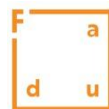




UNIVERSIDAD
DE LA REPUBLICA
URUGUAY



Facultad de Arquitectura,
Diseño y Urbanismo
UDELAR

Implicancias energéticas y de condiciones de confort térmico al considerar construcciones livianas para el clima de Uruguay

Arq. Magdalena Camacho Roberts

Programa de Posgrado en Arquitectura
Facultad de Arquitectura, Diseño y Urbanismo
Universidad de la República

Montevideo – Uruguay
Noviembre de 2023



UNIVERSIDAD
DE LA REPUBLICA
URUGUAY

Implicancias energéticas y de condiciones de confort térmico al considerar construcciones livianas para el clima de Uruguay

Tesis de Maestría presentada al Programa de Posgrado en Arquitectura, Facultad de Arquitectura Diseño y Urbanismo de la Universidad de la República, como parte de los requisitos necesarios para la obtención del título de Magíster en Arquitectura

Director de tesis:

Dr. Ing. Roberto Lamberts, UFSC, Brasil

Codirectora:

Arq. Alicia Picción

Directora académica:

Dra. Arq. Gemma Rodríguez

728.06 Camacho Roberts, Magdalena

Implicancias energéticas y de condiciones de confort térmico al considerar construcciones livianas para el clima del Uruguay / Magdalena Camacho Roberts. – Montevideo : Udelar FADU. Programa de Maestría en Arquitectura, 2023.

96 p.; 30 cm.

Bibliografía: p. 70-72

1. Tesis de posgrado. 2. Edificios – Condiciones microclimáticas interiores.
3. Estrategias de diseño biclimático. 4. Condiciones de confort térmico

Tesis de Maestría

Autora: Magdalena Camacho Roberts

Tutor: Dr. Ing. Roberto Lamberts, UFSC, Brasil

Co-tutora: Arq. Alicia Picción

Integrantes del tribunal de la defensa de tesis:

Arq. Virginia Casañas

Ing. Pedro Galione

Ing. Juan M. Rodríguez

Fecha _____

Calificación _____

Agradecimientos

Esta tesis ha obtenido una beca de financiación de la Comisión Académica de Posgrados (CAP) a través del llamado de Becas de apoyo para la finalización de estudios de posgrado en la Udelar, Maestría, 2020.

Agradezco a mis tutores por la dedicación y el compromiso en este largo camino.

Agradezco a mis compañeros de trabajo por los invaluable intercambios, el aliento continuo y la ayuda siempre presente.

Agradezco a mi familia y amigos por ser mi soporte y contención.

Resumen

Este trabajo aborda el tema del comportamiento térmico de una construcción liviana en dos localidades de Uruguay para un caso de estudio. A partir de simulación computacional se compara la demanda energética en calefacción y refrigeración, la temperatura del aire interior y las horas con temperatura dentro del rango de confort para dos viviendas con diferentes sistemas constructivos: uno pesado (correspondiente a un sistema tradicional) y otro liviano (sistema constructivo *Steel frame*). A partir de los resultados obtenidos, se seleccionan determinadas herramientas de diseño arquitectónico para mejorar el comportamiento del caso con sistema constructivo liviano. Estas estrategias son: incorporación de protecciones solares exteriores móviles, exteriores fijas, interiores móviles, sombreadamiento exterior, incorporación de masa térmica en cerramientos horizontales, mejora de la ventilación, factor de huecos e incidencia de la carga de ocupación. Se estudian por separado para comprender la incidencia de cada una de ellas en los diferentes indicadores. Posteriormente, a partir de un modelo de decisión multicriterio basado en rankings *TOPSIS*, se seleccionan las estrategias más eficientes y se realizan tres combinaciones: básica, arquitectura y arquitectura + usuario, agrupadas según el momento de la toma de decisión. Los resultados obtenidos al combinar las estrategias muestran, para las dos localidades, una reducción significativa en la demanda de energía, resultando 26 % (Montevideo) y 35 % (Salto) de la demanda total respecto al caso base. También un aumento en las horas en condiciones de confort respecto al caso base de 27 % para Montevideo y 41 % para Salto, y una reducción en la amplitud térmica interior para las dos localidades. Se destaca la importancia de seleccionar más una estrategia para el mejor comportamiento energético y condiciones de confort para un sistema liviano, siendo relevantes el control de radiación solar sobre la envolvente y la incorporación de masa térmica, para las dos localidades estudiadas. Asimismo, queda en evidencia la incidencia del factor forma en la toma de partido y el peso relativo del cerramiento horizontal en el comportamiento térmico de un local.

Palabras clave: sistema constructivo liviano, demanda energética, condiciones de confort, estrategias de diseño.

Abstract

This work studies the thermal behavior of a lightweight construction system for two cities in Uruguay based on a case study.

Two houses with different construction systems are studied: one with heavyweight system (corresponding to a traditional system) and another with lightweight system (Steel frame). The energy demand for heating and cooling, the indoor air temperature and the hours with temperatures within the comfort range are compared by using computer simulation. Based on the results obtained, certain architectural design tools are selected to improve the behavior of the case with the lightweight construction system. These strategies are: incorporation of solar protection (mobile exterior, fixed exterior, mobile interior), exterior shading, incorporation of indoor thermal mass, improvement of ventilation, window to wall ratio and incidence of occupancy load.

They are studied separately to understand the incidence of each of them according to the different indicators. Subsequently, from a multi-criteria decision model based on rankings TOPSIS, the most efficient strategies are selected and three combinations are made: basic, architecture and architecture + user, grouped according to the moment of decision making. The results obtained by combining the strategies show, for the two localities, a significant reduction in energy demand, resulting in 26% (Montevideo) and 35% (Salto) of the total demand with respect to the base case. Also an increase in hours in comfort conditions with respect to the base case of 27% for Montevideo and 41% for Salto, and a reduction in the interior thermal amplitude for the two locations. The importance of selecting one more strategy for the best energy behavior and comfort conditions for a lightweight system is highlighted, being relevant the control of solar radiation on the envelope and the incorporation of thermal mass, for the studied localities. Likewise, the incidence of the form factor and the horizontal enclosure in the thermal behavior of a premises is evident.

Keywords: lightweight construction system, energy demand, comfort conditions, design strategies.

Tabla de contenido

LISTADO DE FIGURAS.....	15
LISTADO DE TABLAS	16
1 INTRODUCCIÓN	1
1.1 JUSTIFICACIÓN	1
1.2 ALCANCE.....	7
1.3 OBJETIVOS.....	7
1.4 METODOLOGÍA.....	8
1.5 ESTRUCTURA DE LA TESIS	11
2 ESTADO DEL ARTE	12
2.1 SISTEMAS CONSTRUCTIVOS LIVIANOS.....	12
2.1.1 CLASIFICACIÓN	13
2.1.2 COMPONENTES	15
2.1.3 CARACTERÍSTICAS	16
2.2 EXPERIENCIAS INTERNACIONALES Y REGIONALES.....	17
2.3 SITUACIÓN NACIONAL.....	18
3 ESTUDIO DE CASO	21
3.1 CASO DE REFERENCIA.....	21
3.1.1 ASPECTOS DIMENSIONALES.....	21
3.1.2 ASPECTOS CONSTRUCTIVOS	22
3.1.3 ASPECTOS FUNCIONALES	24
3.2 CASO BASE.....	25
3.2.1 ASPECTOS CONSTRUCTIVOS	25
4 SIMULACIÓN ENERGÉTICA.....	28
4.1 CONDICIONES DE SIMULACIÓN	28
4.1.1 MÓDULOS UTILIZADOS	28
4.1.2 ZONAS CLIMÁTICAS	29
4.1.3 ZONAS TÉRMICAS.....	29
4.1.4 INDICADORES ENERGÉTICOS Y DE CONDICIONES DE CONFORT.....	30
4.2 VERIFICACIÓN DE MODELOS SELECCIONADOS.....	31
4.3 PROPUESTAS RELACIONADAS AL DISEÑO ARQUITECTÓNICO	36

4.3.1	PROTECCIONES SOLARES	37
4.3.2	MASA TÉRMICA	39
4.3.3	VENTILACIÓN CONTINUA (VC).....	39
4.3.4	SOMBREAMIENTO EXTERIOR (SOMB EXT)	40
4.3.5	FACTOR DE HUECOS (FH)	40
4.3.6	ORIENTACIÓN SOLAR	41
4.3.7	VARIACIÓN EN LA OCUPACIÓN.....	41
5	RESULTADOS	42
5.1	MONTEVIDEO	42
5.1.1	DEMANDA ENERGÉTICA.....	42
5.1.2	FLUCTUACIONES LIBRES.....	49
5.1.3	SELECCIÓN DE ESTRATEGIAS	51
5.2	SALTO	55
5.2.1	DEMANDA ENERGÉTICA.....	55
5.2.2	FLUCTUACIONES LIBRES.....	60
5.2.3	SELECCIÓN DE ESTRATEGIAS	62
6	CONSIDERACIONES FINALES	65
	FUTURAS LÍNEAS DE INVESTIGACIÓN	69
	REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	70
	ANEXOS	73
	MÓDULOS ENERGYPLUS	73
	RELEVAMIENTO DE CASOS.....	78
	MONTEVIDEO.....	78
	TACUAREMBÓ	80
	SALTO	82
	CASO SELECCIONADO.....	83
	CASO SELECCIONADO.....	83

Listado de figuras

Figura 1. Variación de temperatura media mensual de Montevideo (estaciones Prado y Carrasco) y Salto (Fuente: INUMET)	2
Figura 2. Valores diarios de temperatura exterior y radiación solar en plano horizontal, para Montevideo. Fuente: elaboración propia con datos de LES	3
Figura 3. Valores diarios de temperatura exterior y radiación solar en plano horizontal, para Salto.....	3
Figura 4. Irradiación solar global en un plano horizontal para Montevideo (A) y Salto (B). Fuente: LES	4
Figura 5. Carta bioclimática para la ciudad de Salto. Fuente: : Picción y Millicua, 2005.....	5
Figura 6. Carta bioclimática para la ciudad de Montevideo. Fuente: Picción y Millicua, 2005.....	5
Figura 7. Esquema metodológico. Fuente: elaboración propia.....	9
Figura 8. Ejemplo de panel multicapa Steel Frame. Fuente: www.https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Steel_frame_de_Barbieri.png?uselang=es	13
Figura 9. Ejemplo de panel multicapa Wood Frame. Fuente: https://www.octonalinvest.com/wood-framing	14
Figura 10. Ejemplo de panel multicapa. Fuente: https://aisla.pe/panel-sandwich-termoaislante/	14
Figura 11. Ejemplos de terminaciones de steel framing. Fuente: https://procesosconstructivos.files.wordpress.com/2013/05/ficha-26-sistema-steel-framing.pdf	16
Figura 12. Caso seleccionado para la simulación	21
Figura 13. Unidades habitacionales seleccionadas: A3 y A13	30
Figura 14. Locales de permanencia prolongada considerados: A= dormitorio NE, B= dormitorio NE y NO, C= estar-comedor NO	30
Figura 15. Temperatura del aire para la UH de planta baja A3 con y sin ocupación, sin ventilación para el sistema constructivo pesado (P) y sistema constructivo liviano (L) los días 5 al 11 de agosto	32
Figura 16. Temperatura del aire para la UH de planta alta A13 con y sin ocupación, sin ventilación para el sistema constructivo pesado (P) y sistema constructivo liviano (L) los días 5 al 11 de agosto	33
Figura 17. Temperaturas superficiales para envolvente pesada y liviana para los días 5 al 11 de agosto	34
Figura 18. Demanda de energía para calefacción y refrigeración anual por UH, para los dos sistemas constructivos	35
Figura 19. Porcentaje de horas de confort, desconfort por calor y desconfort por frío según temperatura operativa de diseño y para período de ocupación.....	36
Figura 20. Proporciones del alero	38
Figura 21. Estrategia sombreado exterior	40
Figura 22. Proporciones de protección solar	40
Figura 23. Demanda de energía total anual para calefacción y refrigeración, para apartamento en planta baja (A3) y planta alta (A13), en Montevideo.....	43
Figura 24. Demanda de energía para calefacción y refrigeración para UH A3 (A) y A13(B).....	43
Figura 25. Factor de ahorro de las estrategias simuladas con relación al caso de referencia, para unidad A13	46
Figura 26. Factor de ahorro de las estrategias simuladas con relación al caso base, para unidad A13.....	47
Figura 27. Demanda de energía total según variación de ocupación para UH A13	48
Figura 28. Correlación de demanda de energía entre la variación de ocupación con ventilación y con protección solar exterior para distintos tipos de ocupación	48
Figura 29. Demanda de energía total anual para calefacción y refrigeración, para apartamento en planta baja (A3) y planta alta (A13), en Salto.....	56
Figura 30. Demanda de energía para calefacción y refrigeración para unidad A3 (A) y A13(B) para Salto	58
Figura 31. Factor de ahorro de las estrategias simuladas con relación al caso de referencia, para unidad A13 para Salto.....	59
Figura 32. Factor de ahorro de las estrategias simuladas con relación al caso base, para unidad A13.....	59

Listado de tablas

Tabla 1. Tabla comparativa de cantidad de material utilizado en obra húmeda y obra seca. Fuente: Arq. Manta Porteiro. Edificar 68 (2015)	13
Tabla 2. Listado de sistemas constructivos livianos registrados en la intendencia de Montevideo o Ministerio de Vivienda Ordenamiento Territorial y Medio Ambiente. Fuente: elaboración propia.....	20
Tabla 3. Definición de cerramiento vertical opaco exterior: espesores y propiedades. Fuente: elaboración propia con datos obtenidos de UNIT ISO 10456.....	22
Tabla 4. Definición de cerramiento vertical interior: espesores y propiedades. Fuente: elaboración propia con datos obtenidos de UNIT ISO 10456.....	22
Tabla 5. Definición de cerramiento horizontal exterior: espesores y propiedades. Fuente: elaboración propia con datos obtenidos de UNIT ISO 10456.....	23
Tabla 6. Definición de cerramiento horizontal interior: espesores y propiedades. Fuente: elaboración propia con datos obtenidos de UNIT ISO 10456.....	23
Tabla 7. Definición de cerramiento transparente.....	23
Tabla 8. Valores de transmitancia térmica y capacidad térmica calculados para los cerramientos seleccionados	24
Tabla 9. Agenda de horarios para cargas internas, todo el año, en fracción. Fuente: modificado de UNIT-ISO 17772-1	25
Tabla 10. Definición de cerramiento vertical opaco exterior: espesores y propiedades. Fuente: elaboración propia con datos obtenidos de UNIT ISO 10456.....	26
Tabla 11. Definición de cerramiento vertical interior: espesores y propiedades. Fuente: elaboración propia con datos obtenidos de UNIT ISO 10456.....	26
Tabla 12. Definición de cerramiento horizontal exterior: espesores y propiedades. Fuente: elaboración propia con datos obtenidos de UNIT ISO 10456.....	26
Tabla 13. Definición de cerramiento horizontal interior: espesores y propiedades. Fuente: elaboración propia con datos obtenidos de UNIT ISO 10456.....	26
Tabla 14. Definición de cerramiento horizontal interior: espesores y propiedades. Fuente: elaboración propia con datos obtenidos de UNIT ISO 10456.....	27
Tabla 15. Definición de cerramiento transparente.....	27
Tabla 16. Valores de transmitancia térmica y capacidad térmica calculados para los cerramientos seleccionados	27
Tabla 17. Rango de temperaturas operativas y de consigna	31
Tabla 18. Promedios de temperaturas del aire y amplitud térmica por UH según período.....	33
Tabla 19. Temperatura del aire y amplitud térmica por UH para condiciones de uso sin protección solar.....	36
Tabla 20. Características de protección solar exterior	37
Tabla 21. Propiedades de cortina interior	38
Tabla 22. Propiedades bloques HCCA.....	39
Tabla 23. Relación de área vidriada en los locales	41
Tabla 24. Demanda de enenergía (kWh) de calefacción, refrigeración y total anual para las dos unidades.....	44
Tabla 25. Coeficiente comparativo según caso de referencia.....	45
Tabla 26. Valores de temperatura del aire para la unidad A3 (A) y A13 (B)	49
Tabla 27. Porcentaje de horas de confort y desconfort según temperatura operativa para todo el año	50
Tabla 28. Escala de valores para los criterios. Fuente propia adaptada de Ceballos et al y Pérez et al.....	52
Tabla 29. Ponderación de criterios seleccionados y beneficio asociado.....	52
Tabla 30. Resultados del método TOPSIS.....	52
Tabla 31. Demanda anual de energía para las combinaciones de estrategias	53

