



DISEÑO Y EVALUACION TERMICA MEDIANTE PREDISE Y SIMEDIF DE UN EDIFICIO RESIDENCIAL UBICADO EN EL BARRIO MAS ELEVADO DE LA CIUDAD DE SALTA¹

Alejandro L. Hernández

INENCO – Instituto de Investigaciones en Energía No Convencional – U.N.Sa. - CONICET

Universidad Nacional de Salta

Avda. Bolivia N° 5150, 4400, Salta, Argentina

FAX: 54-87-4255489, Tel: 54-87-4255579

EMAIL: alejo@unsa.edu.ar

RESUMEN. En este trabajo se presentan los resultados de la simulación del comportamiento térmico de un edificio residencial ubicado en uno de los puntos más elevados de la ciudad de Salta. De acuerdo al clima de la región, el diseño minimiza los requerimientos de refrescamiento auxiliar durante el verano pero requiere de calefacción auxiliar durante el invierno. Mediante un estudio de prediseño y una simulación detallada se determinaron la demanda energética auxiliar invernal y el costo diario de calefacción eléctrica. De acuerdo a la simulación de verano, el edificio no necesita enfriamiento auxiliar bajo las condiciones meteorológicas estivales ensayadas si se aplica una estrategia de manejo apropiada consistente en el apantallado de las ventanas colectoras de radiación solar mediante celosías o cortinas, combinada con ventilación natural nocturna.

Palabras claves: Simulación computacional, Edificios, Comportamiento térmico.

INTRODUCCION

De acuerdo al clima de la región (subtropical templado) las estrategias de acondicionamiento pasivo más apropiadas en este caso son la colección solar y la masa térmica para invierno y la ventilación natural para el verano. En diciembre de 2003 se inició la construcción de un edificio residencial ubicado en uno de los puntos más elevados de la ciudad de Salta, a 90 m sobre el nivel basal promedio de la ciudad que es de 1.200 m.s.n.m. El diseño del edificio estuvo a cargo del autor de este trabajo quien anteriormente, (Hernández, 2002a) realizó un análisis de pautas de diseño apropiadas para lograr una buena relación costo-beneficio al aprovechar la energía solar en el calefaccionado de edificios en esta ciudad. De acuerdo al presupuesto asignado a la construcción no fue posible cumplir con la totalidad de dichas pautas, razón por la cual la vivienda requerirá calefacción auxiliar en la época invernal. Por otra parte, el diseño del edificio estuvo orientado a lograr el acondicionamiento térmico pasivo durante la época estival mediante la ventilación natural cruzada. El objetivo de este trabajo es presentar los resultados del prediseño térmico realizado con el programa PREDISE (Hernández, 2002b) y de la simulación térmica detallada realizada con SIMEDIF (Flores y Lesino, 2001) mediante los cuales se estimaron las cargas teóricas de calefacción y enfriamiento y los costos aproximados del acondicionamiento auxiliar si éste fuera de origen eléctrico.

A fin de disponer de una gran superficie parquizada, se proyectó un diseño edilicio en dos plantas tipo dúplex, ocupando la vivienda sólo un tercio del área de terreno disponible. La integración entre el ambiente interior y el entorno se materializa a través de un gran galería techada en el sector sur de la planta baja y una terraza descubierta en la planta alta. La orientación de la fachada principal es de 24° al oeste lo cual permite, aún, un buen aprovechamiento del recurso solar. Sin embargo, la negativa del propietario a habitar en una vivienda con gran exposición visual obligó a reducir el área de ganancia directa a sólo el 11 % del área total de piso en la planta baja y al 5 % en la planta alta, siendo el valor recomendado 15 %. Los muros exteriores son de ladrillón macizo de 20 cm de ancho mientras que los interiores son de ladrillo macizo de 15 cm en la planta baja y de cerámico hueco de 15 cm en la alta. Esta elección estuvo orientada a maximizar, durante el invierno, la acumulación de energía en los sectores de uso diurno (acondicionados con energía solar por ganancia directa) y a minimizar tal acumulación en los dormitorios, ya que el clima de la región es muy cálido en la época estival. Dado que la humedad local es elevada durante el verano, la ventilación de las masas de acumulación es la estrategia de refrescamiento más conveniente. La zona registra, por su altitud y morfología, valores de velocidad de viento apropiados para aplicar la ventilación pasiva y en este sentido, si las masas de acumulación no son importantes, el mecanismo de enfriamiento resulta aún más efectivo. La ubicación de las aberturas fue planificada de tal forma de favorecer la ventilación cruzada en la mayoría de los locales. Por otra parte, durante el invierno, al existir relativamente poca masa de acumulación dentro de los dormitorios, se logra elevar más rápidamente sus temperaturas al encender, durante la noche, las estufas. Los techos de la planta alta son también livianos. Constituidos por machimbre sobre tirantes de pino y tejas francesas, están aislados térmicamente con poliestireno expandido de 3 cm de espesor con barrera de vapor de polietileno de 200 µm. Dos cumbreras perpendiculares entre sí dividen el tejado en 4 aguas con gran pendiente debido a las características pluviales de la región: al Este, Oeste y Sur con pendientes de 30° y al Norte con pendiente de 50°. Estas cumbreras se encuentran a 4,4 m sobre el piso de la planta alta a fin de disminuir la sensación de sofocamiento estival al acumular el aire caliente muy por encima del nivel de los habitantes.

