

REHABILITACIÓN TÉRMICA DE LA ENVOLVENTE DE VIVIENDAS EN ALTURA. UN CASO EN TUCUMÁN

Amalita Fernandez

Facultad de Arquitectura y Urbanismo. UNT. CONICET

<https://orcid.org/0000-0002-5848-2685>

amalitaf93@gmail.com

Beatriz Silvia Garzón

Facultad de Arquitectura y Urbanismo. UNT. CONICET

<https://orcid.org/0000-0003-3130-8895>

bgarzon2022@gmail.com

DOI: <https://doi.org/10.59047/2469.0724.v10.n12.41711>

Resumen

El presente trabajo desarrolla una propuesta de rehabilitación térmico-energética de la envolvente para unidades habitacionales de un edificio de viviendas. El mismo consiste en un edificio en altura ubicado en la ciudad de San Miguel de Tucumán, Argentina. Con esta rehabilitación, se busca generar mejores condiciones de habitabilidad en términos de comportamiento higrotérmico de manera sostenible y eficiente desde el punto de vista energético. Para verificar las mejoras generadas a partir de la implementación de la propuesta, se estudia el comportamiento térmico de ambos casos (original y con propuestas de mejora) de manera comparativa. Este análisis se realiza a partir de tres modelos de balance térmico: modelo estacionario, modelo estacionario con corrección dinámica y modelo dinámico. Las herramientas implementadas para ello son las normas IRAM, el etiquetado de viviendas y la simulación térmica computacional. Se concluye que las prestaciones energéticas del caso original, resultan ineficientes y se logra una importante mejora tras la implementación de estrategias de rehabilitación. Este trabajo permite idear una serie de lineamientos que pueden aplicarse en edificios en altura existentes.

Palabras clave: Vivienda colectiva; Rehabilitación de la envolvente; Confort higrotérmico; Eficiencia energética.

Fecha recepción: 30 de junio de 2023

HIGH-RISE HOUSING ENVELOPE ENERGY-EFFICIENT MODERNIZATION. A CASE IN TUCUMÁN

Abstract

The present work develops a proposal for the thermal-energy envelope rehabilitation for housing units on a residential building. It consists of a tall building located in the city of San Miguel de Tucumán, Argentina. With this rehabilitation, it seeks to generate better habitability conditions in terms of hygrothermal behavior in a sustainable and efficient way from the energetic point of view. A comparative way study of both cases (original and with proposals for improvement) is carry on to verify the improvements generated from the implementation of the proposal. This analysis is carried out from three thermal balance models: stationary model, stationary model with dynamic correction and dynamic model. The tools implemented for this are the IRAM standards, home labeling and computational thermal simulation. It is concluded that the energy benefits of the original case are deficient and a significant improvement is achieved after the implementation of rehabilitation strategies. This work allows to devise a series of guidelines that can be applied in existing high-rise buildings.

Keywords: Collective housing; Envelope rehabilitation; Hygrothermal comfort; Energy efficiency.

Fecha aceptación: 26 de febrero de 2024

1. Introducción

Las edificaciones constituyen un sector de enorme influencia en la evolución del consumo de energía y las emisiones de CO₂ (Urteneche et al. 2021, p. 49). Los edificios representan el 36 % de las emanaciones de dióxido de carbono y del 40 % del consumo energético total en el mundo (Rivero Camacho, et.al. 2018, p. 22). En Argentina, el 37 % del consumo energético total es responsabilidad del sector edilicio (Kuchen y Kozak, 2021, p. 45). Se estima que el 80 % de la energía total que utiliza un edificio se consume durante su vida útil, mientras que el 20 % restante se consume durante la extracción- fabricación de sus materiales y la ejecución de la obra. Además, los países con climas templados y cálidos suelen presentar una mayor ineficiencia energética, ya que la calidad de la construcción en general, es deficiente y aún no ha sido integrada la eficiencia energética al proceso de construcción de edificios, evidenciando un mayor potencial de ahorro (Viegas et al. 2020, p. 152).

Resulta fundamental entonces, definir estrategias apropiadas para el contexto nacional, que permitan en el futuro mediato, hacer intervenciones masivas en la edificación urbana existente, tema que ya ha sido abordado con buenos resultados a nivel internacional en algunos países centrales. Actuar sobre el parque edilicio permite modificar significativamente la matriz energética nacional (Díscoli et al. 2016, p. 58). Asimismo, los costos de las inversiones pueden ser rápidamente amortizados, no sólo por la reducción de los costos de energía por funcionamiento y, consecuentemente, menores tarifas, sino además por una importante reducción del costo inicial de equipos de climatización, debido a la menor potencia requerida para conseguir similares condiciones de confort (Azqueta, 2014, p. 7). La implementación global de medidas de eficiencia energética en el sector de la construcción podría alcanzar notables ahorros en las emisiones de CO₂ de hasta 5.800 millones de toneladas (Gt) para el año 2050, lo que permitiría reducir las emisiones de gases de efecto invernadero en un 83 % por debajo del escenario de desarrollo normal de las actividades (Becqué et al. 2016, p. 4).

En la actualidad, la vivienda en altura constituye la forma de agrupamiento más emblemática de la especulación inmobiliaria moderna (Cutruno, 2012, p. 154). En San Miguel de Tucumán, desde 2004 se construyen en promedio 75 edificios en altura entre las cuatro avenidas, zona central de la ciudad (Gujarro et al. 2012, p. 149). El crecimiento en densidad de los centros urbanos se realiza gracias a la proliferación de edificaciones en altura. La problemática del confort ambiental de dichas edificaciones en nuestras ciudades adquiere a diario mayor importancia. Los cambios que se generan por el incremento de la masa construida y los efectos de la especulación del mercado inmobiliario en la calidad de los materiales que constituyen la envolvente, influyen directamente en el confort ambiental urbano e interior de los mismos con dos consecuencias directas: por un lado, la disminución de la calidad de vida de sus ocupantes y por otro el incremento en el consumo energético de los edificios (Gujarro et al. 2012, p. 149).

Existe un gran potencial para mejorar el rendimiento energético y las emisiones contaminantes mediante la rehabilitación del parque de edificios existente. Esto se debe a la baja tasa de renovación de los mismos, ya que presentan una vida útil de 50 a más de 100 años, y el elevado número de edificios ya existentes. De hecho, mejora se centra en la implantación de medidas de rehabilitación en un edificio existente, con el objetivo de reducir la demanda energética total, manteniendo, o incluso logrando mejorar, los niveles requeridos de confort térmico de los ocupantes (Kolaitis et al, 2013, p. 124). Asimismo, Tommerup (2006) y Nikoladis (2009) afirman que las medidas de rehabilitación energética más comúnmente aplicadas son la instalación de aislamiento térmico, la limitación de puentes térmicos, la sustitución de superficies vidriadas, la mejora de la estanqueidad al aire del edificio y la introducción de ventilación mecánica con recuperación de calor. Existen numerosos estudios centrados en la investigación del impacto de las medidas de rehabilitación energética en la conservación de energía y la reducción de emisiones. Un hallazgo común en la mayoría de estos estudios es que se pueden anticipar ahorros de energía significativos mediante la implementación vigorosa de estas medidas; entre ellos, la instalación de aislamiento térmico sigue siendo el medio disponible más importante para mejorar el comportamiento energético de un edificio (Papadopoulos, 2005, p. 85). El principio del aislamiento térmico consiste en usar los materiales energéticamente eficientes, adecuados para regular la temperatura, y dando como resultado una reducción en el costo de energía.

