Geyer R., J.R. Jambeck, K.L. Law, Production, use, and fate of all plastics ever made, Sci. Adv. 3 (2017) 25–29, https://doi.org/10.1126/sciadv.1700782.

Ghosh A., Ghosh S., Neogi S., 2013. Performance Evaluation of a Guarded Hot Box U-value Measurement Facility under Different Software Based Temperature. Energy Procedia 54, 448-454.

Gowreesunker, S.A. Tassou, M. Kolokotroni, Improved simulation of phase change processes in applications where conduction is the dominant heat transfer mode, Energy Build. 47 (2012) 353–359, https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2011. 12.008.

Gutiérrez C., Herrera M., Mansilla F, Sisca N., (2012). Secadero solar indirecto de circulación natural, para hierbas aromáticas, frutas, y verduras en la ciudad de pico truncado. https://www.mendoza-conicet.gob.ar/asades/modulos/averma/trabajos/2012/2012-t002-a001.pdf

Hall I., R.R. Prairie, H.E. Anderson, E.C. Boes, Generation of a typical meteorological year, in: Proceedings of the 1978 Annual Meeting of the American Section of the International Solar Energy Society, 1978, pp. 669e671.

Hernández A. L. y Quiñonez J. E. (2017). Experimental validation of an analytical model for performance estimation of natural convection solar air heating collectors. Renewable Energy, 117, 1, pp. 202-216.

Hernández A. L., Quiñonez J. E. y González S. (2015). Modelización numérica de un colector solar calentador de aire con matriz porosa metálica. Avances en Energías Renovables y Medio Ambiente, Vol. 19 - N° 1, Sección 8, pág. 133-145.

Hernández A., Fernández C., Salvo N. y Suligoy H. (2007). Diseño, construcción y primeros ensayos de un colector solar calentador de aire de tipo loop convectivo para el calentamiento de edificios. Avances en Energías Renovables y Medio Ambiente, Vol. 11, N° 2, pp. 03.76 –03.82.

Hernández Luis Alejandro, 2003. GEOSOL: una herramienta computacional para el cálculo de coordenadas solares y la estimación de irradiación solar horaria. Avances en Energías Renovables y Medio Ambiente. Vol. 7, Nº 2, 2003. Impreso en la Argentina. ISSN 0329-5184.

Hui C., Energy Performance of Air-conditioned Buildings in Hong Kong, PhD Thesis, Department of Building and Construction, City University of Hong Kong, 1996.

IEA (2013), Transition to Sustainable Buildings, IEA, Paris https://www.iea.org/reports/transition-to-sustainable-buildings

Incropera F.P., De Witt D. 2001. Fundamentals of Heat Transfer. Ed. J. Wiley. N.Y.

IPCC, 2007. Cambio climático 2007. Informe de síntesis. Panel Intergubernamental para el Cambio Climático. OMM -PNUMA. Suiza.

IRAM 11601-02 standard. Thermal insulation of buildings. Calculation methods. Thermal properties of components and building elements in steady state.http://www.iram.org.ar/index.php.

IRAM 11603. (2010). "Acondicionamiento térmico de edificio" Clasificaci6n Bioambiental de la Republica de Argentina. Institute de Racionalización Argentina de Materiales.

IRAM 11604. (2001). "Aislamiento térmico de edificios". Institute de Racionalización Argentina de Materiales.

IRAM 11605, (1996) "Aislamiento térmico de edificios, Condiciones de habitabilidad en viviendas". Institute de Racionalización Argentina de Materiales.

IRAM 11625, (2000) "Aislamiento térmica de edificios, Verificaci6n de sus condicione higrotérmicas". Institute de Racionalización Argentina de Materiales.

IRAM 11630, (2000) "Aislamiento térmico de edificios, Verificaci6n de sus condicione higrotérmicas". Institute de Racionalizaci6n Argentina de Materiales.

IRAM 11900, (2010) "Certificaci6n de envolventes de edificios". Institute de Racionalización Argentina de Materiales.

IRAM Standard 11.559-1995. Thermal conditioning of buildings. Method of determining the thermal conductivity of building materials using the hot plate apparatus.http://www.iram.org.ar/index.php.

IRAM standard 11549-18. Thermal insulation of buildings. Definitions.http://www.iram.org.ar/index.php

Jiang Y., Generation of typical meteorological year for different climates of China, Energy 35 (2010) 1946e1953.