Tabla 32. Porcentaje de demanda anual de energía para las combinaciones de estrategias con relación al caso base.....	54
Tabla 33. Factor de comparación y coeficiente de ahorro respecto al caso base	54
Tabla 34. Valores de temperatura del aire para cada unidad	54
Tabla 35. Porcentaje de horas de confort, desconfort por calor y desconfort por frío para cada unidad.....	55
Tabla 36. Demanda de energía (kWh) de calefacción, refrigeración y total anual para las dos unidades	57
Tabla 37. Coeficiente comparativo para Salto.....	58
Tabla 38. Valores de temperatura del aire para la unidad A3 y A13.....	61
Tabla 39. Porcentaje de horas de confort y desconfort según temperatura operativa para todo el año.....	62
Tabla 40. Resultados del método TOPSIS para Salto.....	62
Tabla 41. Demanda anual de energía para las combinaciones de estrategias.....	63
Tabla 42. Porcentaje de demanda anual de energía para las combinaciones de estrategias con relación al caso base.....	63
Tabla 43. Factor de comparación y coeficiente de ahorro para las diferentes combinaciones de estrategias.....	63
Tabla 44. Valores de temperatura del aire para cada unidad	64
Tabla 45. Porcentaje de horas de confort, desconfort por calor y desconfort por frío para cada unidad.....	64
Tabla 46. Temperaturas de consigna	77

Tabla 32. Porcentaje de demanda anual de energía para las combinaciones de estrategias con relación al caso base	54
Tabla 33. Factor de comparación y coeficiente de ahorro resectp al caso base	54
Tabla 34. Valores de temperatura del aire para cada unidad	54
Tabla 35. Porcentaje de horas de confort, disconort por calor y disconfort por frío para cada unidad	55
Tabla 36. Demanda de enenergía (kwh) de calefacción, refrigeración y total anual para las dos unidades	57
Tabla 37. Coeficiente comparativo para Salto	59
Tabla 38. Valores de temperatura del aire para la unidad A3 y A13.....	61
Tabla 39. Porcentaje de horas de confort y disconfort según temperatura operativa para todo el año	62
Tabla 40. Resultados del método TOPSIS para Salto	62
Tabla 41. Demanda anual de energía para las combinaciones de estrategias	63
Tabla 42. Factor de comparación y coeficiente de ahorro para las diferentes combinaciones de estrategias	64
Tabla 43. Valores de temperatura del aire para cada unidad	64
Tabla 44. Porcentaje de horas de confort, disconort por calor y disconfort por frío para cada unidad	65

1 Introducción

1.1 Justificación

El estudio del comportamiento térmico del espacio construido está relacionado directamente con el confort térmico de los usuarios y el consumo de energía necesario para lograr las condiciones de habitabilidad deseadas. Se parte de la base de que un correcto diseño arquitectónico, entre otras cosas, disminuye las necesidades energéticas de climatización de los usuarios. Cuando las condiciones térmicas interiores no son controladas por medios mecánicos, es decir, el ambiente se encuentra en condiciones “naturales”, los materiales afectan la temperatura tanto del aire interior como la de las superficies. De esta forma, tienen un efecto importante tanto en el confort de los ocupantes como en el consumo energético de los sistemas de control cuando están activos (Givoni, 1981). La envolvente del edificio separa el espacio interior del ambiente exterior y, en este sentido, modifica o previene el efecto directo de las variables climáticas tales como temperatura exterior, humedad, viento, radiación solar, lluvia, etc. El efecto cuantitativo de la envolvente depende de su espesor y sus propiedades termofísicas. Esto se aplica, principalmente, a los edificios residenciales, tal como lo explican Hirst et al (1986) ya que este tipo de edificios tienen una relación área expuesta sobre volumen alta y pocas cargas internas, su uso de la energía está dominado por el ambiente exterior y las características de la envolvente, y así son llamados “*skin-dominated*”, entendiéndose que el desempeño energético del edificio está dominado por su envolvente, “envolvente-dependientes”.

A su vez, los materiales dentro del espacio interior, tales como pisos, divisorios e incluso mobiliarios, también modifican la temperatura interior ya que afectan la capacidad térmica de la estructura como un todo y la relación de absorción de calor generado o penetrado al interior del edificio (Givoni, 1981). Es así, entonces, que el edificio interactúa con el medio en donde está inserto, esto es, funciona en relación con las condiciones climáticas de su emplazamiento. Por lo tanto, es necesario conocer el clima del lugar y las características locales en que estará ubicado el edificio y las estrategias de diseño principales asociadas para conseguir un diseño adecuado al clima.

Uruguay se caracteriza por tener un clima templado, moderado, lluvioso, con una temperatura superior a los 22,0°C en el mes más cálido, correspondiéndole la categoría «Cfa» de acuerdo con la clasificación climática de Köppen, según el Instituto Uruguayo de Meteorología (INUMET). Asimismo, la norma de zonificación presentada en UNIT 1026 divide al país en tres zonas climáticas: cálida, templada cálida y templada fría de noroeste a sureste, respectivamente (UNIT, 1999). Montevideo,

ciudad representativa de la zona sur, templada fría, presenta en enero una temperatura media $t_m = 22,6^\circ\text{C}$ con una temperatura máxima media $t_{xm} = 27,3^\circ\text{C}$ y una temperatura mínima media $t_{nm} = 17,9^\circ\text{C}$ y en julio estas temperaturas tienen valores de $10,6^\circ\text{C}$, $15,6^\circ\text{C}$ y $7,4^\circ\text{C}$, respectivamente (INUMET). Esto se traduce en una amplitud térmica media diaria considerable durante todo el año, alcanzando valores de $10,1^\circ\text{C}$ para enero y $8,2^\circ\text{C}$ para julio. En la zona cálida se ubica Salto que tiene una temperatura media en enero $t_m = 25,6^\circ\text{C}$ con una máxima media $t_{xm} = 32,2^\circ\text{C}$ y una mínima media $t_{nm} = 19,1^\circ\text{C}$ mientras que para julio estos valores son $t_m = 12,6^\circ\text{C}$, $t_{xm} = 18,1^\circ\text{C}$ y $t_{nm} = 7,1^\circ\text{C}$, evidenciando nuevamente una amplitud térmica diaria de considerable magnitud para todo el año. Si bien estos valores pueden variar levemente en otras localidades, la condición respecto a la amplitud térmica se reproduce en todo el territorio. En la figura 1, se puede apreciar el comportamiento anual de la temperatura media mensual para estas localidades, en el caso de Montevideo para dos estaciones meteorológicas.

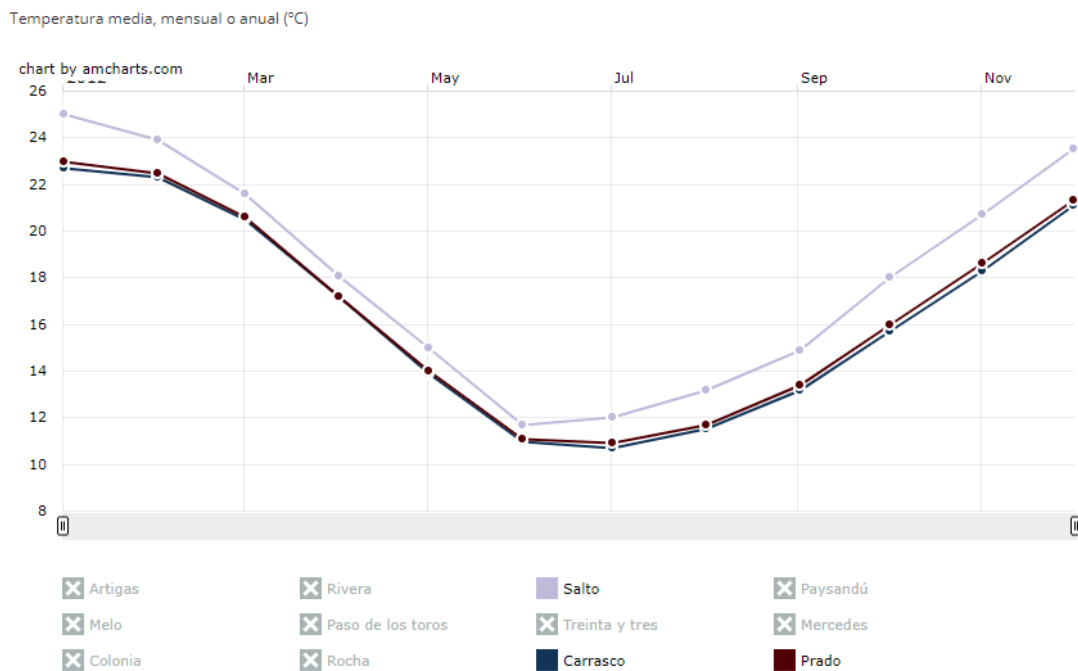
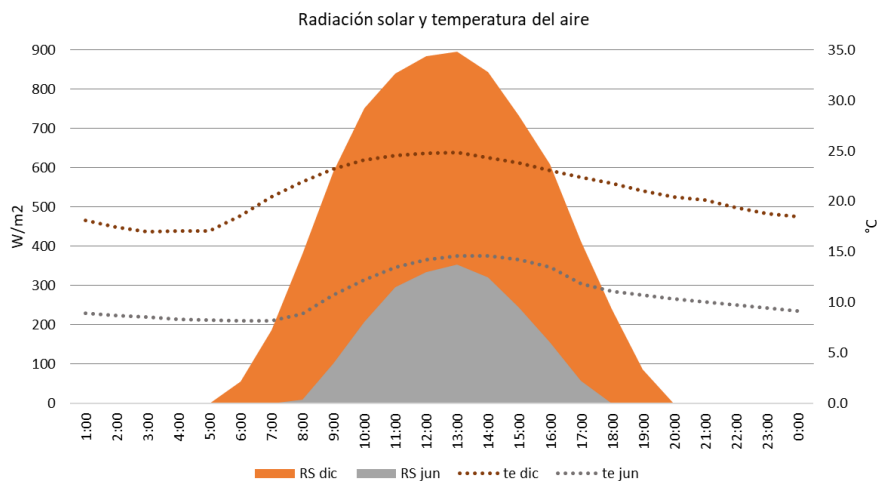


Figura 1. Variación de temperatura media mensual de Montevideo (estaciones Prado y Carrasco) y Salto (Fuente: INUMET)

Como se vio anteriormente, la temperatura exterior tiene un patrón de comportamiento cíclico diario y anual, el rango de variación depende de la ubicación geográfica. La radiación solar también depende de la ubicación geográfica y presenta, igualmente, un comportamiento cíclico diario y anual. En la figura 2 y figura 3 están representados los valores horarios de temperatura del aire exterior y radiación solar en plano horizontal para Montevideo y para Salto, para los meses de junio y diciembre. En el caso de Montevideo, la radiación solar global que llega a un plano horizontal, según datos

obtenidos por el Laboratorio de Energía Solar (LES), tiene un máximo en enero de 7,33 kWh/m²/día y un mínimo de 2,04 kWh/m²/día en julio, con un promedio anual de 4,58 kWh/m²/día, tal como se aprecia en la figura 4. En tanto que en Salto los valores máximos y mínimos se presentan en los mismos meses con valores de 7,19 kWh/m²/día y 2,34 kWh/m²/día, respectivamente, obteniendo un promedio anual de 4,78 kWh/m²/día. Se pueden observar los ciclos diarios y la variabilidad anual de cada parámetro y las diferencias de valores para las dos localidades, indicando problemáticas similares en ambas ciudades, pero con énfasis diferentes: hacia el sur, problemas mayoritariamente con el frío, hacia el norte problemas principalmente con el calor. Estas características, anteriormente mencionadas, definen al clima templado de Uruguay, caracterizándolo con diferentes problemas durante el año, problemas relacionados a temperaturas bajas, temperaturas altas y amplitud térmica diaria durante todo el año que hacen del clima nacional un caso complejo.

Figura 2. Valores diarios de temperatura exterior y radiación solar en plano horizontal, para Montevideo.



Fuente: elaboración propia con datos de LES

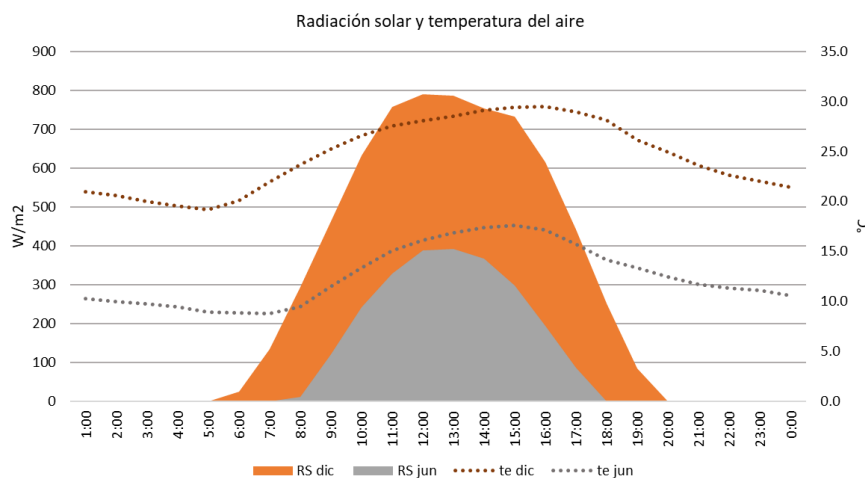


Figura 3. Valores diarios de temperatura exterior y radiación solar en plano horizontal, para Salto.

Fuente: elaboración propia con datos de LES

Por este motivo, es importante que el diseño dé respuesta a los distintos problemas. En el período frío los principales requerimientos se asocian a la captación de energía solar y a la reducción de las pérdidas de calor. En el período caluroso se deberán reducir las ganancias de calor y aumentar las pérdidas. Las condiciones térmicas interiores en los edificios sin control mecánico reproducen el patrón de comportamiento cíclico de temperatura exterior, pero en una forma modificada la cual depende de los detalles de diseño y construcción (Givoni, 1981). Es así, entonces, que es necesario comprender el comportamiento de la temperatura interior y en qué momento se producen la temperatura máxima y mínima respecto a la exterior. Es decir, se debe lograr un control de flujos en el tiempo de forma tal que la temperatura del aire interior permanezca estable a lo largo del día, con una variación mínima y un desfase que se beneficie de la utilización de recursos naturales para mejorar el desempeño térmico de la edificación, tales como la ventilación o la radiación solar.

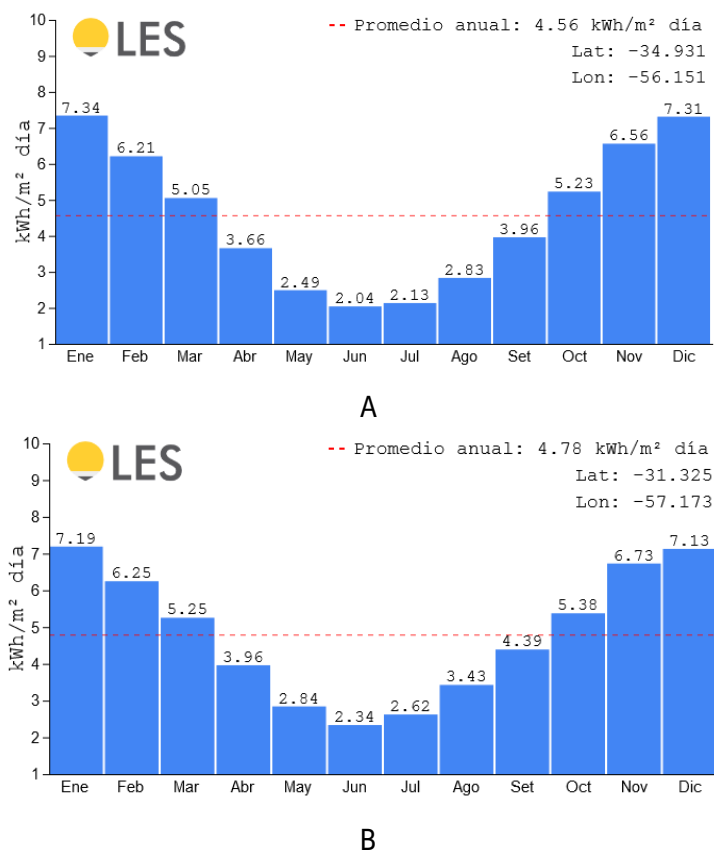


Figura 4. Irradiación solar global en un plano horizontal para Montevideo (A) y Salto (B). Fuente: LES

Una de las principales estrategias de diseño para lograr este objetivo es la inercia térmica, tal como se aprecia en las figuras 5 y 6 donde se presentan las principales estrategias de diseño para Montevideo y Salto (Picción, A. Milicua, 2005). La inercia térmica se define como la resistencia que

opone un cerramiento al pasaje de calor y a la variación de temperatura (Neila y Bedoya, 1997); es un concepto que conjuga capacidad térmica y aislación térmica. En términos de estrategias bioclimáticas de diseño, esto se logra con la presencia de masa térmica aislada en la envolvente del edificio. La masa es la que otorga la capacidad de almacenar energía térmica y al estar aislada reduce el pasaje de calor completando los elementos para lograr la inercia térmica. Para un mismo material, un mayor espesor implica un aumento de la capacidad térmica y de la resistencia térmica, es decir de aislación.