2. Metodología

La metodología del presente trabajo consiste íntegramente en técnicas cuantitativas de análisis y evaluación. Las mismas se aplican en el estudio de las unidades de la planta tipo de un edificio en altura de viviendas existentes y su propuesta de rehabilitación térmica. Se analiza, concretamente, el comportamiento térmico en base a tres modelos: estacionario, estacionario con corrección dinámica y dinámico, de ocho unidades habitacionales en un edificio de viviendas. A continuación, se describen las herramientas metodológicas aplicadas a cada modelo.

2.1. Modelo estacionario:

Se analizan distintas variables expresadas en el paquete normativo IRAM 11600, referidos al comportamiento térmico de las unidades y de su envolvente. Concretamente se analiza: Coeficiente de transmitancia térmica K, puentes térmicos, riesgos de condensación, coeficiente volumétrico de calefacción y coeficiente volumétrico de refrigeración. Para ello se utilizan como herramientas, calculadores de elaboración propia, los cuales simplifican el paso a paso en los distintos procedimientos de cálculo expresados en la norma. Las mismas se desarrollan a continuación:

- CIDEE-A. Denominado Calculador Integral de Eficiencia Energética de la Envolvente Arquitectónica. Es un calculador, desarrollado por Fernández et. al. (2019) el cual incorpora los cálculos expresados en las normas IRAM 11601; 11605; 11604 y 11659-2. Esta herramienta unifica todos estos valores y simplifica los diferentes procesos de cálculo. CIDEE-EA es diseñado para la zona bioclimática II, sub-zona a o b en su totalidad, pero puede servir, de manera parcial, para el resto de las zonas de la República Argentina (Elsinger et al. 2020).
- C-RC. Denominado Calculador de Riesgos de condensación. Es un calculador desarrollado por Fernández y Garzón (2021) basado en las normas IRAM 11625 que permite verificar riesgos de condensación tanto superficiales como intersticiales. Permite obtener el valor numérico de la temperatura en las distintas capas de la envolvente (techos y muros) y la temperatura del punto de rocío; efectúa una comparación entre ambos y devuelve el valor VERIFICA o NO VERIFICA. Este calculador también arroja un gráfico de líneas donde se comparan las temperaturas y se puede verificar de manera rápida y visual los riesgos de condensación.

2.2. Modelo estacionario con corrección dinámica:

Consiste en modelos estacionarios que mediante ajustes globales logran compensar y corregir el comportamiento del sistema para tener en cuenta los efectos dinámicos. El *Etiquetado de viviendas* es la herramienta de análisis que permite generar este tipo de modelo de balance térmico. Se trata de una herramienta informática en línea que permite a los profesionales evaluar las prestaciones energéticas de una vivienda a partir de un relevamiento. Se obtiene, como resultado, la etiqueta de Eficiencia Energética (EE) conforme los procedimientos oficiales de alcance nacional. A demás, se posibilita evaluar posibles mejoras y cuantificar el impacto de las mismas en términos de potenciales ahorros. Este aplicativo, clasifica la EE de la vivienda en siete categorías a través del Índice de Prestaciones Energéticas (IPE), un valor característico del inmueble, expresado en kWh/m²año. El mismo representa el requerimiento teórico de energía primaria para satisfacer las necesidades de calefacción en invierno, refrigeración en verano, calentamiento de agua sanitaria e iluminación, durante un año y por metro cuadrado de superficie, bajo condiciones normalizadas de uso (Secretaría de Energía, 2018). En el valor IPE inciden distintas variables de diseño. Ellas son: orientaciones, materialización de la envolvente, características de las aberturas, terminación de superficies exteriores e interiores, altura piso-techo, elementos de sombreado, artefactos de iluminación y tipo de accionamiento, características de los equipos de climatización, sistema de calentamiento de agua, uso de energía fotovoltaica y calentamiento de agua con energía solar.

2.3. Modelo dinámico:

Se realiza una simulación térmica para conocer el comportamiento térmico de las distintas unidades y para evaluar la situación de confort. La primera simulación se realiza a partir del software Energy plus y el confort térmico se evalúa a partir del software SIMEDIF según el estándar ASHRAE 55.

- Energy plus. Se emplea esta herramienta para simular el comportamiento térmico del edificio. Es un software de simulación Energy-Plus permite un análisis exhaustivo del comportamiento térmico-energético de un edificio (Mercado et al. 2011, p. 58). La versión empleada en el presente estudio es Energy-Plus (versión 4.0.0.024) (Departament of Energy USA, 2009). El mismo ha sido desarrollado por el departamento de Energía de Estados Unidos a partir de códigos de BLAST y DOE2 e incorpora algoritmos como WINDOW 5.0, COMIS, TRNSYS Y SPARK (DOE, 2004) (Scarduelli et al. 2009). Energy Plus ofrece al usuario la posibilidad de seleccionar numerosas variables de salida. Los datos requeridos de entrada al programa son: la caracterización geométrica, las características de sus componentes constructivos, las condiciones meteorológicas y las cargas internas (Mercado et al. 2011, p. 52).
- SIMEDIF. Se utiliza este software para evaluar el confort térmico a partir de los valores obtenidos en la simulación previa. La versión utilizada para Windows, es diseñada por la Dra. Silvana Flores Larsen en el INENCO (Instituto de Investigaciones en Energía No Convencional, UNSA. -CONICET), con un módulo de cálculo en Python (ingreso de datos en VBasic). La versión primitiva de 1984 para DOS fue realizada por los Dres. Graciela Lesino, Luis Saravia y Dolores Alía (Laboratorio de edificios bioclimáticos, en línea). Es un software que sirve como herramienta para simular el comportamiento térmico de edificios y el nivel de confort térmico según el estándar ANSI/ASHRAE55. Este estándar permite estimar la sensación de confort mediante el PMV (Voto Medio Predicho) y el PPD (Porcentaje de Personas Insatisfechas). El método analítico calcula ambas variables en base al índice de arropamiento, la tasa metabólica, la velocidad de aire, la temperatura operativa y la humedad. El método que predice el PMV refleja el valor medio de los votos emitidos por un grupo numeroso de personas respecto de una escala psicofísica de siete niveles al ser sometidos a diferentes ambientes térmicos. Esta escala va desde: frío ($PMV < -2,5$), fresco ($-2,5 < PMV < -1,5$), ligeramente fresco ($-1,5 < PMV < -0,5$), neutral ($-0,5 < PMV < 0,5$), ligeramente cálido ($0,5 < PMV < 1,5$), cálido ($1,5 < PMV < 2,5$), caliente ($PMV > 2,5$). La zona de confort establece las condiciones en las que el 80% de las personas, en actividad sedentaria o de actividad ligera, encuentran el ambiente térmicamente aceptable.

3. Caracterización del caso de estudio

El caso de estudio considerado en este trabajo, consiste en ocho unidades habitacionales de la planta tipo de un edificio en altura ubicado en la ciudad de San Miguel de Tucumán. El mismo se construyó entre el año 2013 y el 2018. Consiste en un edificio de viviendas, se encuentra en la zona central de la ciudad, entre las cuatro avenidas, en Barrio Sur. Se trata de un edificio de 11 pisos, planta baja y subsuelo (Figura 1). Este se constituye entre medianeras, con un eje principal en sentido norte-sur, y su fachada orientada hacia el este. Las orientaciones norte y sur configuran las medianeras, se abren patios de ventilación en ellas.