¹ Trabajo financiado por ANPCYT PICT 2000 N°13-09991 y por CIUNSa N°1088.

La carpintería es de madera y todas las ventanas poseen vidrio simple repartido. En los casos en que el ajuste entre hojas y marcos sea deficiente se dispondrán burletes sintéticos a fin de minimizar las infiltraciones de aire. El edificio tiene un área cubierta de 170 m² y un volumen de 342,5 m³. La planta baja consta de un living y un escritorio orientados al norte, un garaje al este y una cocina comedor al sur comunicada con la galería mediante una puerta simple. La escalera en forma de U, ubicada entre el escritorio y la cocina, permite alojar un pequeño toilette debajo del tramo más elevado. La planta alta posee dos dormitorios con ventanas al norte y uno comunicado con un balcón techado a través de una puerta ventana por donde no ingresa radiación solar directa, un baño sobre el sector sudoeste y un hall de comunicación con puerta ventana al sur hacia la terraza que constituye el techo de la galería de la planta baja. En la figura 1 se observa el diseño de ambas plantas.

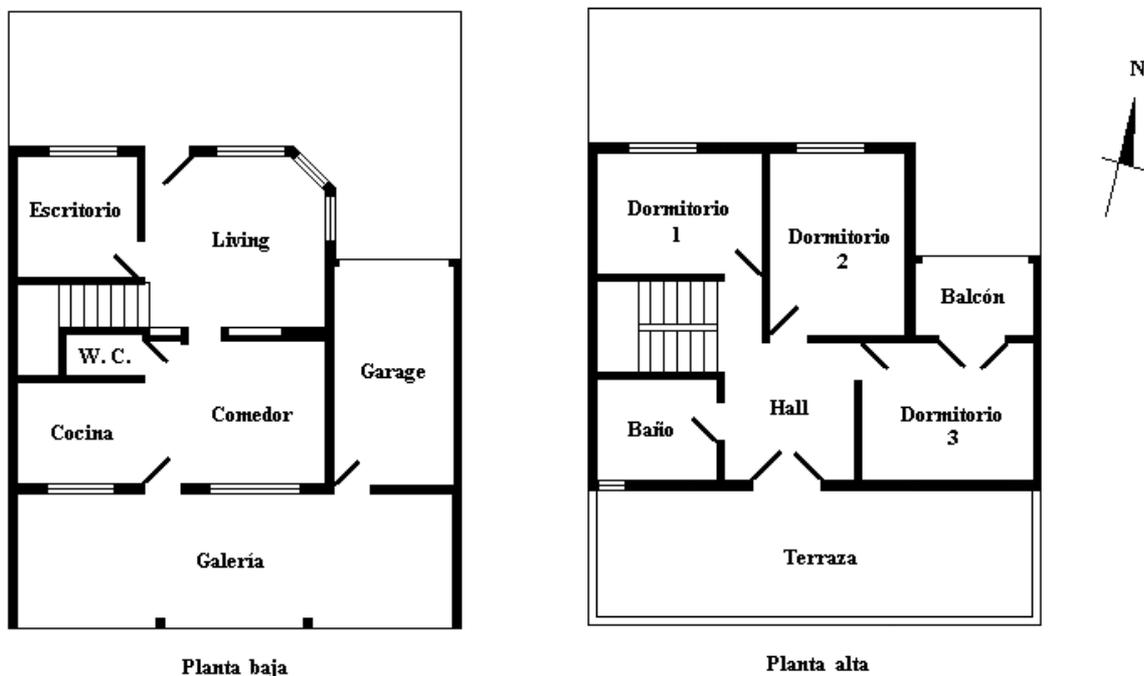


Figura 1: detalle de ambas plantas del edificio.