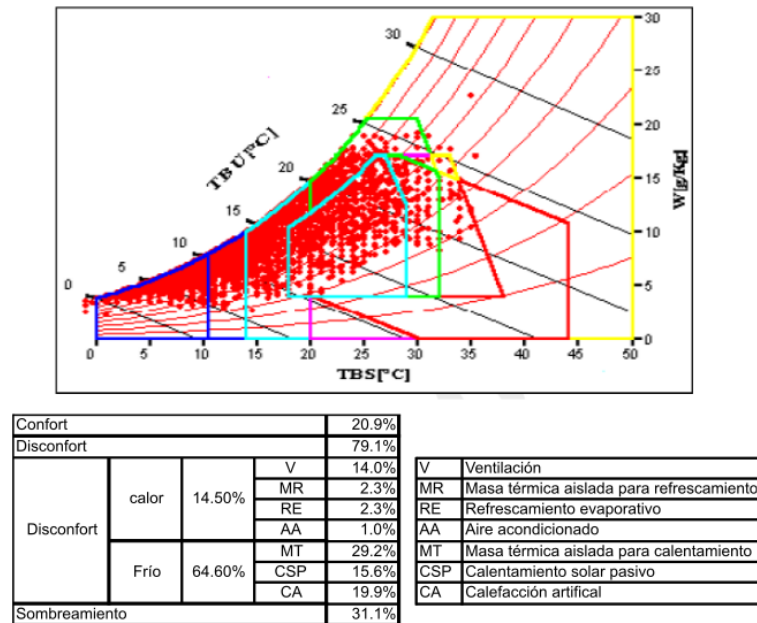


Figura 6. Carta bioclimática para la ciudad de Montevideo. Fuente: Picción y Milicua, 2005

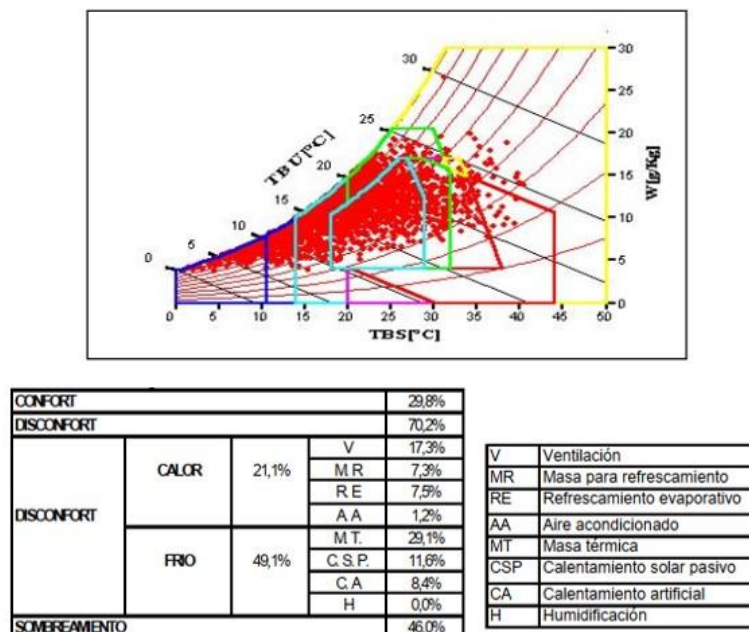


Figura 5. Carta bioclimática para la ciudad de Salto. Fuente: : Picción y Milicua, 2005

Este tipo de estrategia no es difícil de lograr con el tipo de construcción tradicional de nuestro país. En Uruguay, el Ministerio de Transporte y Obras Públicas reconoce en su Memoria Constructiva General para Edificios Públicos dos tipos de cerramientos opacos verticales de obra húmeda (de mampuestos cerámicos o de hormigón), mientras que para cerramientos livianos hace referencia a muros cortina y fachadas integrales livianas, siendo estas últimas conformadas por vidriado o paneles compuestos de dos láminas de aluminio con núcleo central de polietileno, de espesor final 3 a 6 mm. (MTOP, 2006). Todas aquellas soluciones constructivas que no se encuentren dentro de esta clasificación se consideran sistemas constructivos no tradicionales. De esta forma, y debido a su utilización generalizada, se identifica como tradicional en nuestro país a la construcción de mampostería o construcción pesada.

Sin embargo, en Uruguay, en los últimos tiempos, se puede constatar una creciente oferta de sistemas constructivos livianos importados, que no consideran el clima donde estarán insertos. En el año 2011, el Ministerio de Vivienda de Ordenamiento Territorial y Medio Ambiente (MVOTMA) establece el requisito de obtención del Documento de Aptitud Técnica (DAT), como documento obligatorio para los sistemas constructivos no tradicionales para la construcción de vivienda de interés social (Mussio, 2019). A la fecha, se han emitido 18 DATs con una diversidad de tecnologías y características de sistemas constructivos, aunque actualmente hay ocho vigentes únicamente, de los cuales 5 se clasifican como sistemas livianos o semi livianos. Una de las principales características constructivas de estos sistemas es que, al no poseer masa, su comportamiento es diferencial ante la construcción tradicional pesada ya que su capacidad térmica es muy baja, y por lo tanto su inercia térmica también. Si bien, generalmente, poseen un valor bajo de transmitancia térmica debido a la presencia de aislante térmico, esto hecho no es suficiente para alcanzar el comportamiento térmico deseable en un cerramiento exterior en un clima como el nuestro. Esto se traduce en un mayor consumo de energía en climatización para controlar las condiciones ambientales interiores.

En este sentido, en Uruguay se vienen implementando una serie de acciones desde la aprobación de una política energética en el año 2008. A partir de la misma, por medio de la ley N° 18597 de Promoción del Uso Eficiente de la Energía, se crea el Plan Nacional de Eficiencia Energética por el Ministerio de Industria, Energía y Minería. Tal como se indica en este plan “los edificios son de muy larga vida útil, lo que hace que las consecuencias de las decisiones que se toman en el momento de la construcción perduren durante muchos años (80 años o más). Estos dos aspectos convierten a los edificios en objeto de reducción de demanda de energía, fundamentalmente en lo que hace al mantenimiento de condiciones de confort térmico y lumínico con bajo consumo de energía.” Según el Balance Energético Nacional de 2021 (MIEM, 2021), el sector residencial es el responsable por el

18% del consumo final energético del país y las fuentes principales de energía son electricidad (46%) y biomasa (35%).

1.2 Alcance

La tesis aborda el estudio de una vivienda realizada con un sistema constructivo liviano, entendiendo que no es únicamente la composición de la envolvente opaca la que define el ambiente térmico interior, sino que es un conjunto de decisiones constructivo-espaciales. A partir de simulaciones energéticas con herramientas computacionales, se estudia el desempeño energético de la vivienda – consumo de energía en calefacción y refrigeración-, las condiciones de confort térmico – porcentaje de horas del año en que la temperatura del aire interior se encuentra dentro del rango de confort térmico sin la utilización de sistemas de climatización- y las temperaturas máximas y mínimas alcanzadas del aire interior. Finalmente, y a partir del estudio de las características de nuestro clima y de la identificación de las estrategias bioclimáticas de diseño principales se propone la adaptación de este tipo de construcciones. Se identifican aquellos factores de diseño que tienen mayor incidencia en el comportamiento térmico de una construcción con estas características, principalmente la baja inercia térmica. Si bien la inercia térmica se da a partir de la presencia de masa térmica aislada en la envolvente, se reconocen aquellas decisiones de diseño que permiten compensar la falta de inercia térmica sin alterar el sistema constructivo liviano que conforma a esta envolvente.

1.3 Objetivos

En este trabajo se propone un estudio y discusión del comportamiento energético de los sistemas livianos y una adaptación al clima de Uruguay. Se trata de evaluar y cuantificar la incidencia de la ausencia de inercia térmica en el desempeño energético y térmico de una construcción, a partir del estudio de una vivienda diseñada con un sistema constructivo liviano en nuestra condición climática. Se identifican los parámetros de diseño (de la envolvente o del espacio) que modifican el comportamiento térmico de un espacio construido y se analizan posibles alternativas al diseño con sistemas constructivos livianos.

Objetivo general

Estudio y discusión del desempeño energético y comportamiento térmico de un sistema constructivo liviano empleado en dos viviendas individuales y su posible adaptación para el clima de Uruguay.

Objetivos específicos

- Estudio de demanda de energía para calefacción y refrigeración en una vivienda con sistema constructivo liviano.
- Estudio de horas de temperaturas dentro del rango de confort térmico en una vivienda con sistema constructivo liviano en fluctuaciones libres.
- Estudio de factores de diseño que inciden en el comportamiento térmico de una construcción liviana.
- Implementación de estrategias bioclimáticas de diseño para un clima templado en una construcción con sistema constructivo liviano.

Preguntas que busca responder el trabajo

- Desde el punto de vista energético y condiciones de confort térmico ¿Se comporta de la misma manera un sistema constructivo liviano (SCL) que uno pesado (SCP)?
- ¿Las estrategias de diseño de los SCL tienen el mismo impacto que en un SCP?
- ¿Se puede sustituir el efecto de la masa térmica en el comportamiento térmico por otras estrategias de diseño en una vivienda con SCL?

1.4 Metodología

La metodología utilizada se presenta esquemáticamente, más abajo, en la figura 7.

A continuación, se hace un listado de las tareas que se realizaron:

Revisión bibliográfica

La etapa inicial de la tesis correspondió a una revisión bibliográfica del tema tanto a nivel nacional como regional, se profundizó en la búsqueda en el comportamiento térmico de sistemas constructivos livianos adaptados al clima local.

Definición de prototipo de vivienda y sistemas constructivos

Para comenzar el trabajo de simulaciones energéticas, primeramente, se seleccionó una vivienda de los proyectos promovidos por la Agencia Nacional de Vivienda a partir de un relevamiento de los proyectos construidos a nivel nacional. De esta forma se definió el prototipo volumétrico para simular.

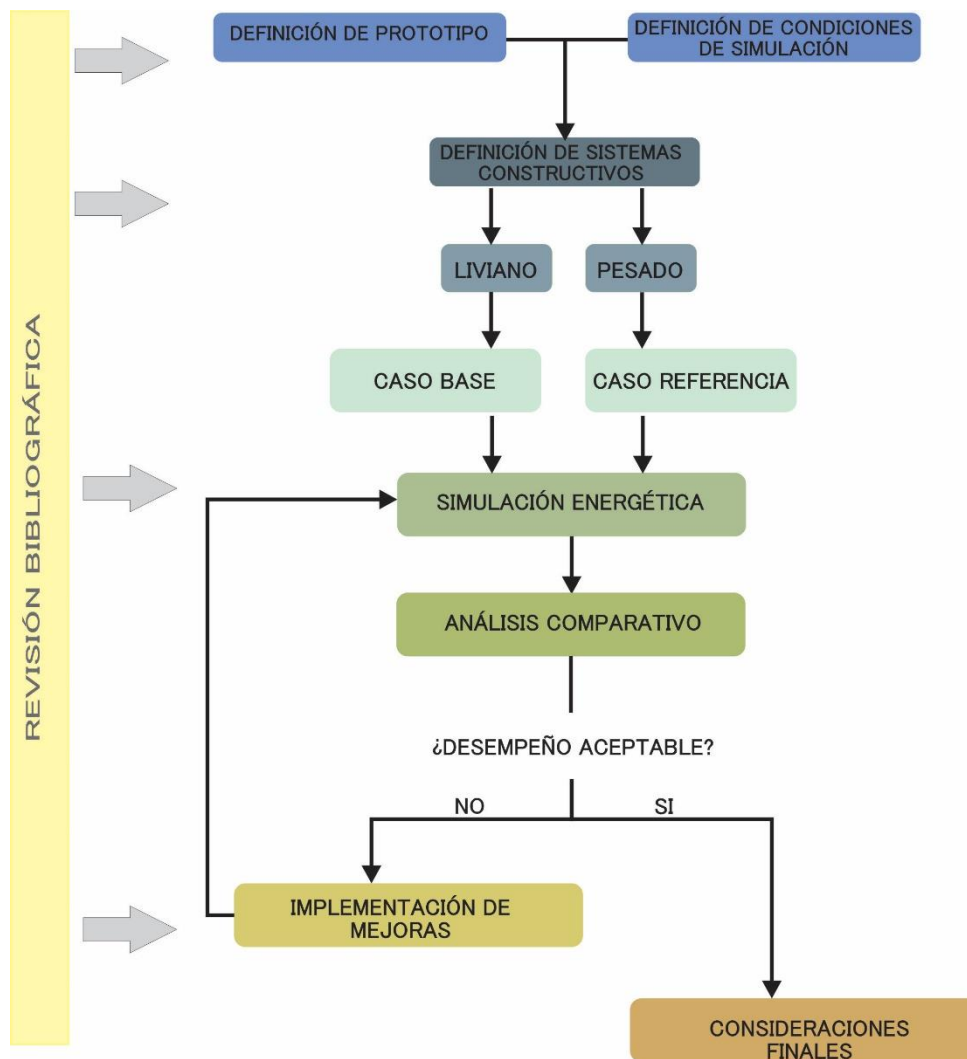


Figura 7. Esquema metodológico. Fuente: elaboración propia

Para la selección del sistema constructivo no tradicional se realizó una pesquisa sobre los sistemas constructivos no tradicionales habilitados por el MVOTMA y por la Intendencia de Montevideo. Se clasificaron en categorías según sean multicapas o paneles tipo sándwich, se identifican las principales características de materiales y componentes. Una vez completado el relevamiento, se seleccionó uno para ser estudiado. Este sistema es el utilizado en el caso base.

Para la definición del sistema constructivo tradicional se consultó la memoria constructiva del MTOP y se indagó en las prácticas habituales de construcción a nivel nacional. Este sistema es el utilizado en el caso de referencia.

De esta forma, el prototipo volumétrico seleccionado se mantiene, pero se varía únicamente el sistema constructivo: sistema constructivo liviano para el caso base, sistema constructivo pesado para el caso de referencia.

Definición de condiciones de simulación

Por último, para completar los datos necesarios para la simulación energética, se definieron las otras hipótesis de modelización. En esta instancia, se definieron las condiciones de estudio referentes a cargas internas de uso (ocupación, equipamiento e iluminación) y horarios de funcionamiento.

Simulación energética

Finalmente, definidos los datos de entrada para el programa: el modelo volumétrico (prototipo), su materialidad, las cargas de uso, tipos de sistemas y horarios de uso, finalmente, se corrieron las simulaciones para los tipos de sistemas constructivos seleccionados.

La simulación energética permite reproducir mediante herramienta informática las condiciones del ambiente exterior y así calcular el comportamiento de la envolvente del edificio y desempeño energético del mismo (Hensen & Lamberts, 2012). El software seleccionado para este trabajo es el Energy-Plus, versión 9.3. Es un programa de simulación térmica y energética de edificios desarrollado por el *Department of Energy*, de Estados Unidos, de acceso libre y gratuito, que está avalado internacionalmente y permite obtener datos de consumo de energía. Funciona en régimen variable y permite interrelacionar las prestaciones de los sistemas energéticos con las características de la envolvente del edificio. Esta herramienta es capaz de simular cargas térmicas de calefacción y refrigeración, así como caudales de ventilación, niveles de iluminación natural y artificial, cargas internas e instalaciones de climatización (HVAC). El cálculo de las cargas térmicas de los edificios se realiza por el método de balance de calor. Este método tiene en cuenta todos los balances de calor en las superficies exteriores e interiores y la conducción de calor transitoria en el espacio según un período de tiempo definido (Berkeley et al., 2019)

Análisis comparativo

Una vez obtenidos los resultados de las simulaciones, se procesaron los datos y se realiza un análisis de estos para cada tipo de sistema constructivo, con el fin de identificar particularidades en el comportamiento de cada sistema. Los aspectos estudiados son la demanda de energía para calefacción y refrigeración, así como las condiciones de confort térmico en el espacio interior en

situación de fluctuaciones libres. Los indicadores son kWh/año para el análisis de demanda energética y horas dentro del rango de confort para las condiciones de confort térmico. También se estudia el comportamiento de la temperatura del aire interior.

Implementación de mejoras al prototipo

Luego de analizados los resultados del análisis comparativo, se identificaron aquellos factores de diseño de la vivienda que tienen mayor incidencia en el desempeño energético y que son posibles de modificar sin alterar la composición del sistema constructivo liviano o con pequeñas alteraciones que no modifican la concepción del sistema. Con estos factores, se realiza una propuesta de rediseño de la vivienda y se corre nuevamente la simulación térmica para validar el nuevo diseño propuesto.

Consideraciones finales y conclusiones

Por último, se realizaron las conclusiones y consideraciones finales acerca de la implementación de mejoras en el caso seleccionado. Finalmente, se sugieren líneas de investigación futura.

1.5 Estructura de la tesis

La tesis se desarrolla en 5 capítulos. En primer lugar, en el capítulo 1 se presenta la introducción donde se realiza la justificación del tema de tesis, conjuntamente al alcance de la tesis, la definición de objetivos, el desarrollo de la metodología y la presentación de la estructura de la tesis. Luego, el capítulo 2 abarca el estado del arte considerando la definición y características de los sistemas constructivos livianos, la experiencia internacional y regional sobre el abordaje del tema y la situación nacional respecto a la utilización de sistemas constructivos livianos abarcando estudios, informes y normativa relacionada. En el capítulo 3 se define el estudio de caso, contemplando los proyectos existentes para la definición del prototipo de vivienda a modelar y la selección de los sistemas constructivos a simular. Posteriormente, en el capítulo 4 se presenta la simulación energética sobre las propuestas de mejora al diseño y su implementación en el caso de estudio. En el capítulo 5 se exponen los resultados para las dos ciudades estudiadas. Finalmente, en el capítulo 6 se presentan las consideraciones finales del tema y se sugieren líneas futuras de investigación.