Kamaruddin M., M.M.A. Abdullah, M.H. Zawawi, M.R.R.A. Zainol, Potential use of plastic waste as construction materials: Recent progress and future prospect, IOP Conf. Ser. Mater. Sci. Eng. 267 (2017) 012011, https://doi.org/ 10.1088/1757-899X/267/1/012011.

Kan, A. and Demirboğa R, A new technique of processing for waste-expanded polystyrene foams as aggregates. Journal of Materials Processing Technology, 2009. 209 (6): p. 2994-3000.

Kolisetty K., H.S. Chore, Utilization of waste materials in construction activities: a green concept, Int. J. Comput. Appl. 975–8887 (2013).

Kong, P. Jie, C. Yao, Y. Liu, Experimental study on thermal performance of phase change material passive and active combined using for building application in winter, Appl. Energy 206 (2017) 293–302, https://doi.org/10.1016/j.apenergy. 2017.08.176.

Kook-Han, K., Sang-Eun, J., Jin-Keun, K. & Yang S. (2003). An experimental study on thermal conductivity of concrete. Cement and Concrete Research, 33, 363-371.

Kou, S., et al., Properties of lightweight aggregate concrete prepared with PVC granules derived from scraped PVC pipes. Waste Management, 2009. 29 (2): p. 621-628.

Kuznik, D. David, K. Johannes, J.-J. Roux, A review on phase change materials integrated in building walls, Renew. Sustain. Energy Rev. 15 (2011) 379e391.

Lacroix, Numerical simulation of melting and resolidification of a phase change material around two cylindrical heat exchangers, Numerical Heat Transfer, Part A: Applications: An International Journal of Computation and Methodology 24 (2)(1993) 143–160, https://doi.org/10.1080/10407789308902610.

Lebreton L., A. Andrady, Future scenarios of global plastic waste generation and disposal, Palgrave Commun. 5 (2019) 1–11, https://doi.org/10.1057/s41599-018-0212-7.

López y A. Hernández, 2018. Nuevo calentador solar de aire con matriz porosa selectiva. desarrollo tecnológico y evaluación experimental. Acta de la XLI Reunión de Trabajo de la Asociación Argentina de Energías Renovables y Medio Ambiente Vol. 6, pp. 02.109-02.120, 2018. Impreso en la Argentina. ISBN 978-987-29873-1-2.

Lovegrove K., W. Stein, Concentrating Solar Power Technology. Principles, Developments and Applications, Woodhead Publishing, 2012.

Mandurino C., P. Vestrucci, Using meteorological data to model polluted and dispersion in the atmosphere, Environ. Model. Soft. 24 (2009) 270e278.

Marion M., K. Urban, User's Manual for TMY2s Derived from the 1961-1990National Solar Radiation Data Base, National Renewable Energy Laboratory, 1995.

Martínez C., Condorí M., Durán G., (2012). Calefón solar económico con absorbedor en caños de termofusión. ensayos preliminares. Avances en Energías Renovables y Medio Ambiente Vol. 16, 2012.

Ministerio de Energía y Minería (MinEM), Sitio Web: https://www.argentina.gob.ar/energiaymineria. (Ultimo acceso 20 de julio del 2020).

Mitzner K., 2009. Complete PCB Design Using OrCAD Capture and PCB Editor. DOI:https://doi.org/10.1016/B978-0-7506-8971-7.X0001-7.

Naik, TR, et al., Use of post-consumer waste plastics in cement-based composites. Cement and Concrete Research, 1996. 26 (10): p. 1489-1492.

Ohunakin O., M.S. Adaramola, O.M. Oyewola, R.O. Fagbenle, Generation of atypical meteorological year for northeast, Nigeria, Appl. Energy 112 (2013) 152e159.

Pinel, C.A. Cruickshank, I. Beausoleil-Morrison, A. Wills, A review of avail-able methods for seasonal storage of solar thermal energy in residential ap-plications, Renew. Sustain. Energy Rev. 15 (2011) 3341e3359.

Pottler, K.; Sippel, C. M.; Beck, A.; Fricke, J. (1999). Optimized finned absorber geometries for solar air heating collectors. Solar Energy 67, 1–3, 35–52.

Quiñonez, J., Hernández, A., (2019). Automatización de un colector solar calentador de aire. Acta de la XLII Reunión de Trabajo de la Asociación Argentina de Energías Renovables y Medio Ambiente Vol. 7, pp. 06.51-06.57, 2019. Impreso en la Argentina. ISBN 978-987-29873-1-2.