Desde el punto de vista térmico, los locales más desfavorecidos durante el invierno son los ubicados sobre el sector sur del edificio ya que no disponen de ganancia solar directa: la cocina-comedor en la planta baja y el dormitorio 3, el hall y el baño en la planta alta. Estos locales requerirán entonces calefacción auxiliar. Actualmente el edificio no dispone de gas natural por lo que dicha calefacción sería de origen eléctrico. De acuerdo al comportamiento real del edificio una vez habitado, si se justifica económicamente, podrá agregarse aislación térmica a las paredes que dan al sur con lo cual, no sólo disminuirá la carga de calefacción, sino también el riesgo de condensación habitual de los muros con esta orientación. Actualmente el edificio se encuentra en construcción habiéndose completado el 95 % de la obra.

PREDISEÑO TERMICO

El prediseño térmico del edificio fue realizado con el programa PREDISE V.1.0. Los valores de las variables meteorológicas empleados en los cálculos fueron las siguientes:

	Temp. Amb. Media (°C)	Temp. Amb. Máxima (°C)	Radiación Solar sobre sup. horiz. (MJ/m ²)	Velocidad de Viento (m/s)
Invierno	9,9	20,5	16	1,4
Verano	21,3	28,3	21,5	1,7

Tabla 1: Datos meteorológicos en promedios mensuales obtenidos a partir de tablas del Servicio Meteorológico Nacional.

Primeramente se analizaron ambas plantas para clima de invierno, determinándose sus temperaturas medias y saltos térmicos diarios interiores, las fracciones solares logradas con las ganancias directas por ventanas y las cargas térmicas unitarias, C.T.U. (cantidad de calor perdido por día por cada °C de diferencia de temperatura entre las temperaturas medias interior y exterior). Los resultados figuran en la tabla 2:

Invierno	Temperatura media	Salto térmico diario	Fracción solar	C.T.U. (MJ/°C día)
Planta baja	14,5 °C	6,5 °C	57 %	16,3
Planta alta	12 °C	4 °C	25 %	23,9

Tabla 2: Temperatura media, salto térmico diario, fracción solar y C.T.U. de cada planta sin calefacción auxiliar.

Según se observa en la tabla, ambas plantas requieren de calefacción auxiliar ya que sus temperaturas medias difieren considerablemente de los 18 °C considerados como temperatura de diseño para invierno. La CTU de la planta baja es menor que la de la alta debido a que ésta tiene mayor área expuesta al exterior. Como era de esperar, la fracción de ahorro solar de la planta baja supera ampliamente a la de la alta ya que aquella dispone de mayor área vidriada para colección solar. Por esta misma razón, el salto térmico diario interior en la planta baja es mayor que en la alta, resultando ambos valores aceptables.

Al agregarse energía auxiliar para lograr en ambas plantas una temperatura media interior de 18 °C se obtuvieron los siguientes valores:

Invierno	Temperatura media	Salto térmico diario	Energía auxiliar	Equivale a
Planta baja	18 °C	6 °C	58,5 MJ/día	2 velas de cuarzo encendidas 14 hs
Planta alta	18 °C	3,5 °C	131,3 MJ/día	8 velas de cuarzo encendidas 8 hs

Tabla 3: Temperatura media interior, salto térmico diario y energía auxiliar de calefacción para cada planta.

De acuerdo a estos resultados, se requiere mantener encendida, por ejemplo, una estufa a cuarzo entre las 10 y las 24 hs. en el comedor y 4 estufas a cuarzo encendidas durante la noche entre las habitaciones y el hall de la planta alta a fin de calefaccionar todo el edificio. El precio del kWh eléctrico residencial en la zona donde está el edificio es de \$ 0,1127 lo que representa un costo de \$ 6,22 por cada día en que se enciendan las cinco estufas. Esto significa que el costo de calefacción será muy elevado si no se dispone en el edificio de gas natural antes del próximo invierno.