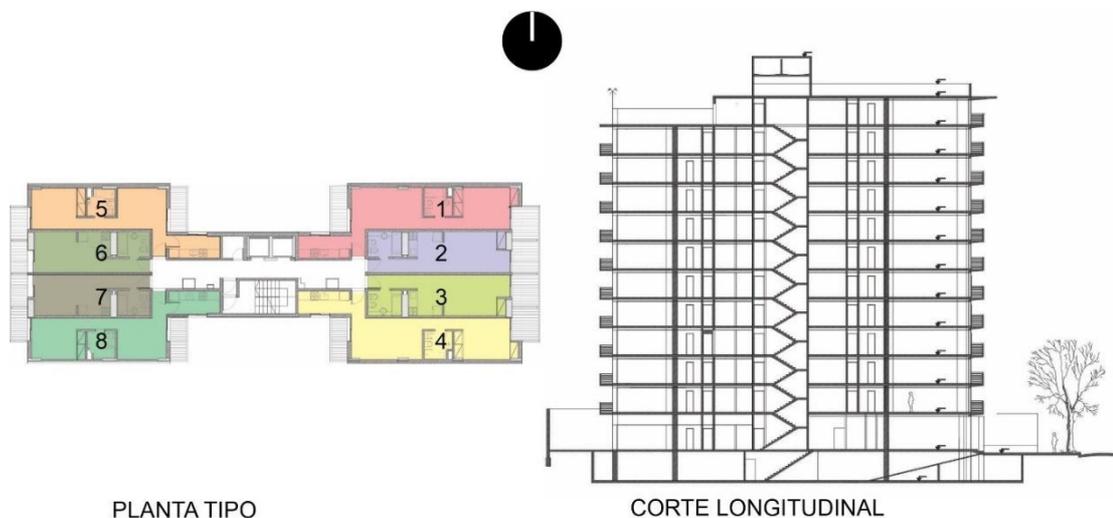


Figura 1. Planimetría completa del caso de estudio. **Fuente:** elaboración propia.

La planta baja, cuenta con cuatro departamentos hacia el contrafrente, dos monoambientes centrales y dos de un dormitorio hacia las medianeras. Las plantas tipo, del piso primero al décimo, se configuran con ocho departamentos cada uno cuatro orientados hacia el frente (unidades 1, 2, 3 y 4) y cuatro hacia el contrafrente (unidades 5, 6, 7 y 8) siendo de mayores dimensiones los primeros. Las unidades 2, 3, 6 y 7 cuentan con un único ambiente mientras que las 1, 4, 5 y 8 son de dos ambientes, un espacio de estar-cocina y un dormitorio. El piso 11 solo presenta cuatro departamentos hacia el frente, dos monoambientes y dos unidades de un dormitorio, y una terraza libre hacia el fondo, la cual no es accesible.

Con respecto a la medianería, actualmente se encuentra entre dos edificios. Hacia el sur, consiste en una edificación previa, no se cuenta con registro de la fecha de construcción, el cual presenta una planta baja y tres pisos. Hacia el norte, se presenta un edificio en altura, construido prácticamente en simultáneo con el caso a analizar, finalizado también en 2018. Esta construcción cuenta con planta baja y ocho niveles superiores.

En cuanto a su materialización, el edificio se resuelve con una estructura portante de hormigón armado, la cual consiste en elementos de carga puntual (columnas) y lineal (tabiques y vigas). Dicha estructura responde a la reglamentación sismorresistente vigente, ya que la ciudad de San Miguel de Tucumán se encuentra en la zona sísmica 2 (CIRSOC, 2018, p. 15.). Los cerramientos verticales exteriores (CVE) son de ladrillo cerámico hueco no portante de 18 cm de espesor revocados en ambas caras, en algunos sectores de la fachada se coloca un revestimiento que simula ser ladrillo a la vista. Los cerramientos verticales interiores (CVI), tabiques divisorios interiores de cada unidad y que separan a las unidades entre sí, son de ladrillo cerámico hueco de 12 cm revocados en ambas caras. Las ventanas y puerta balcón son todas de abrir, resueltas íntegramente en madera (marco y hoja), con vidrio simple de 4 mm.

4. Resultados

4.1. Comportamiento térmico del caso de estudio

4.1.1. Modelo estacionario.

En primera instancia se analiza el comportamiento de la envolvente. Se calcula el coeficiente de transmitancia térmica K , a través del calculador CIDEE-EA (Fernández et al. 2019), el cual responde al procedimiento expresado en la norma IRAM 11601. Una vez obtenido los valores K , se procede a compararlo con los niveles de confort térmico recomendados en la norma para la zona bioclimática II según la norma IRAM 11605 Nivel A: ecológico, Nivel B: recomendado, Nivel C: mínimo y Nivel A/B incorporado como un nivel intermedio por la modificación 1 de la norma IRAM 11900:2019. Para el CVE, se obtiene un K de $1,73 \text{ W/m}^2\text{K}$, nivel C y para la estructura de $\text{H}^\circ\text{A}^\circ$ presente en los muros exteriores, se obtiene un valor igual a $2,56 \text{ W/m}^2\text{K}$, valor que no clasifica dentro de ninguno de los niveles. En cuanto a los cerramientos interiores, el entepiso y el CVI presentan un K $3,26 \text{ W/m}^2\text{K}$ y $2,41 \text{ W/m}^2\text{K}$, respectivamente.

En segunda instancia, se estudia la existencia de puentes térmicos. Un puente térmico se define como la heterogeneidad de un elemento constructivo que forma parte de la envolvente que ocasiona mayor flujo de calor a través de ésta, favoreciendo la condensación superficial (IRAM, 2002). Al disminuir la resistencia térmica respecto al resto de los cerramientos, los puentes térmicos se convierten en partes sensibles de los edificios donde aumenta la posibilidad de producción de condensaciones superficiales, en la situación de invierno o épocas frías (Díaz Regodón y Tenorio Ríos 2005). Para efectuar el cálculo y la verificación de los puentes térmicos, se utiliza el procedimiento de cálculo expresado en la norma IRAM 11605. Dicha norma expresa una relación entre la transmitancia térmica del puente térmico (K_{pt}) y la transmitancia térmica del muro (K_m). Cuando esta relación supera el valor de 1,5 se considera que existe un puente térmico. Para el caso analizado, se considera a la estructura puntual de hormigón armado ($\text{H}^\circ\text{A}^\circ$) como un puente térmico dentro del CVE de ladrillo cerámico hueco. Se obtiene una relación igual a 1,5 con lo cual se define la existencia de un puente térmico.

Para evaluar si es que existe o no riesgo de condensación tanto superficial como intersticial para las tecnologías constructivas exteriores expuestos anteriormente, CVE, se empleó el calculador C-RC (Fernández y Garzón, 2020) a partir del procedimiento y las definiciones expresadas en IRAM11625:2000. Se evalúa también los riesgos de condensación en la estructura de hormigón armado, que se constituyen como puentes térmicos del CVE. Se observa que, la mampostería presenta riesgos de condensación intersticial mientras que la estructura de hormigón presenta tanto superficial como intersticial.