Rahman I., J. Dewsbury, Selection of typical weather data (test reference years) for Subang, Malaysia, Build. Environ. 42 (2007) 3636e3641.

Rosca B., Structural grade concrete containing expanded polystyrene beads with different particle distributions of normal weight aggregate. Materials Today: Proceedings 42 (2021) 548–554.

Salvo, N.; Hernández, A.; Molina Castillo, V. (2009). Análisis hidráulico de la circulación de aire en un colector paracalefacción, Avances en Energías Renovables y Medio Ambiente, 13(1), p. 8.59 – 8.64.

Saravia L, Alía de Saravia D, Echazú R, Alcorta G. La simulación de sistemas termo mecánicos solares con el programa Simusol. Avances en Energías Renovables y Medio Ambiente 2007;11:03.01e3.08. ISSN 0329 e 5184.

Shafie-khah, M. Kheradmand, S. Javadi, M. Azenha, J.L.B. de Aguiar, J. Castro-Gomes, P. Siano, J.P.S. Catalao, Optimal behavior of responsive

residential demand considering hybrid phase change materials, Appl. Energy 163 (2016) 81–92.

Sharma, V.V. Tyagi, C.R. Chen, D. Buddhi, Review on thermal energy storage with phase change materials and applications, Renew. Sustain. Energy Rev. 13 (2009) 318e345.

Sopian, K.; Supranto; Daud, W.R.W.; Othman, M.Y.; Yatim, B. (1999). Thermal Performance of the Double-Pass Solar Collector with and without Porous Media. Renewable Energy 18, pp. 557 – 564.

Tang, W., Lo Y., and Nadeem A., Mechanical and drying shrinkage properties of structural-graded polystyrene aggregate concrete. Cement and Concrete Composites, 2008. 30 (5): p. 403-409.

Tropea I., Villagrán Z., 2014. Drying of the evaluated concrete by means of the impact resonance frequency and the ultrasonic pulse velocity.https://www.researchgate.net/publication/301889988.

Tumirah, M.Z. Hussein, Z. Zulkarnain, R. Rafeadah, Nano-encapsulated organic phase change material based on copolymer nanocomposites for thermal energy storage, Energy 66 (2014) 881–890.

Uttaravalli, Scientific and engineering aspects of potential applications of post-consumer (waste) expanded polystyrene: A review. Process Safety and Environmental Protection 137 (2020) 140–148.

Venegas, D.A. Vasco, F.E. García, C. Salinas, Effect of the insulation level on the thermal response of a PCM-modified envelope of a dwelling in Chile, Appl. Therm. Eng. 141 (2018) 79–89, https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2018.05.083.

Vicente, T. Silva, Brick masonry walls with PCM macrocapsules: an experimental approach, Appl. Therm. Eng. 67 (2014) 24–34.

Wang, H. Yu, L. Li, M. Zhao, Experimental assessment on the use of phase change materials (PCMs)-bricks in the exterior wall of a full-scale room, Energy Convers. Manage. 120 (2016) 81–89.

Wernery J, Ben-Ishai A., Binder B & Brunner S., 2017. Aerobrick - An airgel-filled insulating brick. Energy Procedia 134, 490–498.

Wilcox S., W. Marion, User's Manual for TMY3 Data Sets, Technical Report NREL/TP-581e43156, National Renewable Energy Laboratory, May 2008.

Yang H., Y. Li, L. Lu, R. Qi, First order multivariate Markov chain model for generating annual weather data for Hong Kong, Energy Build. 43 (2011) 2371e2377.

Yehya, H. Naji, L. Zalewski, Experimental and numerical characterization of an impure phase change material using a thermal lattice Boltzmann method, Appl. Therm. Eng. 154 (25) (May 2019) 738–750, https://doi.org/10.1016/j. applthermaleng.2019.03.026.

Zalba, J.M. Marin, L.F. Cabeza, H. Mehling, Review on thermal energy storage with phase change: materials, heat transfer analysis and applications, Appl. Therm. Eng. 23 (2003) 251e283.

Zhu, P.P. Liu, F.L. Liu, P.F. Hu, M.D. Wu, Energy performance of double shape-stabilized phase change materials wallboards in office building, Appl. Therm. Eng. 105 (2016) 180–188.

Zwanzing, Numerical simulation of phase change material composite wall-board in a multi-layered building envelope, Electronic Theses and Dissertations. Paper 1655 (2012), https://doi.org/10.18297/etd/1655.