Al analizar la situación de verano, sin enfriamiento auxiliar, se obtuvieron los resultados que figuran en la tabla 4.

Verano	Temperatura media	Salto térmico diario
Planta baja	25,9 °C	5,4 °C
Planta alta	22,5 °C	3 °C

Tabla 4: Temperatura media interior y salto térmico diario para cada planta sin enfriamiento auxiliar.

Según puede observarse, la temperatura media de la planta baja es elevada mientras que la de la planta alta es aceptable. Esto indica que el diseño cumple con el objetivo de mantener confortables los dormitorios durante el verano. Sin embargo, será necesario emplear energía auxiliar para refrescar la planta baja si la ventilación natural no logra evacuar el exceso de calor que ingrese a través de la envolvente. La cantidad de energía que sería necesario extraer del edificio para lograr una temperatura agradable en su interior figura en la tabla 5.

Verano	Temperatura media	Salto térmico diario	Energía a extraer
Planta baja	22 °C	5 °C	63 MJ/día
Planta alta	22,5 °C	3 °C	No requiere

Tabla 5: Temperatura media interior, salto térmico diario y cantidad de energía a extraer en cada planta.

Suponiendo que los 63 MJ/día se extrajeran mediante un aparato acondicionador de aire con un razonable valor COP de 2, el consumo eléctrico del aparato sería de: $W = 63 \text{ MJ} / \text{COP} = 31,5 \text{ MJ} = 8,75 \text{ kWh}$ por día. Multiplicando este valor por el precio del kWh en Salta, el propietario debería pagar aproximadamente \$1 diario para mantener el edificio suficientemente fresco. Si bien este valor es sustancialmente menor que el costo diario de calefacción en el invierno, el clima de la ciudad de Salta es tal que los días muy fríos son muchos menos que los muy cálidos y posiblemente el gasto estacional se compense. Dado que las bombas de calor consumen mucho menos energía eléctrica que las estufas a cuarzo, el costo anual del acondicionamiento térmico del edificio disminuiría notablemente si se dispusiera de una bomba de calor preparada para trabajar también como máquina refrigeradora (aire acondicionado), con un sistema de distribución de aire distribuido por todo el edificio. En tal caso el costo operativo, tanto en invierno como en verano, sería bajo pero, obviamente, la inversión inicial por el costo e instalación de tal aparato sería muy grande.

SIMULACION TERMICA CON SIMEDIF

Disponiendo de los resultados arrojados por el prediseño, se procedió a simular el comportamiento térmico del edificio con el simulador detallado SIMEDIF. Los locales analizados fueron el living, el escritorio, la cocina-comedor, el garaje y la galería en la planta baja y los tres dormitorios, el hall y el baño en la planta alta.

En base a los planos de construcción del edificio se determinaron los datos geométricos, obteniéndose las propiedades físicas de los materiales a partir de tablas (Incropera et al., 1990). Se adoptó un valor de renovaciones de aire por hora de 1,5 para los locales interiores y de 15 para la galería ya que está abierta al exterior por el lado sur. Se fijaron los coeficientes convectivos interiores sobre paredes, pisos, techos y tabiques de locales sin ganancia solar en 3 W/m² y en 6 W/m² para los asoleados. Los coeficientes convectivos exteriores dependen de la velocidad del viento y de si la superficie está asoleada o no. Los valores empleados en la simulación figuran en la tabla 6.

Velocidad del viento (m/s)	Sin asoleamiento h_e (W/m ² °C)	Con asoleamiento h_e (W/m ² °C)
1,4 (invierno)	7	11
1,7 (verano)	8	12

Tabla 6: Valores de coeficientes convectivos exteriores empleados en la simulación con SIMEDIF.

El criterio adoptado para la obtención de estos valores fue el siguiente:

- Para las superficies que reciben radiación: $h_e = 5,7 + 3,8 \cdot v$ (v es la velocidad media mensual del viento en m/s)
- Para las superficies que no reciben radiación: $h_e = 2,8 + 3 \cdot v$

De esta forma, para las superficies interiores se emplean las ecuaciones anteriores con $v = 0$ y para las exteriores con el valor medio mensual de v . Estos valores fueron empleados también en el prediseño.

RESULTADOS DE LA SIMULACION

En la figura 2 se presentan los resultados de la simulación del comportamiento térmico del edificio para condiciones de invierno, a la izquierda la planta baja y a la derecha la planta alta.