Por último, una vez analizado el comportamiento de la envolvente, se calcula el comportamiento térmico global de las unidades de manera estacionaria a partir del coeficiente volumétrico de calefacción y refrigeración. La Norma IRAM 11604 establece el coeficiente volumétrico de calefacción, (Gcal), como valores máximos admisibles según la ubicación geográfica de la unidad habitacional y su volumen interior. Este coeficiente Gcal es un parámetro global que pondera todos los elementos que intervienen en las pérdidas de calor de un edificio. La herramienta utilizada para determinar Gcal, es el calculador CIDEE-EA (Fernández et.al., 2019). Para determinar el Gcal de las distintas unidades de la planta tipo, se toman 4 casos: unidades 1 y 4, unidades 2 y 3 (idénticos), unidades 5 y 8 y unidades 6 y 7. Para estos cuatro casos analizados, el Gcal admisible es 2,21 y ninguna de las unidades logra un valor inferior a este. Es decir, no verifican lo recomendado por IRAM.

En cuanto al coeficiente volumétrico de refrigeración (GR), la norma IRAM 11659-2 (2007) contempla el control de las ganancias térmicas totales intervinientes en una unidad habitacional. El parámetro global aquí definido que pondera todos los elementos que intervienen en el proceso, es el coeficiente volumétrico de refrigeración admisible (GR_{adm}). En este caso, a diferencia de Gcal, el cálculo contempla las orientaciones como variantes, es por ello que se toman 6 casos para las unidades de análisis: unidad 1, unidades 2 y 3, unidad 4, unidad 5, unidades 6 y 7, y unidad 8. A partir de este análisis, se verifica que solo las unidades 2 y 3 verifican con lo expresado por la norma.

Coeficiente de transmitancia térmica K							
Elemento constructivo	CVE	Entrepiso	CVI	Estructura H°A°			
Coeficiente K W/m²K	1,73	3,26	2,14	2,56			
Nivel de confort higrotérmico	C	-	-	No cumple			
Verificación de puentes térmicos							
	Coeficiente K		Relación Kpt/Km		Verifica		
Mampostería	1,70 W/m²K		1,51		NO		
Estructura H°A°	2,56 W/m²K						
Riesgos de condensación							
Capa del elemento	T	Tr	Condensa	Capa del elemento			
Sup. Interior	13,97	13	NO	Sup. Interior	12	13	SI
	13,20	11	NO		11,02	12	SI
Rev. Interior	3,71	4	SI	Rev. Interior	4,10	2	NO

Mampostería				H°A°			
	2,95	0	NO		3,5	0	NO
Rev. exterior				Rev. exterior			
Coeficiente volumétrico de calefacción y refrigeración (Gcal y GR)							
	Gcal	Gadm	Verifica	GR	GRadm	Verifica	
Unidad 1	3,25	2,213	NO	52.519	34,43	NO	
Unidad 2	2,71	2,213	NO	41,496	47,34	SI	
Unidad 3	2,71	2,213	NO	41,496	47,34	SI	
Unidad 4	3,25	2,213	NO	52,276	34,43	NO	
Unidad 5	3,38	2,213	NO	58,592	34,43	NO	
Unidad 6	2,88	2,213	NO	49,650	47,34	NO	
Unidad 7	2,88	2,213	NO	49,650	47,34	NO	
Unidad 8	3,38	2,213	NO	58.315	34,43	NO	

Tabla 1. Comportamiento térmico en régimen estacionario de las ocho unidades de análisis. **Fuente:** elaboración propia.

4.2. Propuesta de rehabilitación

A modo de rehabilitación, se propone incrementar aislación térmica en los elementos que componen la envolvente exterior y cerramientos que dividen unidades, a fin de mejorar las prestaciones térmico-energéticas con el menor impacto ambiental posible. Para ello, se plantea una solución que consiste en incorporar una capa de aislante térmico desde la cara interior del CVE. Si bien, la incorporación de aislante en la cara exterior es más frecuente, ya que ofrece una serie de ventajas importantes, como la prevención de la condensación de humedad, la eliminación sencilla de los puentes térmicos y el aprovechamiento de la masa térmica del edificio, no siempre resulta viable. Por el contrario, la incorporación de aislante en la cara interior, se presenta como una solución, de menor EE, pero ideal para rehabilitar unidades entre medianeras, donde no se cuenta con margen en el exterior. A su vez, esta alternativa, no supone la modificación de fachadas ni obliga a sus usuarios a llegar a un acuerdo común para intervenir en el edificio en su globalidad, pudiendo realizar las modificaciones de manera paulatina en cada una de las unidades. Cabe destacar, que la incorporación de aislación térmica desde el interior requiere un 50 % menos de inversión con respecto a su incorporación desde el exterior (Kolaitis et al. 2013, p. 130.).

Para el CVE y CVI, la propuesta consiste en colocar una capa de 0,05 m de lana de roca mineral hacia el interior y una capa de placa de yeso cartón. La estructura resistente de dicha solución, se llevará a cabo con listones de madera de pino. En cuanto a los entrepisos, se propone incorporar un aislante térmico encima de la losa. Consiste en una plancha de poliestireno expandido de 0,05 m de espesor entre la estructura y el contrapiso (Figura 2).

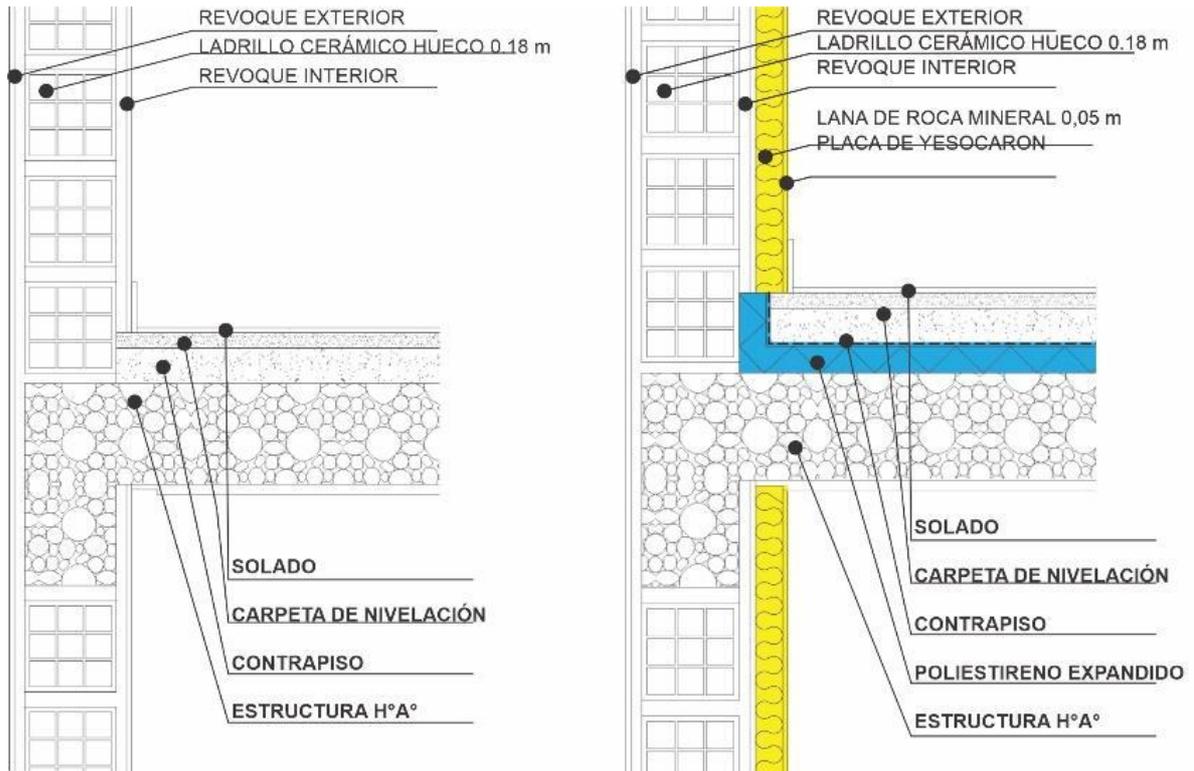


Figura 2. Detalle constructivo CVE y entrapiso original y con propuesta de rehabilitación. **Fuente:** elaboración propia