2 Estado del arte

2.1 Sistemas constructivos livianos

Los sistemas constructivos livianos forman parte de los sistemas prefabricados o industrializados, de las “tecnologías alternativas” (Amándola, 2015) por contraposición a la construcción tradicional de nuestro país. Son sistemas cuyos componentes conforman cerramientos verticales u horizontales que pueden ser portantes o no (como subsistema integrado). Están conformados por una serie de elementos funcionalmente diferentes, ensamblados y dispuestos de tal forma que pueden resolver la envolvente de un edificio. Estos sistemas se consideran livianos por los materiales y componentes que los conforman haciendo que su masa sea notoriamente menor al sistema tradicional.

En nuestro país, estos sistemas comenzaron a utilizarse desde hace algunas décadas y en la década del noventa tuvieron un primer impulso debido a una conjunción de factores económicos y tecnológicos (Manta Porteiro, 2015). Hoy en día, son sistemas ampliamente utilizados tanto para reformas como para obra nueva, en vivienda individual o colectiva.

Dentro de las ventajas que poseen se puede destacar lo indicado por diferentes autores (Amándola, 2016; Jáuregi 2009; Manta Porteiro, 2015; OIKOS, 2013):

- rapidez en ejecución: reducción de tiempos en obra lo que conlleva una reducción costo de mano de obra, reduciendo los aportes a leyes sociales.
- reducción de personal: en obras grandes significa menos baños, menos obradores, menos herramientas
- estructura más liviana: reducción de dimensiones de la estructura portante (menos material, menor costo)
- facilidad en la colocación de instalaciones (reducción en costos de subcontratos)
- reducción de material en obra: disminución de tiempo de grúa y desperdicios
- limpieza y orden en la construcción

A modo de ejemplo, se presenta en la tabla 1 una comparativa de cantidad de material requerido en obra para un sistema constructivo liviano y otro pesado, para un edificio de vivienda colectiva. Como contrapartida, son sistemas “vulnerables”, los cuales necesitan para su correcto funcionamiento una colaboración/coordinación de todos sus componentes, un trabajo en conjunto.

Construcción húmeda	Construcción seca
Ladrillos huecos:14500 unidades (43 ton)	Placas: 15 paquetes de 40 unidades (43 ton)
Morteros: 13 m3 (23 ton)	Perfiles: 1 equipo (4 ton)
Revoques:33 m3 (53 ton)	
Total a subir: 119 ton	Total a subir: 29 ton
80 subidas con torre grúa	16 subidas con torre grúa
Basura generada a bajar: 12 ton	Basura generada a bajar: 1 ton

Tabla 1. Tabla comparativa de cantidad de material utilizado en obra húmeda y obra seca. Fuente: Arq. Manta Porteiro. Edificar 68 (2015)

2.1.1 Clasificación

Existen diferentes tipos de cerramientos livianos (Jáuregui, 2009), clasificándolos por su componente estructural principal:

- paneles multicapas: Steel framing o Wood framing (*timber frame*), conocidos también como obra seca, distinguiéndolo de la obra húmeda, debido a la forma de ensamblaje del panel. Son paneles compuestos por diferentes componentes y varias capas de materiales en la cual cada una cumple una función específica. Ver figuras 8 y 9.

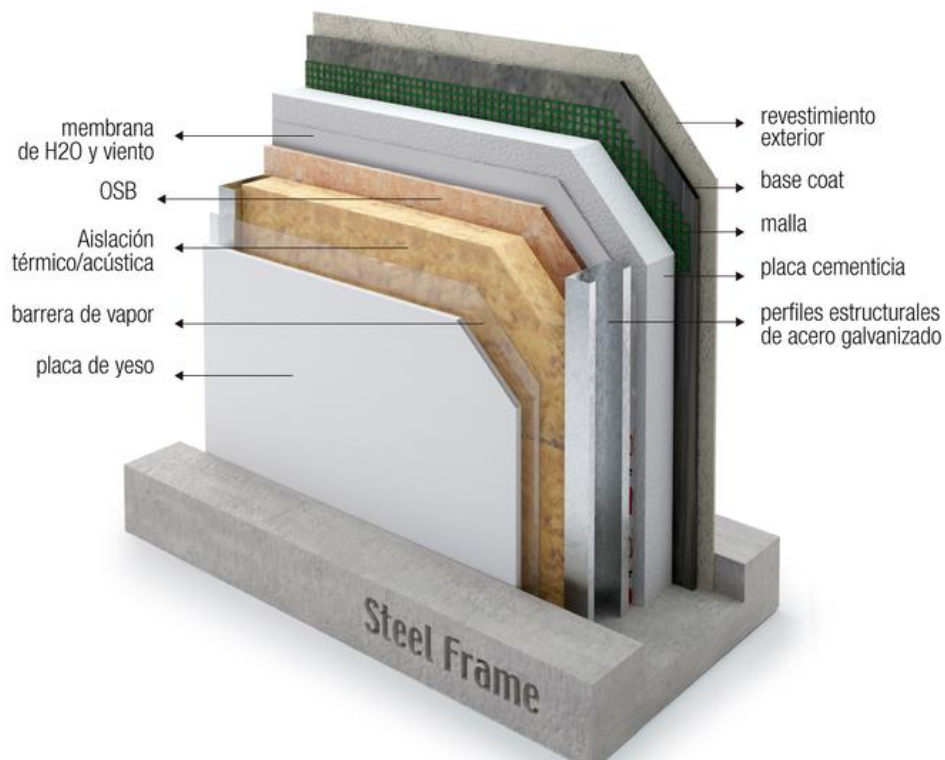


Figura 8. Ejemplo de panel multicapa Steel Frame.

Fuente: [www.https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Steel_frame_de_Barbieri.png?uselang=es](https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Steel_frame_de_Barbieri.png?uselang=es)



Figura 9. Ejemplo de panel multicapa Wood Frame. Fuente: <https://www.octonalinvest.com/wood-framing>

- paneles tipo sándwich, autoportantes, son paneles modulados prefabricados, generalmente conformados por dos placas exteriores que contienen un núcleo de material aislante. Ver figura 10.

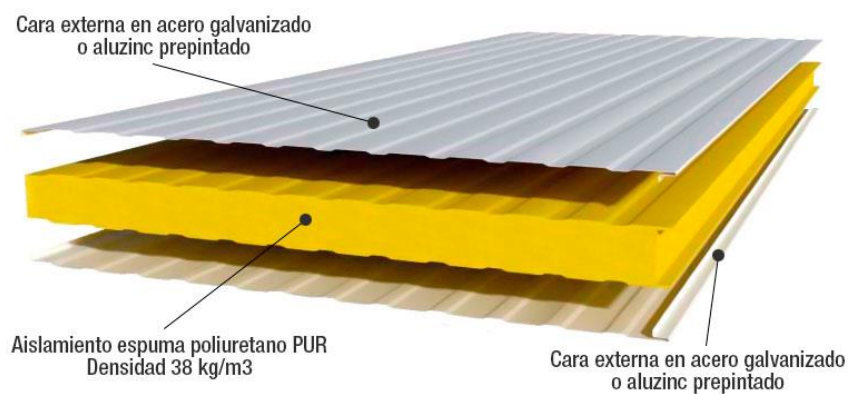


Figura 10. Ejemplo de panel multicapa. Fuente: <https://aisla.pe/panel-sandwich-termoaislante/>

O bien, por su compatibilidad con otros sistemas:

- sistemas cerrados: no admiten modificaciones, todos los elementos conforman una unidad edilicia.

- sistemas abiertos: son elementos que componen la construcción y se pueden reemplazar o intercambiar por otros de otro sistema.

2.1.2 Componentes

Como se mencionó anteriormente, los paneles multicapas están conformados por una serie de componentes y materiales, dispuestos de tal forma que cada uno cumple una función dentro del cerramiento. Se resumen a continuación, los diferentes elementos que se pueden encontrar en un panel multicapas.

- Estructura montante: pueden ser perfiles de acero galvanizado, en cuyo caso se habla de *Steel framing*, o escuadrias de madera, *Wood framing*.
- Sustrato rigidizador: elemento que colabora con la rigidez del conjunto (generalmente un tablero de madera, placa cementicia).
- Aislación térmica / acústica: elemento que cumple dos funciones, otorgar resistencia térmica y sonora, es decir reducir el pasaje de calor y de sonido. Puede ser en rollo, en placas o proyectado.
- Barrera de vapor: material retardador del pasaje de vapor de agua, generalmente polietileno.
- Barrera climática (aire y agua): material que impide el pasaje de aire frío a través del cerramiento y de la lluvia al interior de este.
- Terminación interior: elemento de cierre del panel en la cara interior, usualmente placa de yeso.
- Terminación exterior: elemento de cierre del panel en la cara exterior. Hay diferentes opciones entre las que se encuentran placas de fibrocemento, EIFS, chapa metálica.
- Accesorios de ensamblaje de monturas: fijaciones y elementos de sellado: cintas y adhesivos.

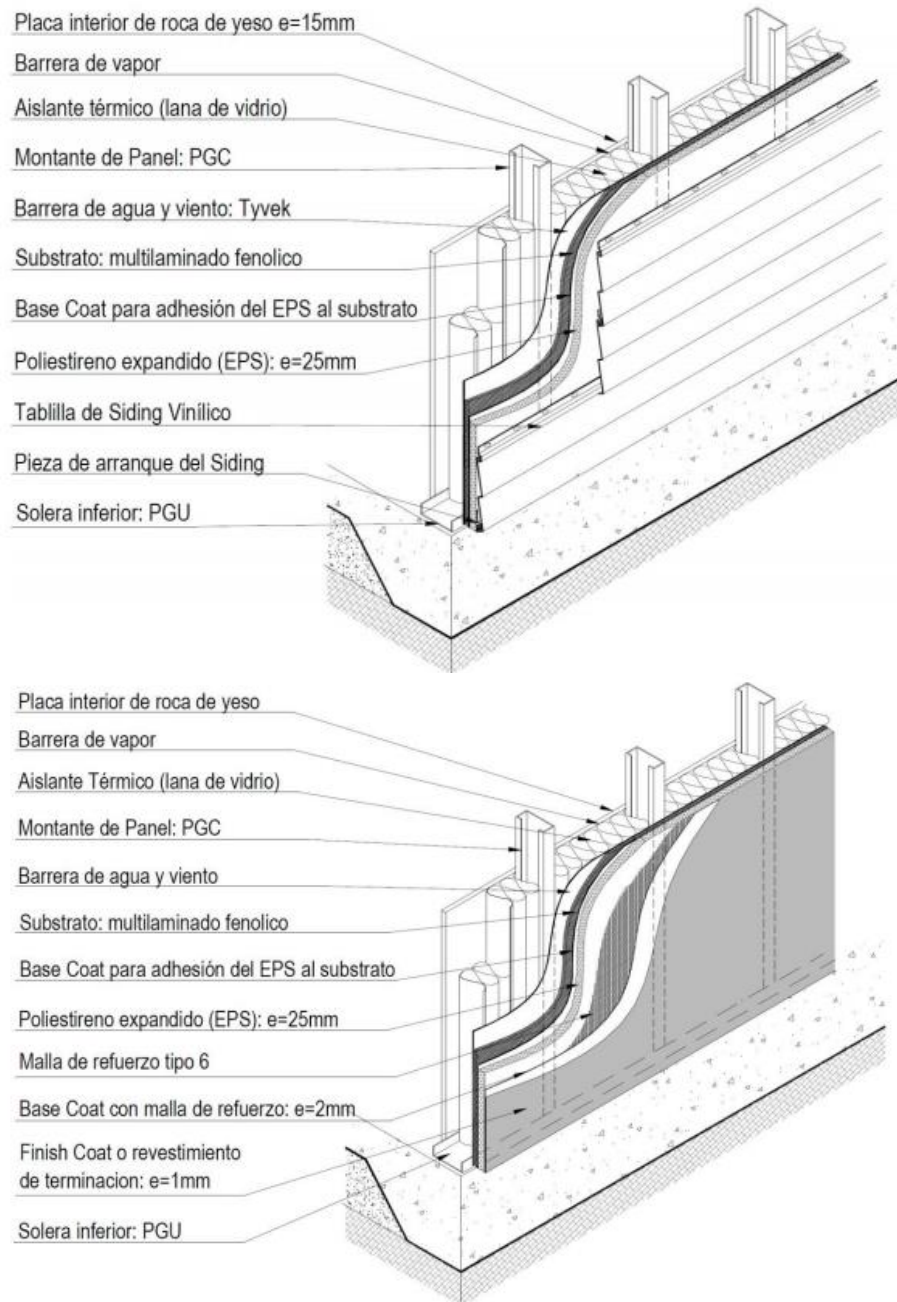


Figura 11. Ejemplos de terminaciones de steel framing.

Fuente:<https://procesosconstructivos.files.wordpress.com/2013/05/ficha-26-sistema-steel-framing.pdf>

2.1.3 Características

Del estudio de los componentes se observa que los materiales utilizados cuentan con poco espesor o con poca densidad, características que hacen que el cerramiento en su conjunto no posea masa, identificándose así como un sistema constructivo liviano, tomando como referencia la norma UNIT 1150 que presenta recomendaciones de diseño especiales para cerramientos cuya masa sea inferior a 120 kg/m^2 (UNIT, 2010). Esta característica, lo hace singular desde varios puntos de vista (Camacho

y Sosa, 2019), pero en esta ocasión nos interesa, el comportamiento térmico que presenta ante la ausencia de masa.

2.2 Experiencias internacionales y regionales

Varios autores (Cabeza Prieto, A., Sánchez-Guevara, C., Camino Olea, 2014; Pajek et al., 2017; Tonelli & Grimaudo, 2014; Verbeke & Audenaert, 2018), entre otros) identifican este rasgo del cerramiento (ausencia de masa) con ausencia de inercia térmica.

Pajek et al. (Pajek et al., 2017) compararon el comportamiento de un sistema constructivo liviano de madera con el de un sistema pesado mediante un modelo dinámico de elementos finitos dinámico. Los autores afirman que los edificios que tienen falta de masa térmica son especialmente susceptibles de producir sobrecalentamiento. También que los sistemas livianos deben ser mejorados para mejorar el confort térmico y reducir la demanda de energía para calefacción y refrigeración, y en consecuencia el alto impacto ambiental. Asimismo, sostienen que, en el clima mediterráneo, aún aplicando mejoras al sistema liviano es difícil conseguir condiciones de confort.

Tonelli y Grimaudo (Tonelli & Grimaudo, 2014), a partir de monitoreos realizados en diferentes prototipos de vivienda con diferentes tipos de envolventes en la ciudad de Madrid, afirman que en un clima que presenta inviernos moderados y veranos calientes, las casas que mejor se desempeñan son las de construcción pesada, mientras que las soluciones constructivas livianas o aquellas sin masa térmica interior pueden requerir más energía para mantener las condiciones de confort en períodos intermedios. Enfatizan la importancia del aumento de inercia térmica de las construcciones livianas en los edificios con sistemas prefabricados livianos en el clima mediterráneo.

Verbeke y Audenaert (Verbeke & Audenaert, 2018) realizan una revisión bibliográfica sobre los efectos de la inercia térmica en cuanto a confort térmico y demanda energética para calefacción y refrigeración. Los autores sugieren que edificios con menor masa térmica tienen períodos de precalentamiento más cortos y usan menos energía en calefacción, según lo indicado en CIBSE Guide F. Asimismo, presentan diversos estudios en los cuales se muestran opiniones contrapuestas en el impacto que tiene la inercia térmica en edificios residenciales en clima templado o frío en Europa. En algunos casos se concluye que es levemente positivo el impacto en la reducción de la demanda y en todos los casos el resultado podrá modificarse por el uso intermitente que tenga el sistema de climatización.

Cabeza Prieto et al (2014) estudiaron la incidencia de la masa térmica en el comportamiento térmico de un espacio, concluyendo que la inercia térmica es importante para la acumulación de calor, ya sea que la masa térmica esté ubicada dentro del espacio interior o en su envolvente.