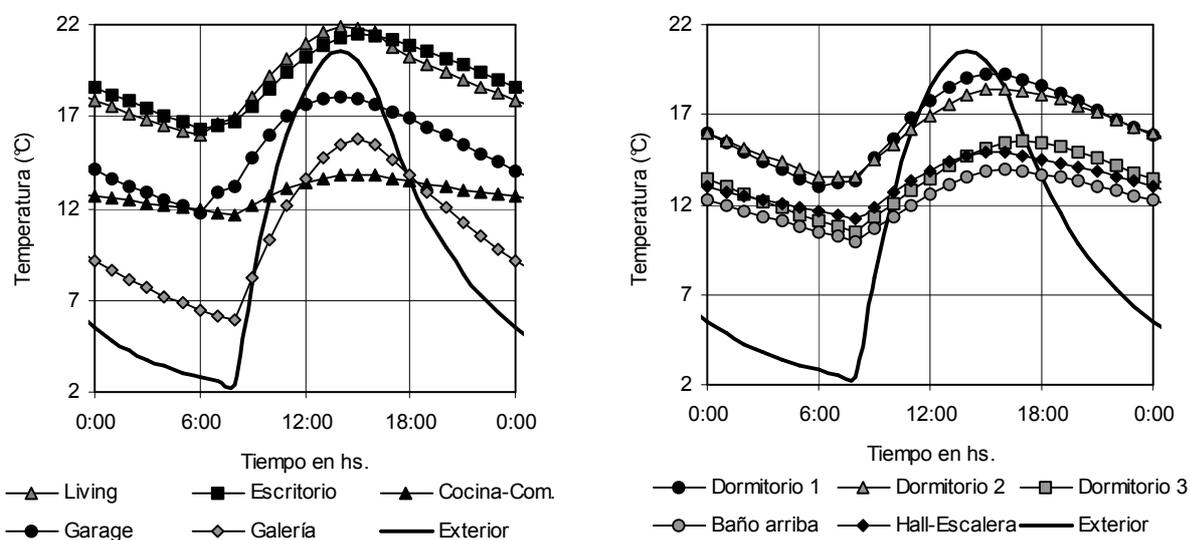


Figura 2: temperaturas simuladas de los locales de ambas plantas para clima de invierno.

Como era de esperar, los cuatro locales que colectan radiación solar por ganancia directa registran las temperaturas más altas. El living y el escritorio no requieren calefacción auxiliar ya que sus temperaturas medias son del orden de 19°C con un salto térmico interior de 6 °C, valor que concuerda con el predicho por el prediseño. Sin embargo, la cocina-comedor registra temperaturas muy bajas y requiere de calefacción auxiliar. Los máximos de las temperaturas de estos tres locales presentan un retardo de 1 hora respecto de la temperatura exterior mientras que el garaje, al estar asoleado por el este (durante la mañana) no evidencia ningún retardo. Los dos dormitorios asoleados (1 y 2) tienen una temperatura media del orden de 16 °C con un salto térmico diario de 6 °C mientras que el dormitorio 3 y el hall registran temperaturas medias del orden de 13 °C con el mismo salto térmico. Esto demuestra que toda la planta alta requiere calefacción auxiliar, coincidiendo con lo evidenciado por el prediseño.

En la figura 3 se presenta la evolución de las temperaturas de los locales al agregarse calefacción auxiliar. En la cocina comedor se entregaron 3,6 MJ/h entre las 11 y las 23 hs. (ya que se trata de un local de uso diurno) lo que equivale a 13 kWh. Entre las 22 y las 9 hs. de la mañana siguiente se entregaron 1,8 MJ/h en cada uno de los dormitorios asoleados y 3,6 MJ/h en el restante. La suma de estos 3 aportes da 86,4 MJ/día, lo que equivale a 24 kWh. En total, entre ambas plantas, fue necesario agregar 133,2 MJ/día (37 kWh) para acondicionar todo el edificio.