Los materiales propuestos para la rehabilitación se consideran de bajo impacto. La madera, utilizada como estructura para contener al aislante en paredes, se considera un material de construcción con balance de carbono negativo, ya que el CO₂ almacenado en los árboles es mayor a las emisiones asociadas a la cosecha, transportes y procesamiento (Hernández y Elgueta, 2020, p. 8). Presenta un coste energético bajo, en comparación con los materiales que constituyen el actual cerramiento del edificio. La madera supone un consumo energético en su proceso de elaboración y puesta en obra de 2,10 MJ/kg y unas emisiones de 0,06 kg de CO₂/kg (Argüello Méndez y Cuchí Burgos, 2008, p. 28). En esta última consideración, se estudian las emisiones desde su proceso de fabricación y no se tienen en cuenta las absorciones de CO₂ de los árboles.

Por otro lado, la lana mineral de roca se considera un material que presenta un proceso de fabricación ambientalmente menos dañina que otros aislantes (Belando y López-Mesa, 2010, p. 1351). Es un material que se obtiene a partir de elementos naturales.

En cuanto a la solución propuesta para la losa, se incorpora poliestireno expandido (EPS) como aislante. Arthuz-López y Pérez-Mora, afirman que el EPS es un material químicamente inerte no biodegradable, es decir, que no se descompone, no se desintegra, no desaparecen en el medio ambiente y no contiene Clorofluorocarburos (CFC), por consiguiente, los EPS no puede químicamente contaminar el suelo, el agua o el aire (2019). Sin embargo, puede ser un problema ambiental si no se reciclan porque es considerado como un material eterno. Estos compuestos tienen varias ventajas incluyendo el bajo costo, baja densidad, baja producción de energía, baja emisión de CO₂ y renovabilidad. A su vez, presenta un volumen muy grande en relación al material, 98 % de aire y el 2 % de la materia prima: poliestireno (Schmidt et al. 2011, p. 930).

A partir de la propuesta de rehabilitación efectuada, se analiza el comportamiento térmico de las ocho unidades en régimen estacionario, estacionario con corrección dinámica y dinámico, de manera comparativa con los casos originales.

4.3. Análisis comparativo del comportamiento térmico-energético

4.3.1. Modelo estacionario

Con la incorporación de la propuesta de rehabilitación, se logran importantes mejoras en el coeficiente de transmitancia térmica. En la Tabla 2, se exponen los valores de transmitancia térmica obtenidos para los distintos elementos constructivos del caso original y propuesta de rehabilitación. Se muestra también el nivel de confort higrotérmico alcanzado y el porcentaje de mejora que constituye la propuesta de rehabilitación en relación a la situación existente. En el caso de la propuesta de rehabilitación, se alcanza el nivel A, para el CVE y AB para los elementos exteriores de hormigón armado, para los cerramientos interiores, CVI y entrepiso, no existen valores normados de aislación térmica en IRAM para ser comparados. En todos los casos, la mejora alcanzada, con respecto al caso original es superior al 70 %.

Elemento constructivo	Caso original		Propuesta de rehabilitación		Mejora alcanzada [%]
	Coeficiente K [m²K/W]	Nivel de confort higrotérmico	Coeficiente K [m²K/W]	Nivel de confort higrotérmico	
CVE	1,73	Nivel C	0,45	Nivel A	73,98
Entrepiso	3,26	-	0,58	-	82,20
CVI	2,14	-	0,46	-	78,50
Estructura H°A°	2,56	NO clasifica	0,47	Nivel AB	81,64

Tabla 2. Coeficiente de transmitancia térmica d ellos distintos elementos de la envolvente. **Fuente:** elaboración propia.

Con respecto a los puentes térmicos, en la tabla 3, puede observarse que, con la incorporación de la propuesta de rehabilitación, se logran eliminar los puentes térmicos, a diferencia del caso original.

Elemento constructivo	Caso original			Propuesta de rehabilitación		
	Coeficiente K	Relación Kpt/Km	Verifica	Coeficiente K	Relación Kpt/Km	Verifica
Mampostería	1.70	1.51	NO	0.45	1.04	SI
Estructura H°A°	2.58			0.47		

Tabla 3. Coeficiente de transmitancia térmica de los distintos elementos de la envolvente. **Fuente:** elaboración propia.

En cuanto a los riesgos de condensación, con la incorporación del aislante propuesto, se logran eliminar todo tipo de riesgos existentes, tanto superficial como intersticial. En la tabla 4, se muestran los valores obtenidos en la superficie y cada una de las capas interiores de la mampostería y estructura portante.

Caso original							
Capa del elemento	T	Tr	Condensa	Capa del elemento	T	Tr	Condensa
Sup. Interior	13,97	13	NO	Sup. Interior	12	13	SI
	13,20	11	NO		11,02	12	SI
Rev. Interior	3,71	4	SI	Rev. Interior	4,10	2	NO

Mampostería				H°A°			
Rev. exterior	2,95	0	NO	Rev. exterior	3,5	0	NO
Propuesta de rehabilitación							
Capa del elemento	T	Tr	Condensa	Capa del elemento	T	Tr	Condensa
Sup. Interior	17,80	13	NO	Sup. Interior	18	13	NO
Placa de yeso	17,6	13	NO	Placa de yeso	17,50	13	NO
Foil de aluminio	17,60	1,5	NO	Foil de aluminio	17,50	1	NO
Lana mineral	5,50	1	NO	Lana mineral	5,20	0,5	NO
Rev. interior	5	1	NO	Rev. interior	5	0	NO
Mampostería	3	0,5	NO	H°A°	3	0	NO
Rev. exterior	2	0,5	NO	Rev. exterior	2	0	NO

Tabla 4. Comparación entre temperatura de rocío y temperatura interior en las distintas capas de la mampostería exterior para la situación original y con propuesta de rehabilitación. **Fuente:** elaboración propia.

En cuanto a los coeficientes globales de calefacción y refrigeración, Gcal y GR, los valores obtenidos para los casos originales no lograban alcanzar los valores recomendados por IRAM. En la tabla 5, se muestran los valores obtenidos para los casos originales y las propuestas de rehabilitación y el porcentaje de mejoras que estas representan. En cuanto a Gcal, las mejoras mencionadas oscilan entre el 18,8 % y el 89,88 %, las superiores son aquellas generadas en las unidades de dos ambientes, debido a que se aísla una mayor superficie de cerramientos exteriores. En cuanto a GR, las mejoras ocasionadas en la propuesta, consiguen alcanzar los estándares mínimos recomendados por la norma, estas son superiores a un 40 %, en todos los casos

Unidades	Caso original			Propuesta de rehabilitación			Mejora entre original y propuesta [%]
	Gcal	Gadm	Verifica	Gcal	Gadm	Verifica	
1 y 4	3,25	2,213	NO	1,43	2,213	SI	56
2 y 3	2,71	2,213	NO	2,20	2,213	SI	18,8
4 y 8	3,38	2,213	NO	1,78	2,213	SI	89,88
6 y 7	2,88	2,213	NO	2,095	2,213	SI	27,36
Unidades	GR	GR-adm	Verifica	GR	GR-adm	Verifica	Mejora entre original y propuesta [%]

1	52.519	34,43	NO	26,42	34,43	SI	49,69
2 y 3	41,496	47,34	SI	22,94	47,34	SI	44,72
4	52,276	34,43	NO	26,21	34,43	SI	49,86
5	58,592	34,43	NO	29,05	34,43	SI	50,47
6 y 7	49,650	47,34	NO	24,58	47,34	SI	50,49
8	58.315	34,43	NO	29,56	34,43	SI	49,31

Tabla 5. Coeficiente volumétrico de calefacción y refrigeración para el caso original y la propuesta de rehabilitación en todas las unidades y verificación con valores admisible según normas. **Fuente:** elaboración propia.