A nivel regional, en Argentina varios autores han estudiado el impacto de las construcciones livianas en el desempeño energético de la envolvente debido a su gran utilización para programas de vivienda de interés social. En este sentido, Evans sostiene que la masa en una construcción “tiene mayor importancia en la demanda pico, que la demanda de energía que surge de simulaciones anuales” (Evans, 2002). Por otra parte, Balter et al afirman que las viviendas de los edificios pesados presentan comportamientos térmicos más cercanos al rango de confort respecto a los edificios livianos (Balter et al., 2016). En Chile, Bustamante et al (2012) realizaron un estudio sobre estrategias para el confort térmico en edificios en diferentes climas de la zona central de Chile, resultando en que si el edificio no posee suficiente masa térmica la ventilación nocturna no es tan eficiente para la disminución de demanda de refrigeración como para un edificio pesado. En la Guía de Diseño para la Eficiencia Energética en Vivienda Social, aprobada por el Ministerio de Vivienda y Urbanismo de dicho país se indica como una buena práctica la incorporación de inercia térmica en la envolvente del edificio. Asimismo, en la herramienta de Calificación Energética de Viviendas, se considera la inercia térmica como una de las variables que influyen en la evaluación de arquitectura, ponderando de forma positiva a los edificios que cuentan con masa térmica en su envolvente. Por otro lado, en Brasil, en la norma NBR 15575 *Edificações habitacionais - Desempenho* se propone dos formas de realizar la evaluación del desempeño térmico de un edificio: de forma prescriptiva o por medio de simulación térmica, comparando los resultados con una construcción de referencia. Esta norma, en sus diferentes partes, define los valores mínimos de transmitancia y capacidad térmica de paredes exteriores y cubiertas en función de la zonificación bioclimática del país. De esta forma, la norma referencia cómo debe responder el edificio, en base a parámetros de la envolvente que se relacionan con el comportamiento global y no diferenciando por tipo de sistema constructivo.

2.3 Situación nacional

A nivel nacional, entre los años 2005 y 2007 Picción et al. realizan el proyecto “Evaluación del comportamiento térmico un sistema constructivo liviano para la situación climática de Uruguay” (Díaz-Arnesto et al., 2007). En este trabajo se identifica la incidencia de la ausencia de masa térmica en una construcción para nuestro clima y se evalúan diferentes estrategias de mejora, resultando la incorporación de masa térmica conjuntamente con el sombreado como la combinación más eficiente para la reducción de demanda de energía. En el año 2015, la Dirección Nacional de Energía

presenta el “Estudio de medidas de eficiencia energética en el sector residencial y evaluación de costos y beneficios asociados en Uruguay”(DNE-MIEM, 2015) . Este trabajo es el resultado de una consultoría realizada por el Grupo Termotecnia de la Universidad de Sevilla y en el mismo se identifican medidas de mejora en la eficiencia energética en la envolvente de viviendas. El estudio incorpora un estudio de costo-beneficio de las mejoras propuestas a partir de una construcción tradicional.

Con la creación del Plan Nacional de Vivienda (2010-2014), en el año 2011, las tecnologías no tradicionales en nuestro país fueron incluidas en los programas habitacionales que promovía el Ministerio de Vivienda Ordenamiento Territorial y Medio Ambiente. El “Reglamento de otorgamiento de aptitud técnica a sistemas constructivos no tradicionales para producción de viviendas” (MVOTMA, 2011) es un instrumento de evaluación técnica que establece los requisitos para la presentación del Documento de Aptitud Técnica (DAT). Este DAT “habilita al proponente a ofrecer su sistema constructivo a la población con el fin de construir proyectos a través de los programas de financiación que implementa el ministerio” (MVOTMA, 2019).

En el año 2014, se creó el Instituto Uruguayo de Construcción en Seco, evidenciando la creciente oferta y demanda de este tipo de construcción en nuestro país. Según se presenta en su página web oficial “Destacar las fortalezas y ventajas de los sistemas de construcción en seco. Desarrollar y coordinar contenidos técnicos para profesionales y constructores, que sea de interés académico. Asesorar y promover su aceptación en usuarios finales. Promover el ahorro energético, la optimización de recursos y la arquitectura sustentable a partir del uso de sistemas de construcción en seco” (www.iucose.com.uy).

Por otra parte, desde el año 2017, en el Comité de Eficiencia Energética en Edificios de UNIT, se han comenzado a adoptar las normas ISO 52000, referentes al desempeño energéticos de edificios, sin embargo, en las misma no se distinguen procedimientos o cálculos para diferentes tipos de sistemas constructivos.

También a nivel departamental hay un registro de los sistemas constructivos no tradicionales aptos para la construcción formal. En la tabla 2 se presenta un listado de los sistemas constructivos no tradicionales habilitados para construir en Montevideo.

Nombre	estructura			terminación interior						terminación exterior						relleno												
	met	made	PVC	auto	Hº	mad	fibr	yeso	pvc	Al	Hº	Acce	mon	otro	Acce	mon	otro	EPS	lvidr	otro								
	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x								
Bonibert	x					x												x										
Acorn				x				x												x								
Equinox	x					x													x									
Lignum		x						x												x								
Metal Intra	x					x													x		x							
Royal Housing System				x															x									
Nanticoke		x						x												x								
Snap- N-Lock				x																								
Steel home	x							x																				
Prototipo de vivienda prefabricada		x				x																						
Comensur Hormigones																												
Paneles GRC																												
Uruguay 2010																												
Multicontainer																												
Epotec		x						x																				
Deflorenia																												
Comfort Buildings	x																											
Calpusa																												
Isopanel																												
Proyecto Nande		x																										
Viviendas Amanecer																												
Sistema de plataforma		x																										
Steel framing	x																											
3D panel																												
Emmedue																												
Casapráctica	x																											
Montfrío																												
Casa Fácil	x																											
Concrespuma																												
Panel PIR																												
Wayoss																												
Totales	7	7	1	13	1	5	2	7	1	1	1	5	4	2	3	8	3	1	1	1	3	4	4	4	17	5	6	
DATS																												
GIW																												
Intelitec																												
RST																												
Crupe																												
Totales DATS				1	8					1		2	3	2								2	3	3	6	6	2	

Tabla 2. Listado de sistemas constructivos livianos registrados en la intendencia de Montevideo o Ministerio de Vivienda Ordenamiento Territorial y Medio Ambiente. Fuente: elaboración propia

3 Estudio de caso

3.1 Caso de referencia

El estudio de caso fue seleccionado a partir del relevamiento realizado de los proyectos promovidos por la Agencia Nacional de Vivienda (ver anexo). Es así como se selecciona el proyecto N°272. Se trata de un conjunto habitacional conformado por 8 unidades de vivienda de 2 dormitorios, ubicado en Montevideo. Cuatro unidades se encuentran en planta baja y cuatro en planta alta con acceso mediante escaleras abiertas. Este proyecto fue seleccionado debido a que tiene la característica de presentar una diversidad de variables en un solo caso para el estudio de desempeño energético. Por ejemplo, la incidencia de la cubierta al haber unidades en planta baja y planta alta, diferentes orientaciones solares, distinta área expuesta, entre otros.



Figura 12. Caso seleccionado para la simulación

Los aspectos a tener en cuenta para la simulación energética serán dimensionales, constructivos, funcionales y energéticos. A continuación, se presentan los tres primeros de ellos para el caso seleccionado. Los aspectos energéticos se presentan en el capítulo cuatro correspondiente a simulación energética.

3.1.1 Aspectos dimensionales

Tipología: el caso de estudio consta de un edificio de vivienda que se desarrolla en dos niveles compuesto por 4 unidades por planta. Es un predio en esquina lo que hace que las viviendas presenten diferentes orientaciones (noroeste y noreste). Cada vivienda tiene dos dormitorios y un área total de 53m² aproximadamente. El área total edificada es de 456 m².

3.1.2 Aspectos constructivos

Para el caso de referencia se seleccionan los tipos de cerramiento según la construcción tradicional.

3.1.2.1 Materialidad

- Cerramientos verticales opacos exteriores:

	Espesor (m)	Conductividad térmica (W/m.K)	Densidad (kg/m ³)	Calor específico (J/kg.K)	Resistencia media (m ² .KW)	Capacidad termica media (kJ/m ² .K)
<i>Exterior</i>						
Revoque exterior	0.015	1.40	2100	1000		
Cerámico hueco	0.080				0.20	79.8
Cámara de aire	0.020				0.18	
Poliestierno expandido	0.020	0.35	30	1450		
Arena y portland con hidrófugo	0.015	1.40	2100	1000		
Cerámico hueco	0.120				0.31	98
Revoque interior	0.015	1.00	1800	1000		

Interior

Tabla 3. Definición de cerramiento vertical opaco exterior: espesores y propiedades. Fuente: elaboración propia con datos obtenidos de UNIT ISO 10456

- Cerramientos verticales interiores:

	Espesor (m)	Conductividad térmica (W/m.K)	Densidad (kg/m ³)	Calor específico (J/kg.K)	Resistencia media (m ² .KW)	Capacidad termica media (kJ/m ² .K)
<i>Exterior</i>						
Revoque interior	0.015	1.00	1800	1000		
Cerámico hueco	0.120				0.31	98
Revoque interior	0.015	1.00	1800	1000		

Interior

Tabla 4. Definición de cerramiento vertical interior: espesores y propiedades. Fuente: elaboración propia con datos obtenidos de UNIT ISO 10456

- Cerramiento horizontal exterior:

	Espesor (m)	Conductividad térmica (W/m.K)	Densidad (kg/m ³)	Calor específico (J/kg.K)	Resistencia media (m ² .K/W)	Capacidad térmica media (kJ/m ² .K)
<i>Exterior</i>						
Alisado arena y portland	0.015	1.40	2100	1000	-	-
Poliestierno expandido	0.030	0.035	30	1450	-	-
Membrana asfáltica	0.0004				-	-
Hormigón liviano relleno	0.080	0.76	1600	1000	-	-
Polietileno	25 μ	-	-	-	-	-
Losa hormigón armado	0.120	2.50	2400	1000	0.31	98
Revoque interior	0.015	1.00	1800	1000	-	-

Interior

Tabla 5. Definición de cerramiento horizontal exterior: espesores y propiedades. Fuente: elaboración propia con datos obtenidos de UNIT ISO 10456

- Cerramiento horizontal interior

	Espesor (m)	Conductividad térmica (W/m.K)	Densidad (kg/m ³)	Calor específico (J/kg.K)	Resistencia media (m ² .K/W)	Capacidad térmica media (kJ/m ² .K)
<i>Exterior</i>						
Losa hormigón armado	0.120	2.50	2400	1000	-	-
Contrapiso a y p	0.040	1.35	2000	1000	-	-
Revestimiento cerámico	0.010	0.81	1600	1000	-	-

Interior

Tabla 6. Definición de cerramiento horizontal interior: espesores y propiedades. Fuente: elaboración propia con datos obtenidos de UNIT ISO 10456

- Cerramientos transparentes

Exterior

Ventana aluminio con vidrio simple

Interior

Tabla 7. Definición de cerramiento transparente

3.1.2.2 Propiedades térmicas

El cálculo de transmitancia térmica se realiza según método de cálculo indicado en UNIT-ISO 6946, tomando los valores de resistencias superficiales allí indicados.

Se presenta, a continuación, un resumen de los parámetros térmicos calculados para los cerramientos seleccionados.

Cerramiento	Transmitancia térmica (W/m ² K)	Capacidad térmica (KJ/m ² K)	Factor solar
Opaco exterior	0.69	210	-
Vertical interior	1.31	152	-
Horizontal interior	1.25	482	-
Horizontal exterior	0.79	1752	-
Transparente	5.8	-	0.05 (móvil)

Tabla 8. Valores de transmitancia térmica y capacidad térmica calculados para los cerramientos seleccionados

3.1.3 Aspectos funcionales

3.1.3.1 Cargas internas

En este ítem se definen todas las cargas que provienen del uso continuo de la vivienda.

- Ocupación: se estiman 4 personas por vivienda
- Iluminación: se estima una carga de 5 W/m².
- Equipamiento: se estima una carga de 2,4 W/m², acorde a ISO 17772-1

3.1.3.2 Infiltraciones de aire

Las infiltraciones de aire son calculadas por el programa EnergyPlus, mediante el módulo AirFlowNetwork para cada local, que también realiza los cálculos de ventilación natural. Los datos ingresados corresponden al *Manual de simulação computacional de edificios naturalmente ventilados no programa EnergyPlus* (Pereira et al., 2013) que identifica para cada tipo de abertura el coeficiente de flujo de aire se debe utilizar, en función de materialidad, cantidad de hojas y tipo de movimiento de la misma. Los coeficientes de presión de viento, la matriz de coeficientes de presión y los nodos externos para cada abertura fueron calculados mediante la herramienta de simulación en línea CpSimulator (<https://cpsimulator.cimec.org.ar>). Esta herramienta devuelve los valores solicitados para ser ingresados en el programa EnergyPlus para una geometría dada. Se presentan los datos detallados en Anexo.

3.1.3.3 Cargas de uso

Se presenta, a continuación, una tabla resumen con la agenda de horarios de uso y porcentaje de cargas máximas correspondientes para la simulación, según UNIT-ISO 17772 1.

Horario	Lunes a viernes			Sabado y domingo		
	ocupación	equipos	iluminación	ocupación	equipos	iluminación
0:00 a 6:59	1	0.5	0	1	0.5	0
7:00 a 9:59	0.5	0.5	0.15	0.8	0.5	0.15
10:00 a 11:59	0.1	0.5	0.15	0.8	0.5	0.15
12:00 a 15:59	0.1	0.6	0.05	0.8	0.6	0.05
16:00 a 16:59	0.2	0.5	0.05	0.8	0.5	0.05
17:00 a 17:59	0.5	0.5	0.2	0.8	0.5	0.2
18:00 a 19:59	0.5	0.7	0.2	0.8	0.7	0.2
20:00 a 22:59	0.8	0.8	0.2	0.8	0.8	0.2
23:00 a 23:59	1	0.6	0.15	1	0.6	0.15

Tabla 9. Agenda de horarios para cargas internas, todo el año, en fracción. Fuente: modificado de UNIT-ISO 17772-1

3.2 Caso base

El caso base se corresponde al caso de referencia en los aspectos dimensionales, funcionales y energéticos, variando únicamente los aspectos constructivos que se mencionan aquí.

3.2.1 Aspectos constructivos

El caso base difiere del caso de referencia únicamente en los materiales que conforman los cerramientos. En este caso, se trata de un sistema constructivo liviano del tipo steel framing.

A continuación, se presenta la tabla de características y propiedades de materiales de cada cerramiento.

3.2.1.1 Materialidad

- Cerramientos verticales opacos exteriores:

	Espesor (m)	Conductividad térmica (W/m.K)	Densidad (kg/m ³)	Calor específico (J/kg.K)	Resistencia media (m ² .K/W)
<i>Exterior</i>					
Placa cementicia	0.011	0.23	1200	1500	-
OSB	0.012	0.13	650	1700	-
Camara de aire	0.05	-	-	-	0.18
Lana de vidrio	0.05	0.043	107	700	-

Placa de yeso	0.012	0.25	900	1000	-
---------------	-------	------	-----	------	---

Interior

Tabla 10. Definición de cerramiento vertical opaco exterior: espesores y propiedades. Fuente: elaboración propia con datos obtenidos de UNIT ISO 10456

- Cerramiento vertical interior

	Espesor (m)	Conductividad térmica (W/m.K)	Densidad (kg/m ³)	Calor específico (J/kg.K)	Resistencia media (m ² .K/W)
Placa de yeso	0.012	0.25	900	1000	-
Camara de aire	0.03	-	-	-	0.18
Lana de vidrio	0.07	0.043	107	700	-
Placa de yeso	0.012	0.25	900	1000	-

Tabla 11. Definición de cerramiento vertical interior: espesores y propiedades. Fuente: elaboración propia con datos obtenidos de UNIT ISO 10456

- Cerramiento horizontal exterior

<i>Exterior</i>	Espesor (m)	Conductividad térmica (W/m.K)	Densidad (kg/m ³)	Calor específico (J/kg.K)	Resistencia media (m ² .K/W)
Acero galvanizado	0.001	50	7800	450	-
EPS	0.10	0.04	20	1450	-
Acero galvanizado	0.001	50	7800	450	-

Interior

Tabla 12. Definición de cerramiento horizontal exterior: espesores y propiedades. Fuente: elaboración propia con datos obtenidos de UNIT ISO 10456

- Cerramiento horizontal interior

	Espesor (m)	Conductividad térmica (W/m.K)	Densidad (kg/m ³)	Calor específico (J/kg.K)	Resistencia media (m ² .K/W)
Placa de yeso	0.012	0.25	900	1000	-
Lana de vidrio	0.07	0.043	107	700	-
Camara de aire	0.18	-	-	-	0.18
Placa de yeso	0.012	0.25	900	1000	-

Tabla 13. Definición de cerramiento horizontal interior: espesores y propiedades. Fuente: elaboración propia con datos obtenidos de UNIT ISO 10456

- Cerramiento horizontal interior – piso de planta baja

	Espesor (m)	Conductividad térmica (W/m.K)	Densidad (kg/m ³)	Calor específico (J/kg.K)	Resistencia media (m ² .K/W)
EPS	0.04	0.04	20	1450	-
Revoque interior	0.02	1.00	1800	1000	-

Alfombra	0.01	0.06	200	1300	-
----------	------	------	-----	------	---

Tabla 14. Definición de cerramiento horizontal interior: espesores y propiedades. Fuente: elaboración propia con datos obtenidos de UNIT ISO 10456

- Cerramiento transparente

Exterior

Ventana aluminio con vidrio simple

Interior

Tabla 15. Definición de cerramiento transparente

3.2.1.2 Propiedades térmicas

El cálculo de transmitancia térmica, al igual que para el caso de referencia, se realiza según método de cálculo indicado en UNIT-ISO 6946.

Se presenta a continuación, un resumen de los parámetros térmicos calculados para los cerramientos seleccionados.