Según se observa en dicha figura, el comportamiento térmico de los 4 locales calefaccionados mejoró sustancialmente. La cocina-comedor mantiene su temperatura en 20 °C durante el día y los 3 dormitorios alcanzan una temperatura media del orden de 20 °C durante la noche. Estos valores están 2 °C por encima de la temperatura de prediseño. El costo diario de calefacción para suministrar los 37 kWh mediante estufas eléctricas es de \$ 4,17 (37 kWh x 0,1127 \$/kWh), \$2 por día menos que el costo estimado durante el prediseño. Dado que éste último es un método muy simplificado y que, por otro lado, la simulación detallada puede resultar demasiado optimista, resulta razonable suponer que el costo diario real de calefacción se aproximará a un cierto promedio ponderado entre los valores arrojados por ambos estudios. En particular, se puede aceptar como costo de calefacción conservativo un valor promedio de \$5 por cada día en que se enciendan las estufas.

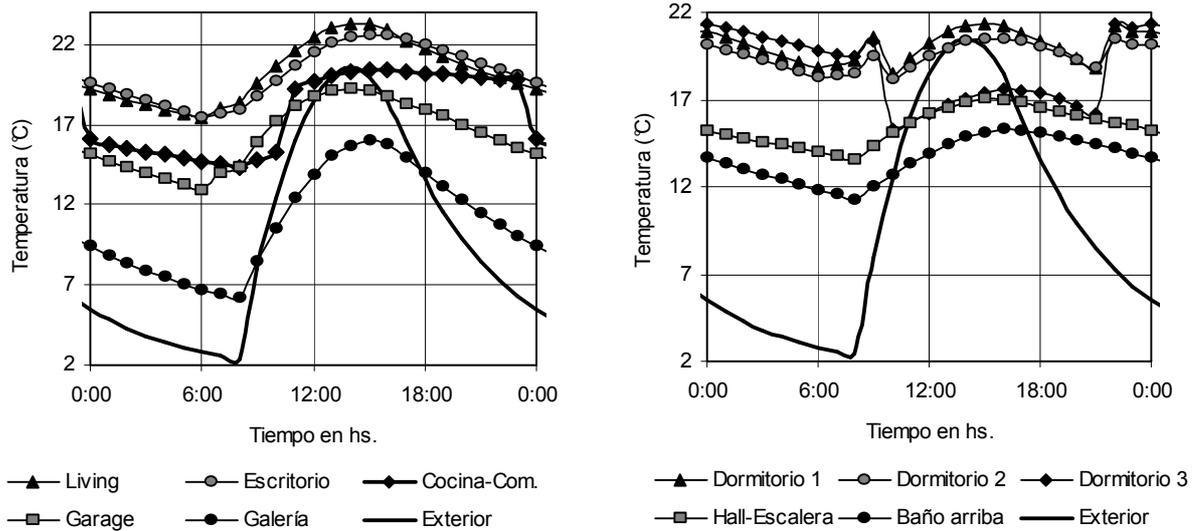


Figura 3: temperaturas simuladas de los locales de ambas plantas con calefacción auxiliar.

A continuación se realizó la simulación del comportamiento térmico del edificio para clima de verano sin enfriamiento auxiliar ni ventilación natural. Los resultados obtenidos se observan en la figura 4.