A partir de este primer análisis, se verifica que, el caso original no cumple con ninguna de las disposiciones presentes en la normativa analizada. En el caso de la propuesta de rehabilitación, sí se evidencian mejoras sustanciales en el comportamiento térmico del modelo estacionario, que verifican con las normas locales.

4.3.2. Modelo estacionario con corrección dinámica

A partir del aplicativo en línea del Ministerio de Desarrollo productivo, se determina el IPE y se obtiene la etiqueta de eficiencia energética con su respectiva clasificación para las ocho unidades analizadas. Se define al IPE mismo como el índice del uso final de energía convencional que contribuye a la demanda energética de la vivienda mediante los siguientes servicios: la calefacción, la refrigeración, la iluminación artificial de interiores y el calentamiento de agua sanitaria, en kWh/m²año (IRAM, 2017). Para la ciudad de San Miguel de Tucumán, las clases de EE van desde <20 kWh/m²año, para la clase A hasta >201 kWh/m²año clase G.

Para llevar a cabo el proceso de etiquetado, se cargaron los valores correspondientes a la materialidad del edificio, según lo indicado previamente. Se contemplan a las unidades B y C y F y G como idénticas entre sí. En la actualidad las unidades no cuentan con red de gas natural, por lo que se considera a la electricidad como único vector energético. Para calefacción y refrigeración, se simula un equipo de aire acondicionado tipo Split frío-calor. Para el caso de la iluminación, se tienen en cuenta los centros existentes, y artefactos de iluminación LED. En la situación particular de la generación de agua caliente sanitaria, el edificio cuenta con un sistema central, caso no contemplado para el cálculo. Es por ello que no se carga ningún sistema de agua caliente en el aplicativo, y se deja que el mismo estime un consumo por defecto.

	Caso original		Propuesta de rehabilitación		% Mejora
	IPE KWh/m ² año	Clase EE	IPE KWh/m ² año	Clase EE	
Unidad 1	284	G	108	D	61,9
Unidad 2 y 3	150	E	99	D	34
Unidad 4	306	G	110	D	64,05
Unidad 5	275	G	111	D	59,63
Unidad 6 y 7	160	F	100	D	37,5
Unidad 8	290	G	113	D	61,03

Tabla 5. IPE y clase de EE para las distintas unidades del caso original y con propuesta de rehabilitación. **Fuente:** elaboración propia.

En la tabla 5, se exhiben los valores de IPE obtenidos para cada unidad, con su respectiva clase de EE. En la situación original, para las unidades 1, 4, 5 y 8 se obtiene un IPE superior a 201 KWh/m²año, posicionándolas en la clase G, es decir el nivel más bajo de eficiencia energética. Para los casos 6 y 7, se obtiene una clasificación F y para 2 y 3 una E. Esto evidencia posiciones en los rangos más bajos de la etiqueta establecida para San Miguel de Tucumán. Las unidades de un ambiente (1, 2, 6 y 7) evidencian un mejor desempeño energético, esto se debe a la menor cantidad de superficie adyacente al espacio exterior. Cabe destacar que hay una importante diferencia entre los IPE obtenidos para las distintas unidades del caso existente, de hasta el 100 %.

Para la propuesta de rehabilitación, los valores IPE obtenidos para las distintas unidades, resultan muy similares entre sí, con una diferencia inferior al 15 %. En todos los casos, la clase de EE obtenida es D; es decir que, si bien se logran mejorar los IPE, no se llega a alcanzar los mejores niveles de eficiencia energética.

4.3.3. Modelo dinámico

Para generar el modelo de simulación de del edificio, se lo simplifica a tres niveles. En esta simplificación, el nivel central corresponde a la planta tipo con las ocho unidades analizadas en el presente trabajo. Se genera una zona térmica para cada una de las unidades habitacionales (unidad 1 a unidad 8) otra para el sector de palier y un nivel superior e inferior como únicas zonas térmicas simulando el piso 6 y 8 (Figura 8).

En cuanto a las superficies se definen las exteriores para cada zona térmica. Se definen las ventanas como tales. Para simular las sombras proyectadas por los balcones se generan aleros sobre cada una de las unidades. Se crean parantes verticales exteriores para simular las medianeras e interiores para simular la proyección del edificio en altura. Se cargan valores de materialidad correspondientes a aquellos descriptos previamente con las propiedades térmicas definidas por las normas IRAM.

Como el objetivo es conocer la temperatura interior sin acondicionamiento artificial, no se considera ningún tipo de sistema activo de calefacción ni de refrigeración encendido. Tampoco se considera la aplicación de estrategias de refrigeración o calefacción pasivas por parte del usuario (como ser apertura de ventanas).

Se obtiene como resultado la temperatura interior de cada local. Se analiza de manera comparativa dichos valores con la temperatura del aire exterior. Debido al clima mixto se estudia por separado el verano e invierno.

Como resultado final de este trabajo de simulación térmica, se procede a comparar los resultados del caso original con los de las propuestas de mejora. En la figura 9 se exhiben los gráficos de temperatura para ambos casos de manera comparativa. La franja gris, marca la zona de confort teórica adoptada, la línea roja indica los rangos de temperatura (máxima y mínima) existentes en el caso original y la línea verde los rangos de temperatura de la propuesta de mejora. A partir de allí, puede distinguirse de manera clara como, a partir de las propuestas de mejoras, la temperatura interior se aproxima más a la zona de confort.