Cerramiento	Transmitancia térmica (W/m ² K)	Capacidad térmica (KJ/m ² K)
Vertical exterior	0.59	48
Vertical interior	0.46	25
Horizontal interior	0.48	27
Horizontal exterior	0.40	10
Transparente	5.8	-

Tabla 16. Valores de transmitancia térmica y capacidad térmica calculados para los cerramientos seleccionados

4 Simulación energética

En este capítulo se presentan aquellos elementos que influyen directamente en el cálculo de la demanda de energía y no dependen de la tipología utilizada, materiales o cargas internas de utilización. Se definen los aspectos energéticos tales como las zonas climáticas y temperaturas de consigna y aquellos que organizan la simulación y resultados, como la zonificación térmica e indicadores utilizados.

4.1 Condiciones de simulación

En este capítulo se presentan las principales consideraciones para la ejecución de la simulación térmica.

4.1.1 Módulos utilizados

Se presentan, a continuación, las condiciones y modelos principales seleccionados para la simulación para los diferentes módulos:

Heat Balance Algorithm

Este algoritmo define el tipo de transferencia de calor y humedad que se utiliza para realizar los cálculos entre las superficies del edificio. En este caso el algoritmo seleccionado (*ConductionTransferFunction*) considera solamente el calor sensible y no tiene en cuenta el almacenamiento o difusión de humedad de los elementos constructivos (DOE, 2021).

Site: Ground Temperature: Undistributed: KusudaAchenbach

Mediante esta entrada se definen las condiciones para la temperatura del suelo. El modelo seleccionado calcula temperaturas del suelo no distorsionadas a partir de tres parámetros para definir una correlación de temperaturas como función de la profundidad y del tiempo (DOE, 2021).

Surface Property: Other Side Conditions Model

Este objeto permite definir el modelo de transferencia para el intercambio de calor entre las superficies. El modelo seleccionado (*GroundCoupledSurface*) permite usar los cálculos habituales de

transferencia de calor incluyendo componentes multicapa. Este objeto es utilizado para las transferencias de calor entre el piso del apartamento de planta baja y el suelo (DOE, 2021).

Site: Ground domain: slab

Este objeto permite definir las condiciones de simulación de transferencia de calor en superficies horizontales que se encuentran en contacto con el suelo (Eli et al., 2019).

4.1.2 Zonas climáticas

El caso se estudia en dos localidades de Uruguay: en Montevideo y en Salto. Se seleccionan estas dos ciudades por considerarse representativas de las diferentes zonas térmicas que caracterizan al país, según se establece la norma UNIT 1026 (UNIT, 1999). Los archivos de datos climáticos utilizados para cada localidad fueron realizados con el programa Meteonorm. Si bien para Montevideo se cuenta con un archivo disponible en línea para su descarga y uso, no es así para Salto. Por este motivo, se crearon las dos bases de datos para los años comprendidos entre 1961 y 1990. De esta forma se contempló que para las dos localidades se utilizara el mismo período de referencia.

En cuanto al entorno inmediato, se considera en un entorno urbano, libre de obstrucciones.

4.1.3 Zonas térmicas

El caso seleccionado se divide en varias zonas térmicas (Associação Brasileira De Normas Técnicas, 2013), de modo de poder estudiar los locales de cada vivienda por separado, así como la totalidad de la vivienda para poder comparar distintas unidades, por ejemplo, ver la incidencia del techo o el factor de forma.

Así es que se definen dos unidades habitacionales (UH), una en cada nivel: planta baja (A3) y planta alta (A13). Para cada UH, las zonas térmicas consideradas son: estar- comedor (NO), dormitorio (NE), y dormitorio (NO y NE).

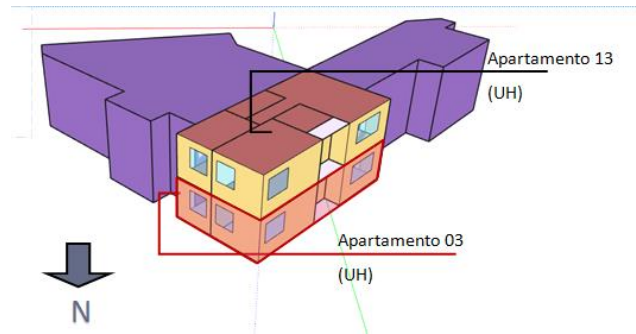


Figura 13. Unidades habitacionales seleccionadas: A3 y A13

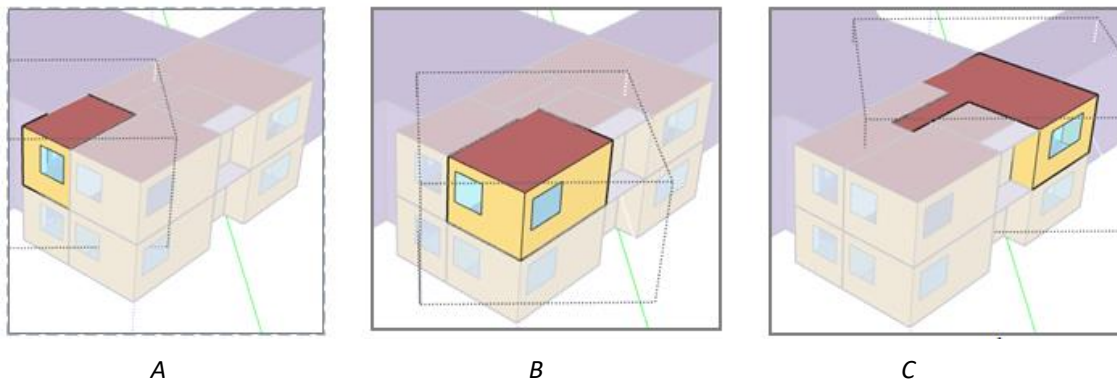


Figura 14. Locales de permanencia prolongada considerados: A= dormitorio NE, B= dormitorio NE y NO, C= estar-comedor NO

4.1.4 Indicadores energéticos y de condiciones de confort.

Para evaluar el desempeño energético de la vivienda se considera la demanda para calefacción y para refrigeración expresada en kWh/año y kWh/m²/año. También se contabilizan las horas en la que la temperatura del aire presenta valores dentro del rango de confort establecido sin estar activado el equipo de acondicionamiento (en condiciones de fluctuaciones libres).

El rango de confort es considerado según la temperatura operativa de diseño (Top). Se define como temperatura operativa a la “temperatura uniforme de un recinto negro imaginario en el que un ocupante intercambiaría la misma cantidad de calor por radiación más convección que en el ambiente real no uniforme” (UNIT-ISO 17772-1, 2019) Si bien esta temperatura depende de la temperatura exterior de los días anteriores, se consideró en los resultados un rango establecido como criterio indicativo en la misma norma anteriormente citada para categoría II de espacios residenciales.

	Rango de temperaturas operativas (°C)	Temperatura de consigna (°C)
Calefacción	20-25	20
Refrigeración	23-26	26

Tabla 17. Rango de temperaturas operativas y de consigna

4.2 Verificación de modelos seleccionados

Temperatura del aire

Al tratarse de casos teóricos, en donde no es posible realizar mediciones de campo para la calibración del modelo de simulación, se realiza una verificación de los modelos simulados en función del comportamiento teórico esperado, según bibliografía de referencia (Aste et al., 2015). Al ser solamente una verificación del ingreso de datos, se realiza para Montevideo.

Para esto se simulan el caso de referencia y el caso base en distintas condiciones. En primer lugar, se simulan sin ventilación (sólo se consideran las infiltraciones) y sin cargas de uso. Esto permite observar el comportamiento diferencial de las temperaturas del aire según la envolvente sea pesada o liviana. En esta ocasión se grafica también el comportamiento de las temperaturas superficiales para los tipos de envolvente para observar el retardo térmico que se genera en cada caso. En segundo lugar, se simula con ocupación y con las cargas internas correspondientes. De esta forma, se corrobora el ingreso de los datos para esta nueva situación mediante las modificaciones en el comportamiento de la temperatura de aire interior. Finalmente, se simula para las condiciones de uso, sin considerar el uso de protecciones solares, como en los casos anteriores.

En las siguientes gráficas se muestran, a modo de ejemplo, los resultados obtenidos para la zona de estar con los dos tipos de envolventes, para la UH de planta baja, A3, (ver figura 15) y la UH de planta alta A13 (ver figura 16).

En ambas figuras se observa cómo, para el caso sin ocupación, la envolvente pesada presenta menor amplitud térmica que la envolvente liviana, verificando lo planteado por Jannat (Jannat et al., 2020) y Verbeke (Verbeke & Audenaert, 2018). Estos datos se complementan con los que se presentan en la tabla 18, que son los promedios de las distintas temperaturas del aire interior de cada zona térmica, obteniendo una referencia para toda la unidad habitacional. Se identifica una diferencia de entre 2 y 3 °C en los niveles de planta baja y alta, respectivamente, para cada sistema constructivo.

Cuando se simula con ocupación, se observa un incremento de las temperaturas interiores constatando el aumento de las cargas internas de uso. Ver figuras 15 y 16.

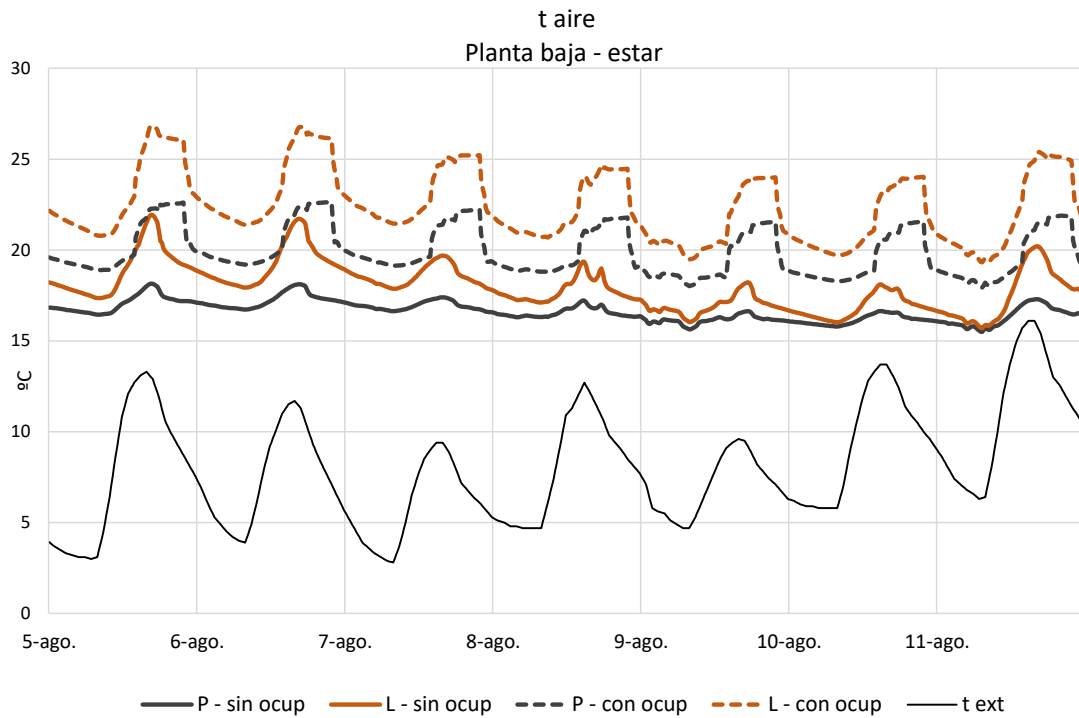


Figura 15. Temperatura del aire para la UH de planta baja A3 con y sin ocupación, sin ventilación para el sistema constructivo pesado (P) y sistema constructivo liviano (L) los días 5 al 11 de agosto

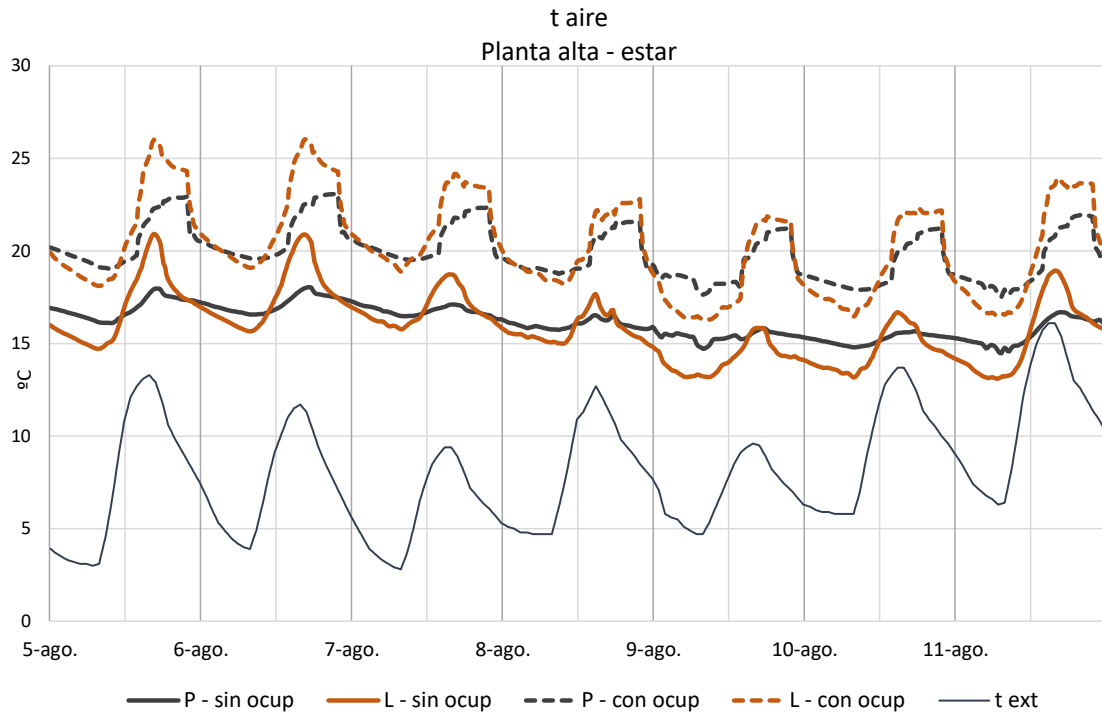


Figura 16. Temperatura del aire para la UH de planta alta A13 con y sin ocupación, sin ventilación para el sistema constructivo pesado (P) y sistema constructivo liviano (L) los días 5 al 11 de agosto

		Planta baja		Planta alta	
		Pesado	Liviano	Pesado	Liviano
Período caluroso	tx	31.7	37.6	35.6	41.5
	tn	21.6	24.9	25.9	24.9
	txm	28.3	32.0	31.6	35.1
	tnm	26.9	28.5	29.5	29.5
	tm	27.6	30.2	30.6	32.3
	A	1.4	3.5	2.1	5.6
Período frío	tx	29.8	35.4	32.1	36.4
	tn	14.8	14.0	13.4	10.8
	txm	21.8	25.0	22.9	25.5
	tnm	20.4	21.5	20.8	20.1
	tm	21.1	23.2	21.8	22.8
	A	1.4	3.5	2.0	5.4

Tabla 18. Promedios de temperaturas del aire y amplitud térmica por UH según período

Temperaturas superficiales

La gráfica de temperaturas superficiales, en la figura 17, permite comprobar el efecto de la masa térmica en la envolvente. De esta forma, si en un día comparamos la hora en que se sucede la máxima temperatura del aire exterior y la hora en que se dan las máximas temperaturas superficiales de cada envolvente, se aprecia un mayor desfase en la envolvente pesada que en la envolvente liviana. Estas

diferencias en el andamio de temperaturas coincide con lo presentado por Reilly (Reilly & Kinnane, 2017) para los distintos tipos de envolvente, siendo la pesada la que presenta mayor retardo.