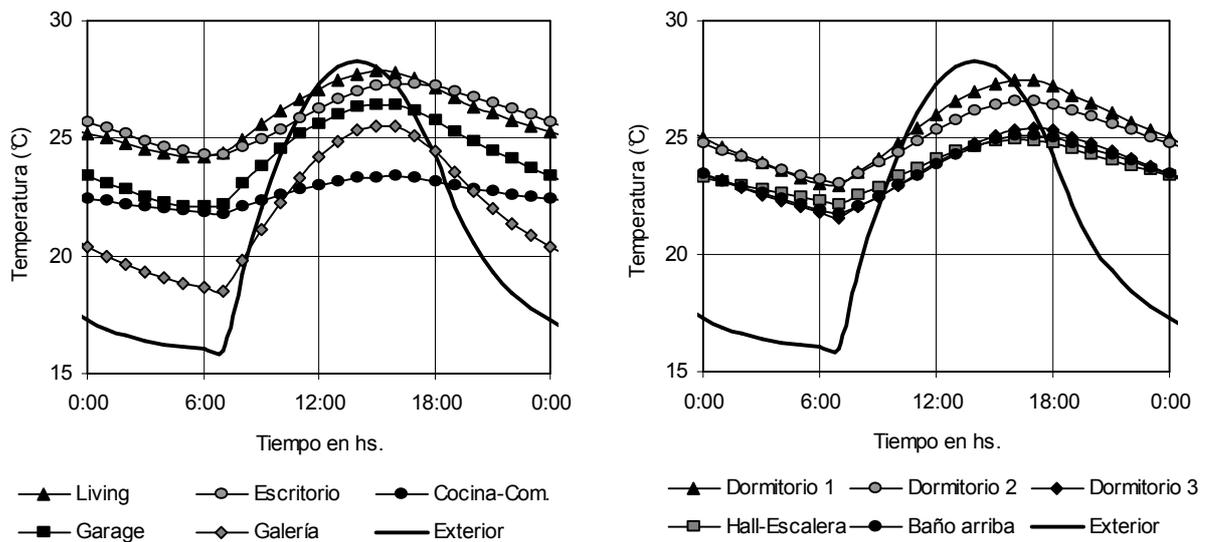


Figura 4: temperaturas simuladas de los locales de ambas plantas para clima de verano.

Los 4 locales asoleados presentan un gran sobrecalentamiento debido a que, al estar orientadas las ventanas para ganancia directa 24° al oeste, aún en verano ingresa radiación solar por ellas durante la tarde. Además, el living posee una ventana orientada casi al este por donde ingresa el sol durante parte de la mañana. Esto se aprecia claramente en la curva correspondiente al elevarse la temperatura del living por encima de la del escritorio a esas horas. A pesar de que los dormitorios 1 y 2 tienen ventanas iguales, el área de acristalado del primero es 14 % de su área de piso, mientras que en el segundo este porcentaje es de apenas 10 %. Esto hace que el dormitorio 1 se caliente hasta 1°C por encima del 2. El resto de los locales se encuentran dentro del rango de confort durante la mayor parte del día.

A fin de mejorar el comportamiento térmico de los locales asoleados, se simuló el apantallamiento de las ventanas colectoras mediante el uso, por ejemplo, de celosías o cortinas de enrollar exteriores. Los resultados obtenidos se aprecian en la figura 5. En este caso, los tres locales de la planta baja registran temperaturas incluidas dentro del rango de confort durante todo el día, con una amplitud térmica del orden de 3°C , mientras que en la planta alta sólo el dormitorio 1 presenta temperaturas superiores a 25°C entre las 14 y las 20 horas. En esta planta los saltos térmicos diarios son del orden de 5°C y los retardos del orden de 3 horas. Dado que la simulación fue realizada con datos meteorológicos promedios mensuales, es de esperar que sea necesario reforzar el acondicionamiento térmico del edificio mediante ventilación natural controlada o bien con aparatos de refrigeración convencionales en aquellos períodos en los que la temperatura media externa sea considerablemente superior a la empleada en los cálculos. Por lo tanto, una apropiada estrategia de apantallamiento diurno de las ventanas colectoras combinada con ventilación nocturna permitirá disminuir apreciablemente el costo de refrescamiento que, de acuerdo al prediseño, no sería inferior a \$1 diario.