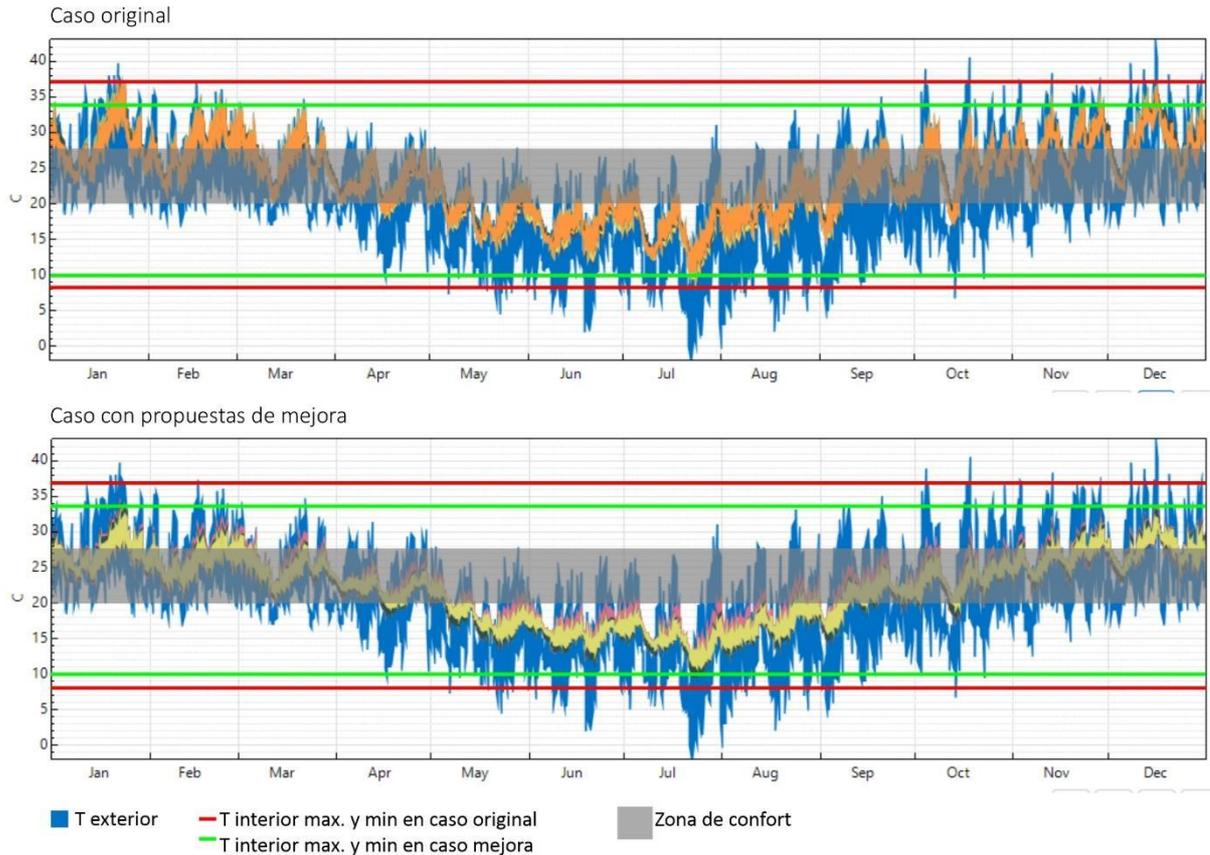


Figura 3. Comparación de valores de temperatura interior y exterior para caso original y con propuesta de rehabilitación. **Fuente:** Elaboración propia.

Se realiza el análisis del confort térmico según el estándar ANSI/ASHRAE 55 a partir del software SIMEDIF, en su última versión, 2.0. para ello, se emplean los datos de temperatura y humedad relativa registrados obtenidos a partir de la simulación térmica efectuada con EnergyPlus, suponiendo que la temperatura operativa es similar a la temperatura calculada.

La imagen 10, muestra los resultados de PMV para la situación de verano. Allí se evidencia una sensación de confort mejorada, para la propuesta de rehabilitación, donde se elimina por completo la sensación *caliente*.

En la figura 11, se evidencia el cambio en la situación confort durante el invierno. En la propuesta de rehabilitación, se eliminan por completo la sensación de frío y solo se perciben sensaciones neutral y ligeramente fresco. Sin embargo, cabe mencionar que disminuye la sensación neutral con respecto a la situación original.

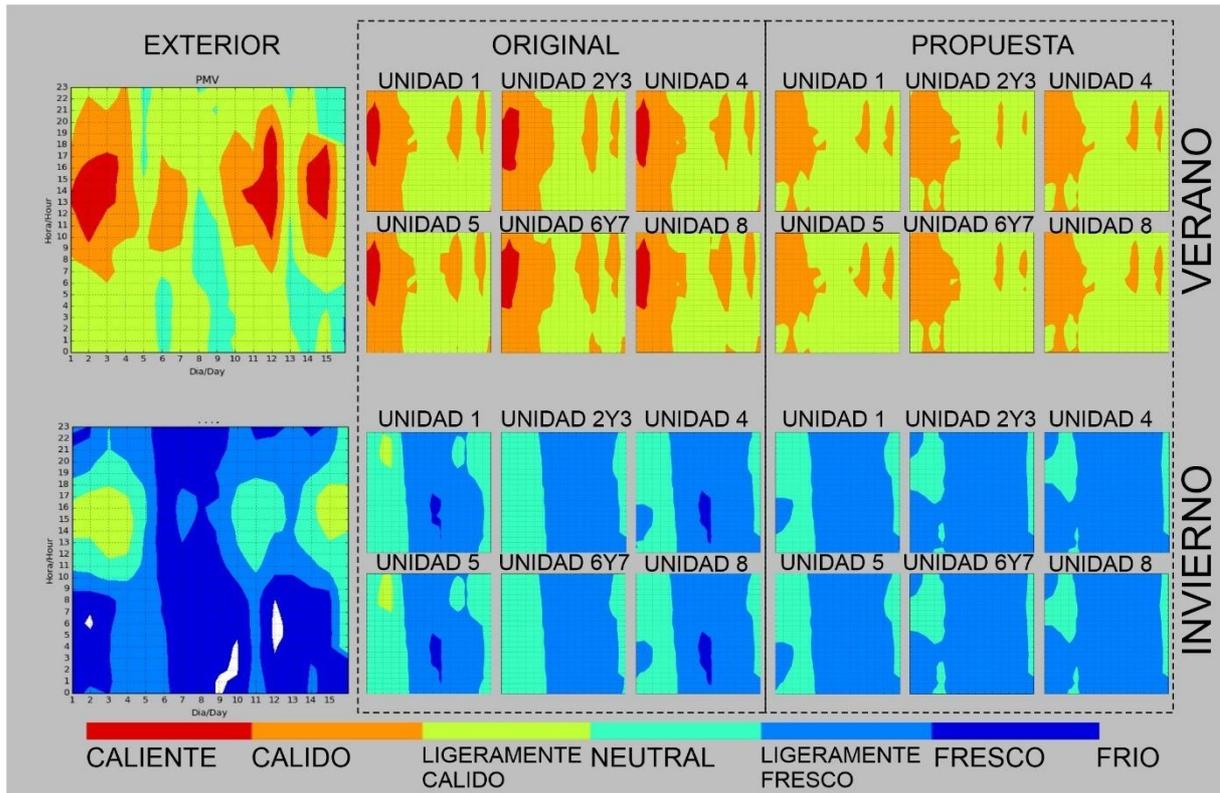


Figura 4. PMV en verano e invierno para caso original y con propuesta de rehabilitación. **Fuente:** Elaboración propia.

5. Conclusiones

El edificio analizado en el presente trabajo, cuyos muros se materializan con ladrillo hueco, responde a una solución constructiva típica de edificios en altura presentes en la ciudad de San Miguel de Tucumán, 60 % (Guijarro et al., p. 152). Asimismo, este tipo de edificios continúa reproduciéndose, no solo es las zonas de alta densidad de la ciudad sino también en otras zonas residenciales de mediana y baja densidad, lo cual indicaría la continuidad del modelo en los próximos años.

En este caso de estudio, se evidencia una edificación sin criterios de sustentabilidad. Sus propiedades térmicas no verifican con las normas locales (IRAM). La clase de EE obtenida corresponde a las dos categorías más deficientes. El estado de confort interior en las estaciones críticas (analizada a partir de un modelo de simulación dinámica) determinan una situación de incomfort. Esto implica un alto consumo energético y emisiones de gases de efecto invernadero para alcanzar las condiciones deseadas. La propuesta de rehabilitación efectuada, genera una mejora sustancial en todos los ítems mencionados. Sin embargo, no llega a alcanzar los mejores niveles de eficiencia energética, por lo que debe continuar indagando sobre otras alternativas de diseño y tecnológicas para alcanzarlos.