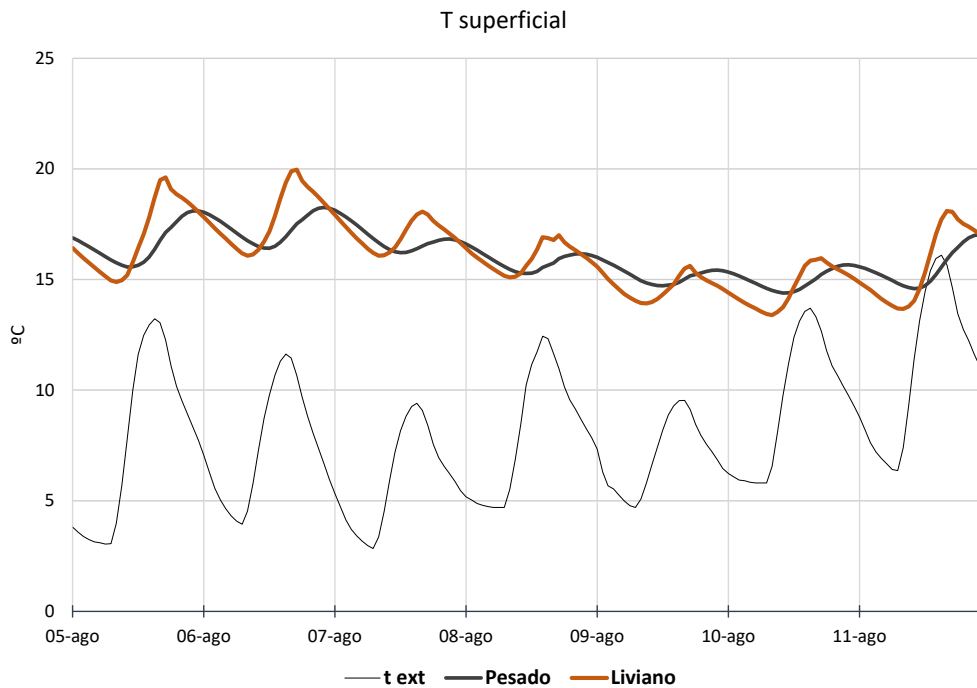


Figura 17. Temperaturas superficiales para envolvente pesada y liviana para los días 5 al 11 de agosto

Demanda de energía

Para la demanda de energía térmica para calefacción y refrigeración se calcula el total de kWh/año por unidad habitacional para distintas condiciones de ocupación y ventilación de cada tipo de envolvente. En la Figura 18, se observa que para la UH de planta baja sin ventilación natural el sistema constructivo pesado (SCP) presenta mayor demanda energética total anual que el sistema liviano (SCL), con una mayor demanda para calefacción que para refrigeración. Sin embargo, al estudiarlo con ocupación la situación se invierte y es el SCL el que presenta mayor demanda total principalmente de refrigeración al aumentar las cargas internas mientras que para el SCP se reduce la calefacción por el mismo motivo y la refrigeración aumenta, pero en menor valor. A su vez, los resultados para la planta alta evidencian la incidencia de una mayor área expuesta al contar con el techo como superficie de intercambio de calor; debido a ello las demandas aumentan para ambas condiciones de ocupación y sistema constructivo. De esta manera, los resultados reproducen lo expuesto por Jannat en referencia al factor forma que relaciona el total de área expuesta con el volumen interno acondicionado. (Jannat et al., 2020).

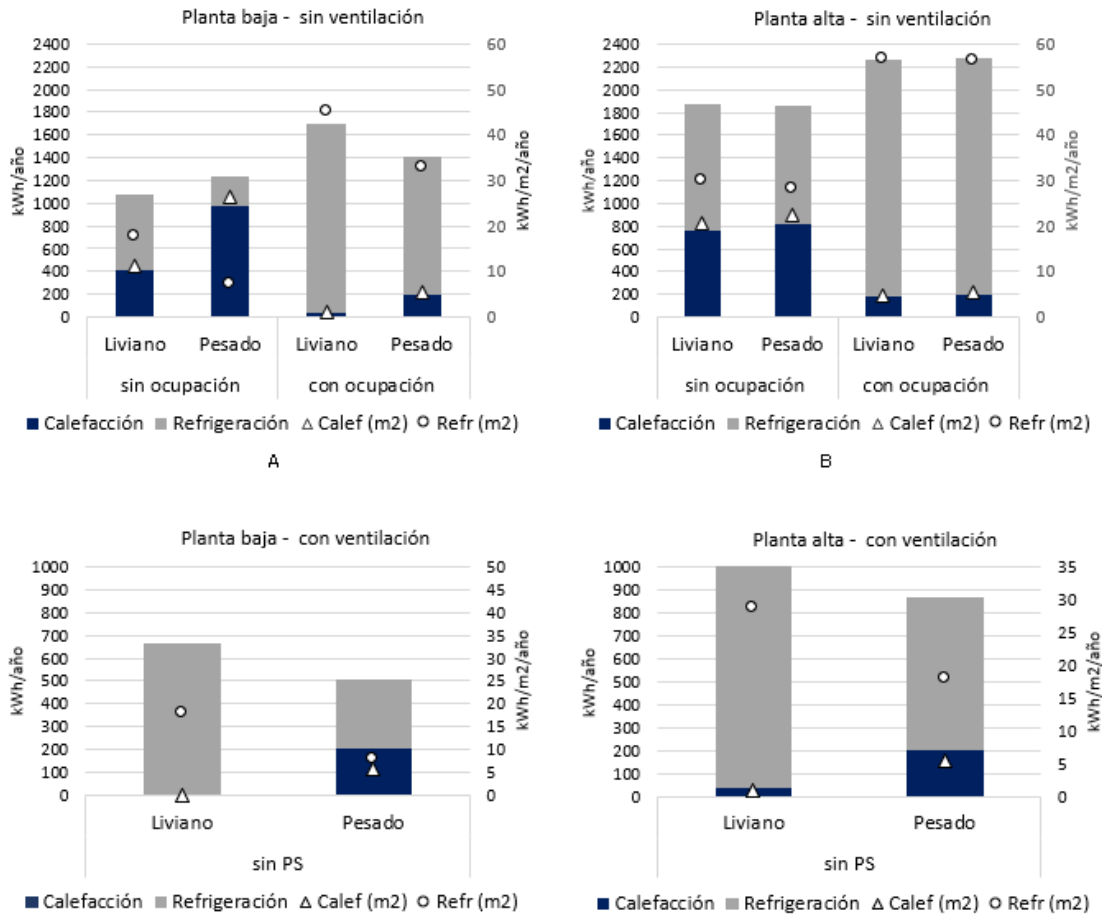


Figura 18. Demanda de energía para calefacción y refrigeración anual por UH, para los dos sistemas constructivos

Horas de confort térmico

Finalmente, se presenta en la figura 19 un análisis de horas de confort según la temperatura operativa. Se presenta el total de horas de confort y desconfort por frío o calor para cada unidad habitacional, en función de las horas de uso y considerando ventilación natural según estén dadas las condiciones para implementarla.

Para el caso de planta baja, la envolvente pesada presenta un total de 65% de las horas dentro del rango de confort, 21% de horas en que la temperatura operativa está por arriba del rango recomendado y 13% en desconfort por frío (ver figura 19-A). Mientras que la envolvente liviana presenta 47% de horas dentro del rango de confort, 42% de horas en condición de desconfort por calor y 11% por frío (ver figura 19-B). Esto significa que la envolvente pesada tiene un 38% más de horas dentro del rango de confort que la envolvente liviana y 36% menos en condición de desconfort por calor. Estos datos se complementan con los que muestra la tabla 19, en donde se aprecian los valores de temperatura del aire.

Estas diferencias se ven reducidas en la planta alta pero la envolvente pesada continúa presentando mayores porcentajes de horas en condiciones de confort y menores de disconfort (ver figura 19-C y D).

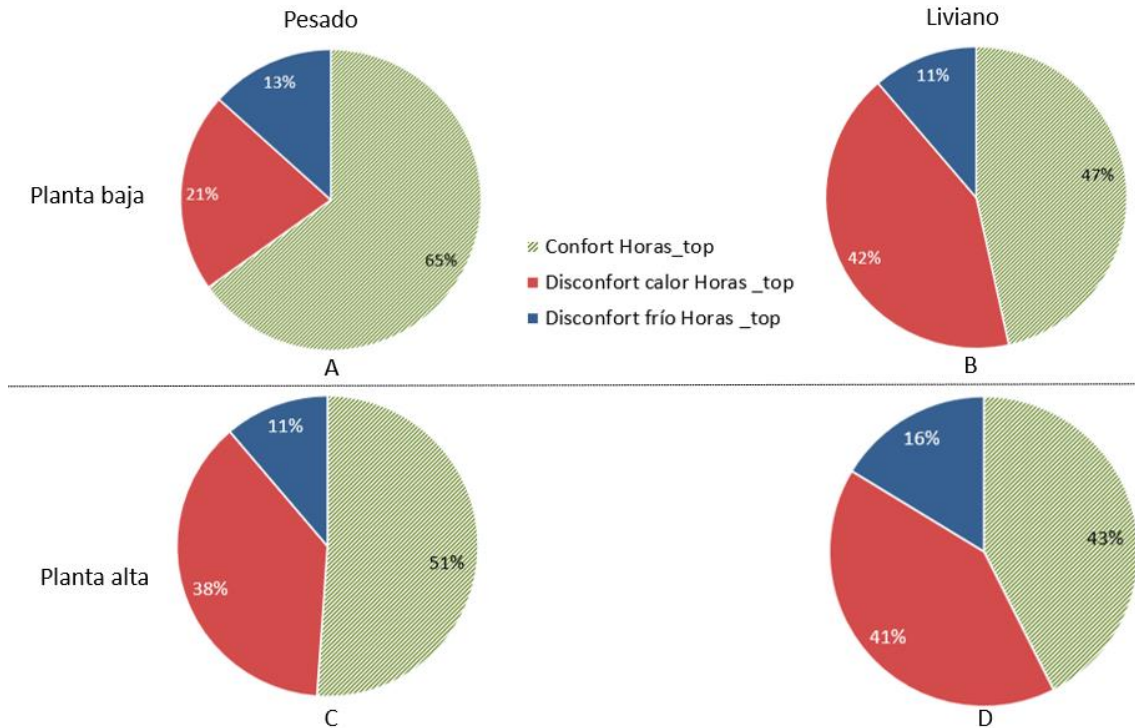


Figura 19. Porcentaje de horas de confort, disconfort por calor y disconfort por frío según temperatura operativa de diseño y para período de ocupación.

		Planta baja		Planta alta	
		Pesado	Liviano	Pesado	Liviano
Período caluroso	tx	30.6	34.1	33.0	36.0
	tn	19.4	18.7	18.9	18.4
	txm	27.0	28.5	28.2	29.6
	tnm	22.0	21.9	21.4	21.0
	tm	24.5	25.2	24.8	25.3
	A	4.9	6.6	6.8	8.6
Período frío	tx	30.4	36.2	33.3	37.5
	tn	17.7	18.5	16.6	14.9
	txm	25.0	28.8	26.3	28.6
	tnm	22.5	25.1	23.6	23.7
	tm	23.8	27.0	25.0	26.1
	A	2.4	3.7	2.7	4.9

Tabla 19. Temperatura del aire y amplitud térmica por UH para condiciones de uso sin protección solar

4.3 Propuestas relacionadas al diseño arquitectónico

Una vez verificado el comportamiento teórico de los dos sistemas constructivos, en este apartado se presentan las propuestas de modificaciones para lograr un mejor comportamiento térmico del caso

base (sistema liviano). Las propuestas aquí presentadas son seleccionadas por ser consideradas recursos de diseño. Es decir, son decisiones adoptadas al momento de proyectar incluyendo aquellas que permitan al usuario controlar las ganancias y pérdidas de energía, pero sin modificar el sistema constructivo. En el capítulo siguiente se presentan los resultados obtenidos para cada propuesta.

Se consideran las siguientes propuestas:

- Uso de Protecciones solares
- Incorporación de masa térmica en pisos y tabiques interiores
- Ventilación continua
- Sombreamiento exterior
- Factor de huecos
- Orientación solar

Asimismo, también se estudia la incidencia de la variación de la carga por ocupación. Si bien, no es una variable de diseño, se analiza el impacto en la demanda energética para calefacción y refrigeración al variar la cantidad de personas en la vivienda, es decir, las ganancias por ocupación.

4.3.1 Protecciones solares

Se considera el uso de protecciones solares en la fachada del edificio como estrategia de diseño. En este sentido se estudiaron tres tipos de protecciones solares, dos vinculadas al diseño arquitectónico de proyecto: protección solar exterior fija (alero) y protección solar exterior móvil y otra librada más a la decisión del usuario – protección solar interior móvil- que se estudia por separado.

4.3.1.1 Protección solar móvil exterior (PSE)

Al caso base se le incorpora en cada una de las ventanas una protección solar exterior del tipo cortina de enrollar con las siguientes propiedades físicas y de accionamiento.

Color	Claro
Factor solar	0.2
Conductividad	0.1 W/mK
Condición de accionamiento	Cuando la temp ext > 19°C
Período de accionamiento	Todo el año

Tabla 20. Características de protección solar exterior

4.3.1.2 Protección solar fija exterior (PSF)

Para este tipo de protección se considera un alero del ancho de la ventana y de 74 cm de profundidad. Esta dimensión se desprende de considerar una extensión del techo de 1 m, a modo de alero, en toda la envolvente para el estudio como sombreado exterior. De esta forma, con esta dimensión se logra analizar el impacto del sombreado en las paredes opacas de forma independiente, al tener como referencia el impacto sobre las superficies vidriadas. En la figura 20 se muestran las dimensiones adoptadas. El factor solar para el alero es 0.45, correspondiente a una relación $Y/L = 1.5$.

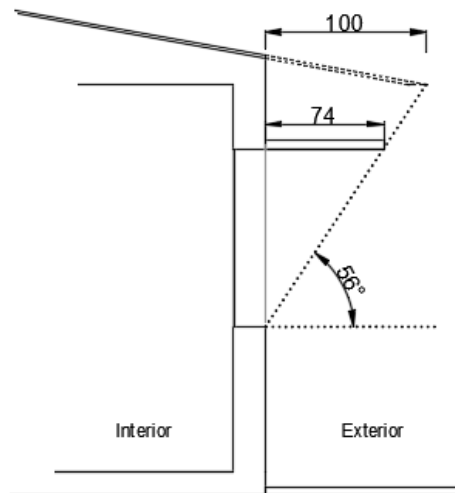


Figura 20. Proporciones del alero

4.3.1.3 Protección solar móvil interior (PSI)

En este caso se seleccionó una cortina de tela opaca clara, con las siguientes propiedades:

Factor solar	0,40
Transmitancia solar	0,1
Reflectancia solar	0,8
Conductividad	0,1 W/mK
Condición de accionamiento	Cuando la temp ext > 19°C
Período de accionamiento	Todo el año

Tabla 21. Propiedades de cortina interior

4.3.2 Masa térmica

Para esta estrategia se consideran tres opciones de aplicación de masa térmica. Al ser un edificio de 2 pisos, permitió las siguientes opciones:

4.3.2.1 Masa térmica en pisos (MT PEP)

En esta ocasión se sustituyen los materiales del piso y el entrepiso. Esto implica que la planta baja quede con los dos cerramientos horizontales con materiales pesados. Las nuevas composiciones del piso y entrepiso corresponden a las utilizadas en el caso de referencia.

4.3.2.2 Masa térmica en pisos y techo (MT PEPT)

Al modelo anterior de masa térmica en piso, se le agrega la masa térmica en el techo. Es decir, todos los cerramientos horizontales cuentan con masa térmica. La nueva conformación del techo es igual a la utilizada en el caso de referencia.

4.3.2.3 Bloques de hormigón curado en autoclave (HCCA)

Se considera la sustitución de los tabiques interiores livianos por bloques de HCCA. Las características de estos bloques son las que se muestran a continuación:

Espesor	0,125 m
Densidad	680 kg/m ³
Conductividad térmica	0,12 W/m K
Calor específico	1000 J/kg K
Masa térmica	85 kg/m ²

Tabla 22. Propiedades bloques HCCA

4.3.3 Ventilación continua (VC)

Esta estrategia está íntimamente vinculada a la acción de los usuarios. En esta estrategia se considera que la ventilación puede accionarse siempre que las condiciones lo permitan, independientemente de si el local está ocupado o no, a diferencia del modelo de referencia donde únicamente se ventila cuando el local está ocupado.

4.3.4 Sombreamiento exterior (Somb Ext)

Para esta estrategia se considera un alero de 1 m de profundidad a lo largo de toda la fachada, de forma de generar sombra tanto en los cerramientos transparentes como en los opacos. La profundidad del alero genera un ángulo de cielo visto desde la ventana igual al generado por la protección fija. De esta forma se puede observar la incidencia del sombreado sobre los opacos.

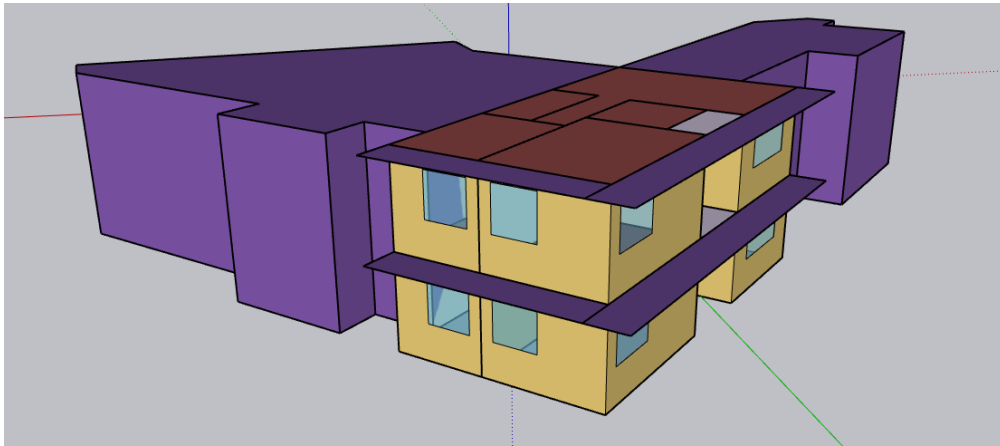


Figura 21. Estrategia sombreado exterior

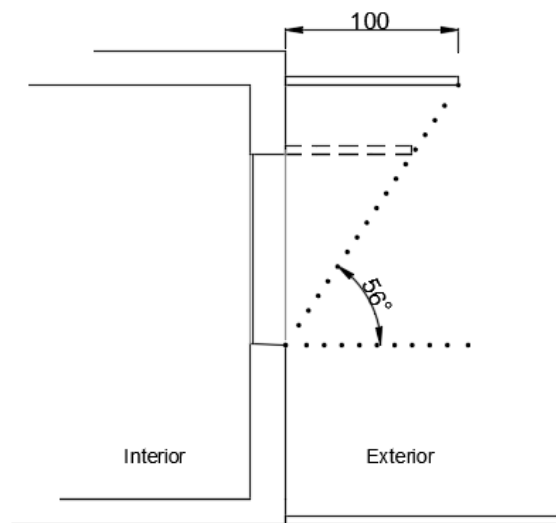


Figura 22. Proporciones de protección solar

4.3.5 Factor de huecos (FH)

Según el ámbito de aplicación, el factor de huecos puede tener diferentes definiciones. Se toma la definición dada por la Intendencia de Montevideo que define al factor de huecos como la relación entre el área vidriada y el área total de la fachada que lo contiene (Resolución 2829/09, IM). El factor de huecos de los locales se presenta en la siguiente tabla:

	Átransparente / ÁFachada		Ávano / Ápiso	
	Caso	Máximo admitido	Caso	Mínimo admitido
Dormitorio NE	0.2	0.6	0.16	0.1 ilum /0.05 vent
Dormitorio NO	0.1	0.6	0.21	0.1 ilum /0.05 vent
Estar	0.3	0.6	0.10	0.1 ilum /0.05 vent

Tabla 23. Relación de área vidriada en los locales

Como se aprecia en la tabla 23, los porcentajes son sensiblemente menores al máximo permitido.