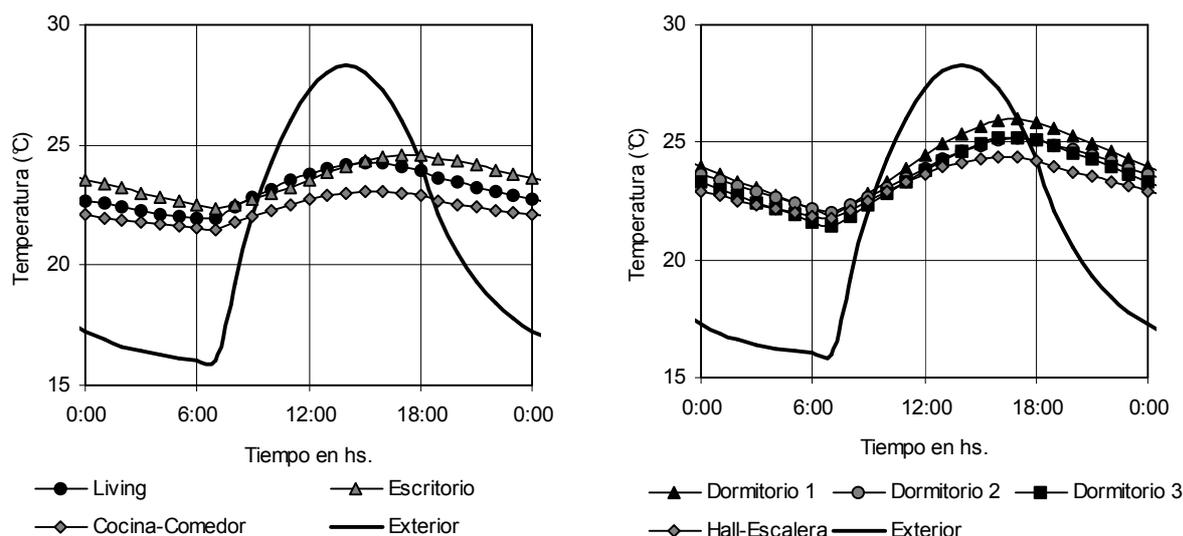


Figura 5: temperaturas simuladas de los locales de ambas plantas con ventanas apantalladas.

Las predicciones en cuanto a los consumos energéticos en ambas estaciones podrán ser corroboradas mediante mediciones una vez que culmine el período de construcción del edificio. Actualmente se están registrando datos meteorológicos mediante una mini estación autónoma ubicada en el punto más elevado de la vivienda, a una altura aproximada de 8 m.

CONCLUSIONES

En el presente trabajo se realizó el estudio, por simulación computacional, del comportamiento térmico de un edificio residencial ubicado en uno de los puntos más elevados de la ciudad de Salta. Su diseño, tipo duplex, estuvo orientado a lograr el acondicionamiento térmico pasivo de verano debido a las características propias del clima subtropical de la región. A tal fin se dispusieron las aberturas de forma tal de favorecer la ventilación cruzada y se minimizó la masa de acumulación en los dormitorios. Mediante un estudio de prediseño realizado con PREDISE se determinó la necesidad de calefaccionar el 75 % del edificio durante la estación invernal y de refrescar solamente la planta baja durante el verano.

A través de la simulación detallada con SIMEDIF se estimaron la demanda de energía invernal necesaria para lograr una temperatura media interior de 20 °C en todo el edificio (~133 MJ/día) y el costo aproximado de calefacción mediante artefactos eléctricos (aproximadamente \$5 por cada día de uso). Por otra parte, y de acuerdo a la simulación, el edificio no necesita enfriamiento auxiliar bajo las condiciones meteorológicas estivales ensayadas si se aplica una estrategia de manejo apropiada consistente en el apantallado diurno de las ventanas colectoras de radiación solar en combinación con la ventilación natural cruzada durante la noche. Esto indica, entonces, que el diseño cumple con el objetivo de lograr el acondicionamiento pasivo del edificio durante el verano. Se tiene planeado iniciar el monitoreo completo del edificio en cuanto se finalice su construcción para lo cual ya se está llevando a cabo el registro de las variables meteorológicas necesarias.

REFERENCIAS

- Hernández A., (2002a), Análisis de Estrategias Para el Diseño de Envolventes de Construcciones Bioclimáticas en la Ciudad de Salta, *AVERMA, Avances en Energías Renovables y Medio Ambiente*, Vol. 6 – N° 1, Sección 1, pág. 53 – 58.
- Hernández A., (2002b), “PREDISE” – Un Novedoso y Práctico Programa de Evaluación Térmica de Edificios, *AVERMA, Avances en Energías Renovables y Medio Ambiente*, Vol. 6 – N° 2, Sección 8, pág. 61 – 66.
- Flores S. y Lesino G., (2001), A new code for the hour-by-hour thermal behavior simulation of buildings. *Proceedings of Seventh International IBPSA Conference*, 75-82. Rio de Janeiro, Brasil.
- Incropera F. & DEWitt P., (1990), *Fundamentals of Heat and Mass Transfer*, 3rd Edn. John Wiley & Sons, New York.

ABSTRACT

In this work, the results of simulation of the thermal behavior of a residential building located in one of highest points in the city of Salta, Argentina, are presented. According to the climate of the region, the design minimizes the requirement of auxiliary cooling during the summer but it requires auxiliary heating during the winter. By means of a simplified method and a detailed simulation, the winter auxiliary energy demand and the daily cost of electric heating were estimated. According to the summer simulation, the building doesn't need auxiliary cooling under the summery meteorological conditions simulated if an appropriate strategy of handling is applied such as the shielded of the solar collector windows by means of lattices or curtains combined with natural ventilation at night.