Las edificaciones sustentables están poniéndose en auge a nivel mundial, existen premios e incentivos a las construcciones sustentables, a la vez que este concepto les otorga un valor agregado. Buzaglo Dantas, et al. m, mencionan una serie de políticas de incentivos económicos, en su mayoría impositivos, en diversos países (Alemania, Holanda, Italia, Australia, entre otros) fomentando la sustentabilidad en las edificaciones. Por otro lado, una edificación sustentable supone un ahorro energético a lo largo de su vida útil que la volvería, a mediano plazo más económica. Sin embargo, en nuestro medio, la lógica del mercado inmobiliario de edificios residenciales, tiende a construir para la venta de unidades a inversores cuyo destino final será la renta de los inmuebles. Esta “lógica” da lugar a edificaciones ineficientes. Actualmente el interés está específicamente puesto

en los tiempos de construcción y cantidad de unidades. Las unidades habitacionales, son cada vez menos confortables desde el punto de vista térmico. Frente a este escenario, resulta fundamental una intervención del estado que no permita bajar los estándares de calidad ambiental en las construcciones.

Si bien es sabido que cuanto antes se incorporen estrategias de eficiencia energética, en la etapa de proyecto, resultan menos costos y más beneficiosos. Resulta más beneficioso la generación de un único proyecto con criterios de sustentabilidad y bioclimatismo desde su concepción original. De esta manera, es importante plantear estrategias para rehabilitar edificios existentes, como alternativa para la sustentabilidad y el confort de la multiplicidad de edificios en altura presentes en la ciudad de San Miguel de Tucumán.

6. Bibliografía

Azqueta, P. (2017). *Manual práctico de aislamiento térmico para una construcción sustentable*. (2da ed.). Asociación Argentina de Poliestireno Expandido.

Becqué, R. et al. (2016). *Como acelerar la eficiencia en la edificación. Ocho medidas para los líderes urbanos*. World Resources Institute.

Belando, J., y López-Mesa, B. (2010). Utilización del Análisis de Ciclo de Vida (ACV) en la selección de cubiertas planas de edificación. XIV International congress on project engineering. Madrid, España.

Buzaglo Dantas, M, et al. (2015). *Mapeo de incentivos económicos para la construcción sostenible*. CBIC. https://cbic.org.br/wp-content/uploads/2017/11/Mapeamento_de_Incentivos_Economicos_Para_a_Construcao_Sustentavel_2015_esp-1.pdf

Cutruneo, J. P. (2012). Hacia el edificio de renta. La transformación de la vivienda en altura en manos de los arquitectos (Rosario, 1920-1948). *Dearq*, 10, 152–161. <https://doi.org/10.18389/dearq10.2012.14>

Discoli, C. A., Martini, I., Viegas, G. M., Barbero, D. A., & Rodriguez, L. G. (2016). Pautas para el reciclado masivo de la envolvente edilicia residencial.

Elsinger, D., Fernández, A., y Garzón, B. (2020). Calculador integral de eficiencia energética de la envolvente arquitectónica: CIDEE-EA. *Avances en Energías Renovables y Medio Ambiente*, 24.

Guijarro, J. L., Ajmat, R. F., Soldati, M. E., & De Innocentiis, L. M. (2012). Relevamiento de edificios en altura en San Miguel de Tucumán. Su envolvente y condiciones ambientales. *Avances en Energías Renovables y Medio Ambiente-AVERMA*, 16, 149-156.

Kolaitis, Dionysios I. Malliotakis, Emmanouil; Kontogeorgos, Dimos A.; Mandilaras, Ioannis; Katsourinis, Dimitrios I. y Founti, Maria A. (2013). Comparative assessment of internal and external thermal insulation systems for energy efficient retrofitting of residential buildings. *Energy and Buildings*. Volumen: 64. 123-131.

Kuchen, E., y Kozak, D. (2021). Transición energética Argentina. El nuevo estándar de eficiencia energética en la evaluación de la vivienda social. Caso de estudio: vivienda de barrio Papa Francisco. *Revista hábitat sustentable*, 10(1), 44-55.

Nikolaidis, P.A. Pilavachi, A.A. Chletsis. (2009) Economic evaluation of energy saving measures in buildings, *Applied Energy* 86 (12) 2550–2559.

NORMA IRAM 11549 - Instituto Argentino de Normalización y Certificación. Acondicionamiento térmico de edificios. Vocabulario. Tercera edición, 2002.

NORMA IRAM 11601 - Instituto Argentino de Normalización y Certificación. Aislamiento térmico de edificios. Métodos de cálculo. Propiedades térmicas de los componentes y elementos de construcción en régimen estacionario, 2002.

NORMA IRAM 11604 - Instituto Argentino de Normalización y Certificación. Acondicionamiento térmico de edificios. Verificación de sus condiciones higrotérmicas. Ahorro de energía en calefacción. Coeficiente volumétrico G de pérdidas de calor. Cálculo y valores límites. Segunda edición, 2001.

NORMA IRAM 11605 - Instituto Argentino de Normalización y Certificación. Acondicionamiento térmico de edificios. Condiciones de habitabilidad en edificios, 2002.

NORMA IRAM 11625 - Instituto Argentino de Normalización y Certificación. Verificación del riesgo de condensación por vapor de agua, 2000.

NORMA IRAM 11659-2 - Instituto Argentino de Normalización y Certificación. Acondicionamiento térmico de edificios. Verificación de sus condiciones higrotérmicas. Ahorro de energía en refrigeración. Primera edición, 2007.

NORMA IRAM 11900 - Instituto Argentino de Normalización y Certificación. Modificación N°1 a la Norma IRAM 11900:2017-12, 2019.

Papadopoulos, A. M. (2005). State of the art in thermal insulation materials and aims for future developments. *Energy and buildings*, 37(1), 77-86.

Reglamento INPRES-CIRSOC103. (2018). Recuperado de http://contenidos.inpres.gob.ar/docs/INPRES-CIRSOC-103_Parte_I-Reglamento.pdf

Rivero Camacho, C.; Pereira, J.; Gomes, M. G. y Marrero, M. (2018). Huella de carbono como instrumento de decisión en la rehabilitación energética. Películas de control solar frente a la sustitución de ventanas. *Revista hábitat sustentable*, 8(2), 20-31.

Tommerup, S. (2006). Energy savings in Danish residential building stock. *Energy and Buildings* 38 (2006) 618–626.

Urteneche, E.; Martini, I.; Barbero, D. A. y Discoli, C. A. (2021) Estado del arte de la envolvente edilicia del subsector salud en la Microrregión Gran La Plata: Su estudio como punto de partida para el mejoramiento de la eficiencia energética a partir del reciclado edilicio; *Asociación Argentina de Energía Solar; Avances en Energías Renovables y Medio Ambiente*; 25; 49-59

Viegas, G. M., Barbero, D. A., Chévez, P. J., Martini, I., & Discoli, C. A. (2020). Reciclado masivo de la envolvente urbano-edilicia basado en procesamiento digital de imágenes, La Plata, Argentina. *Revista de Urbanismo*, 43, 151. <https://doi.org/10.5354/0717-5051.2020.57522>