Por otro lado, también continuando con la normativa departamental, la misma establece para locales habitables una relación de área de vanos sobre área de piso no menor a 0,10 para el requerimiento de iluminación y no menor a 0,05 para ventilación.

Atr/Ápiso \geq 1/10 para iluminación

Atr/Ápiso \geq 1/20 para ventilación

Según este criterio, el caso de estudio cumple con lo requerido, con valores no muy superiores a los solicitados, ver Tabla 23.

Por estos motivos es que se estudia la incidencia en la demanda de energía y en confort de llevar el factor de huecos del caso base al máximo valor posible, esto es 60% de huecos en cada fachada.

4.3.6 Orientación solar

Esta estrategia se estudia para ver cómo incide la orientación tanto en la demanda de energía como en las condiciones de confort. Si bien el caso de estudio tiene una orientación dada, se considera como variable en caso de poder contar con esta posibilidad. Al tener el caso de estudio orientación hacia los cuadrantes norte, se estudia para una orientación hacia los cuadrantes sur, resultando en un giro de 180°.

4.3.7 Variación en la ocupación

La ocupación resulta ser un factor de peso en la demanda de energía para climatización (Pungercar et al., 2021). Para estudiar la incidencia de la ocupación se simula el mismo caso con 5 ocupaciones distintas (de 1 a 5 personas), siendo el caso base para 4 personas.

El peso relativo de la ocupación se verifica mediante la combinación de variación de ocupación en dos estrategias diferentes. Una estrategia se puede entender de prevención, es decir, tendiendo a reducir las ganancias en el local para no agregar calor al aumento de ocupación: sombreamiento. La otra estrategia, entendida como mitigación, vinculada a la disipación de calor generado en el interior: ventilación.

5 Resultados

En esta sección se presentan los resultados de las simulaciones realizadas para las dos localidades de referencia. Asimismo, se muestran por separado los resultados de demanda de energía para climatización y el comportamiento de las temperaturas en fluctuaciones libres.

5.1 Montevideo

5.1.1 Demanda energética

Para el estudio de la demanda energética para refrigeración y calefacción se toma como indicador el consumo total anual como parámetro de comparación entre las diferentes estrategias. Esto es, la energía para calefacción y refrigeración que se necesita en un período de un año para alcanzar la temperatura del aire establecida.

En la gráfica que se presenta en la figura 23 de la página 43 se representa este indicador para todas las estrategias seleccionadas para el caso base, expresado en kWh/año, y para cada unidad habitacional estudiada. Se incluye, para complementar, la comparación de los valores para el caso de referencia con y sin protección solar. A modo de recordatorio, el **caso de referencia** corresponde al modelo con **envolvente pesada** y el **caso base** al modelo con **envolvente liviana** sin estrategias incorporadas.

Sobre el factor forma, se observa que para la unidad habitacional (UH) ubicada en planta baja, A3, los valores son menores que para la planta alta (A13), verificando el impacto del techo como incremento del área expuesta en la demanda de energía térmica. Esta diferencia representa, en promedio, el doble de demanda en la planta alta, para todas las estrategias. La mayor diferencia se aprecia para la estrategia de masa térmica para piso únicamente (MT PEP - 918 kWh/año), donde la demanda en planta alta se incrementa 2,5 veces en relación con la planta baja (260 kWh/año).

En línea con lo que presenta Chen (Chen et al., 2016), para la unidad en planta alta la estrategia de protección solar exterior (PSE) es la que presenta menor demanda de energía total (411 kWh/año) y le siguen dos estrategias más de sombreamiento. La estrategia de factor de huecos (FH) es la que arroja mayor demanda total anual (2743 kWh/año), incluso sobrepasando la del caso base debido al aumento de área transparente.

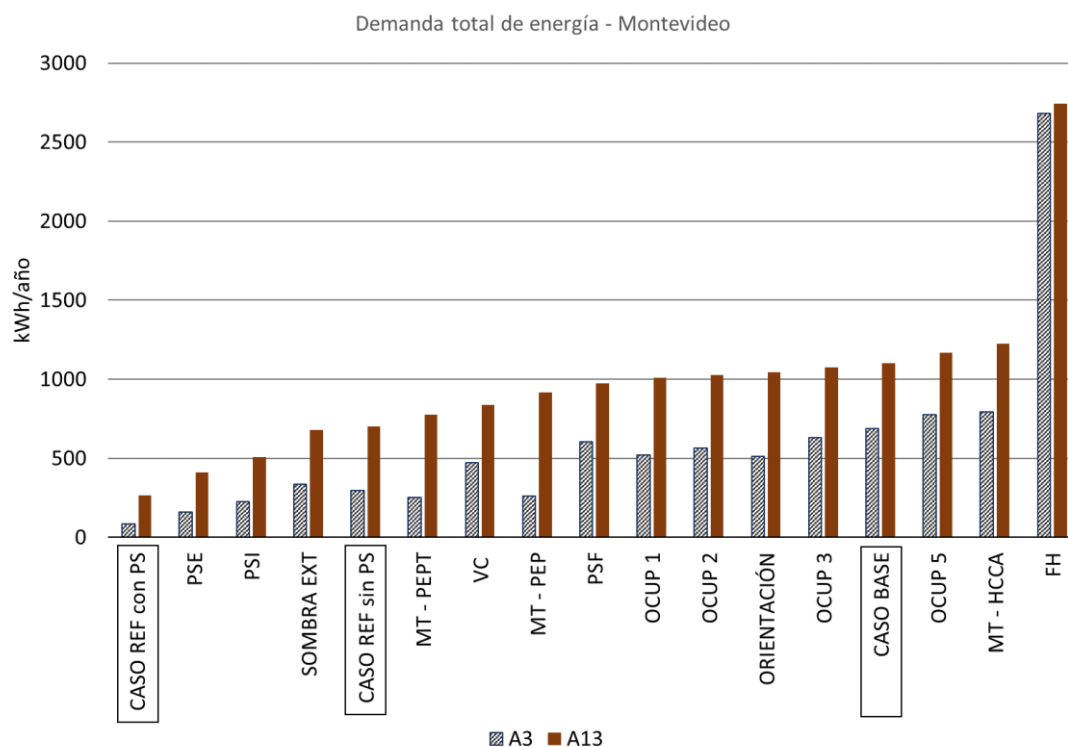


Figura 23. Demanda de energía total anual para calefacción y refrigeración, para apartamento en planta baja (A3) y planta alta (A13), en Montevideo

CASO BASE = envoltura liviana sin estrategias aplicadas, 4 personas

CASO REF con PS = envoltura pesada con protección solar exterior móvil

CASO REF sin PS = envoltura pesada sin protección solar

FH = factor de huecos $\text{Átr}/\text{Áfach} = 0.60$

MT PEPT= masa térmica en piso, entrepiso y techo

MT PEP = masa térmica en piso y entrepiso

MT-HCCA = masa térmica interior bloques de hormigón celular curado en autoclave

OCUP 1 = 1 persona en la UH

OCUP 2 = 2 personas en la UH

OCUP 3 = 3 personas en la UH

OCUP 5 = 5 personas en la UH

ORIENTACIÓN = giro de 180° de la unidad respecto al norte

PSE = protección solar exterior móvil

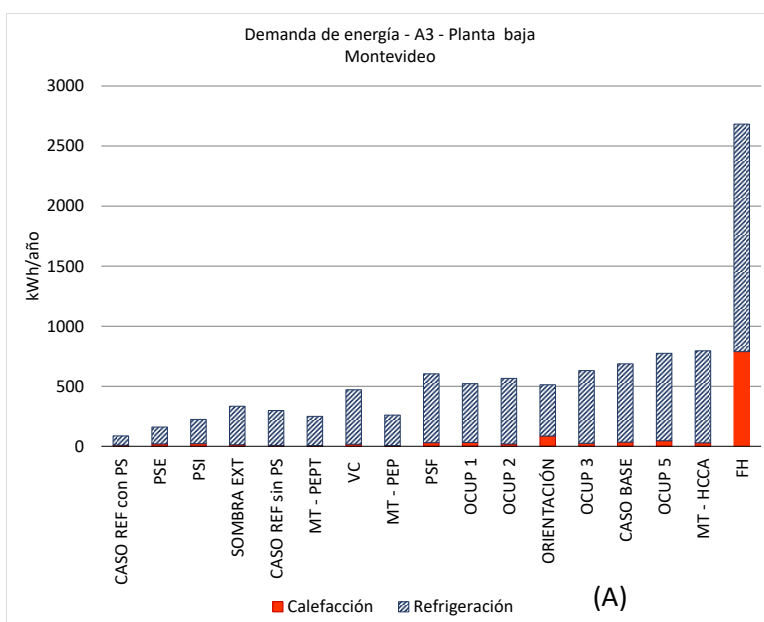
PSI = protección solar interior

PSF= protección solar exterior fija

SOMBRA EXT = sombreamiento exterior

VC = ventilación continua

En la Figura 24 están representados los resultados de demanda energía de cada estrategia para cada período para las dos UH, planta baja A3 (parte A) y planta alta A13 (parte B). En ambos niveles, se aprecia un mayor peso de refrigeración en todas las estrategias, así como una mayor incidencia de la demanda de calefacción en planta alta que en planta baja. Por otro lado, se observa cómo con la estrategia FH, al aumentar el área de vidrio, se incrementa aproximadamente 2,5 veces la refrigeración respecto al caso base, pero entre 8 y 22 veces la calefacción (planta alta y planta baja, respectivamente, 420 kWh/año y 788 kWh/año) para el mismo caso base (51 y 35 kWh/año), verificando el impacto de las pérdidas térmicas a través de la envolvente, al aumentar la transmitancia térmica media de la envolvente.



- CASO BASE = envolvente liviana sin estrategias aplicadas
- CASO REF sin PS = envolvente pesada sin protección solar
- CASO REF con PS = envolvente pesada con PS exterior móvil
- FH = factor de huecos Átr/Áfach = 0.60
- MT PEPT= masa térmica en piso, entepiso y techo
- MT PEP = masa térmica en piso y entepiso
- MT – HCCA = masa térmica interior bloques de hormigón celular curado en autoclave
- OCUP 1 = 1 persona en la UH
- OCUP 2 = 2 personas en la UH
- OCUP 3 = 3 personas en la UH
- OCUP 5 = 5 personas en la UH
- ORIENTACIÓN = giro de 180°
- PSE = protección solar exterior móvil
- PSI = protección solar interior
- PSF= protección solar exterior fija
- SOMBRA EXT = sombreado exterior
- VC = ventilación continua

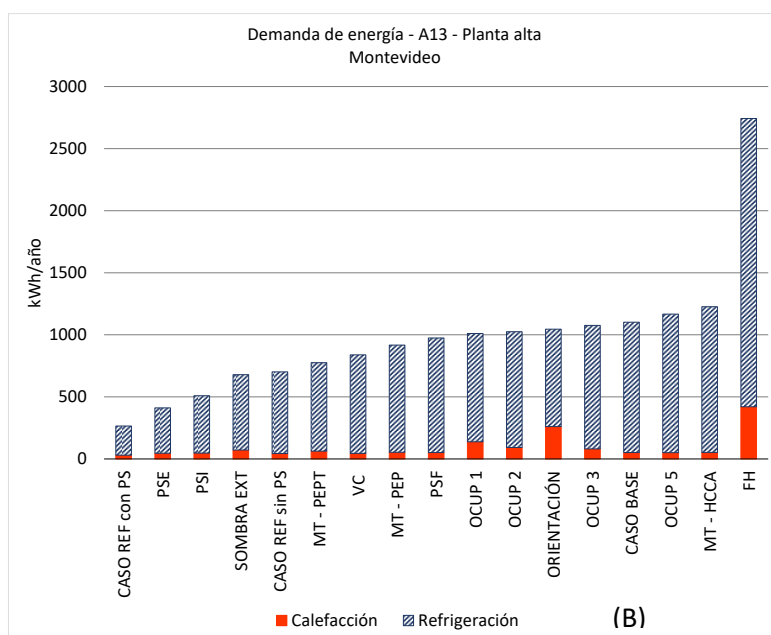


Figura 24. Demanda de energía para calefacción y refrigeración para UH A3 (A) y A13(B)

Estrategia	A3			A13		
	Calefacción	Refrigeración	Total	calefacción	refrigeración	Total
CASO REF con PS	9	77	86	30	235	265
PSE	19	141	160	46	365	411
PSI	22	202	225	47	462	509
SOMBRA EXT	13	320	334	72	607	679
CASO REF sin PS	9	289	298	43	658	701
MT - PEPT	6	244	250	62	713	776
VC	17	454	471	45	793	838
MT - PEP	6	253	260	54	864	918
PSF	30	573	604	51	923	974
OCUP 1	31	490	522	138	872	1011
OCUP 2	20	546	566	92	933	1025
ORIENTACIÓN	86	427	513	260	786	1046
OCUP 3	25	605	630	81	995	1076
CASO BASE	35	652	687	51	1051	1102
OCUP 5	46	729	775	50	1116	1167
MT - HCCA	29	766	795	53	1173	1226
FH	788	1895	2683	420	2323	2743

Tabla 24. Demanda de energía (kWh) de calefacción, refrigeración y total anual para las dos unidades

Para poder observar la incidencia de cada estrategia a partir de los resultados obtenidos de las diferentes simulaciones, se calcula el coeficiente comparativo de cada estrategia de la siguiente manera:

$$\text{Coeficiente comparativo} = \frac{\text{demanda de energía total de la estrategia simulada}}{\text{demanda de energía total del caso de referencia}}$$

De esta forma, se puede apreciar la eficiencia de cada estrategia al compararla con el caso de referencia (construcción tradicional sin protección solar).

En la Tabla 25 se presentan los coeficientes comparativos para cada estrategia, ordenados de menor a mayor según resultados del apartamento en planta alta (A13).

Estrategia	Coeficiente comparativo	
	A3	A13
CASO REF sin PS	1.00	1.00
CASO REF con PS	0.29	0.38
PSE	0.54	0.59
PSI	0.75	0.73
SOMBRA EXT	1.12	0.97
MT - PEPT	0.84	1.11
VC	1.58	1.20
MT - PEP	0.87	1.31
PSF	2.03	1.39
OCUP 1	1.75	1.44
OCUP 2	1.90	1.46
ORIENTACIÓN	1.72	1.49
OCUP 3	2.12	1.54
CASO BASE	2.31	1.57
OCUP 5	2.60	1.66
MT - HCCA	2.67	1.75
FH	9.01	3.91

Tabla 25. Coeficiente comparativo según caso de referencia

Factor de ahorro

Para comprender el potencial de ahorro de cada estrategia, se define el factor de ahorro como el valor complementario del coeficiente comparativo en relación con el caso de referencia, siendo 1 el valor máximo posible, esto es el mayor ahorro posible. Por otro lado, valores negativos representan la ausencia de ahorro.

$$\text{Factor de ahorro} = 1 - \text{coeficiente comparativo}$$

Según se observa en la Figura 25, las estrategias de protección solar exterior, protección solar interior y sombra exterior son las que obtienen un factor de ahorro positivo, con valores de 0.41, 0.27 y 0.03 respectivamente, cuando se comparan con el sistema constructivo pesado sin protección solar. Se observa que todas son estrategias de control de radiación solar. Es decir, el mayor impacto se aprecia en la reducción de aportes extra de ganancias térmicas, lo cual, a su vez, tiene mayor peso en la reducción de las cargas para refrigeración, representando el 35% respecto al modelo sin estrategias para la estrategia de protección solar exterior, tal como se desprende de la figura mencionada.

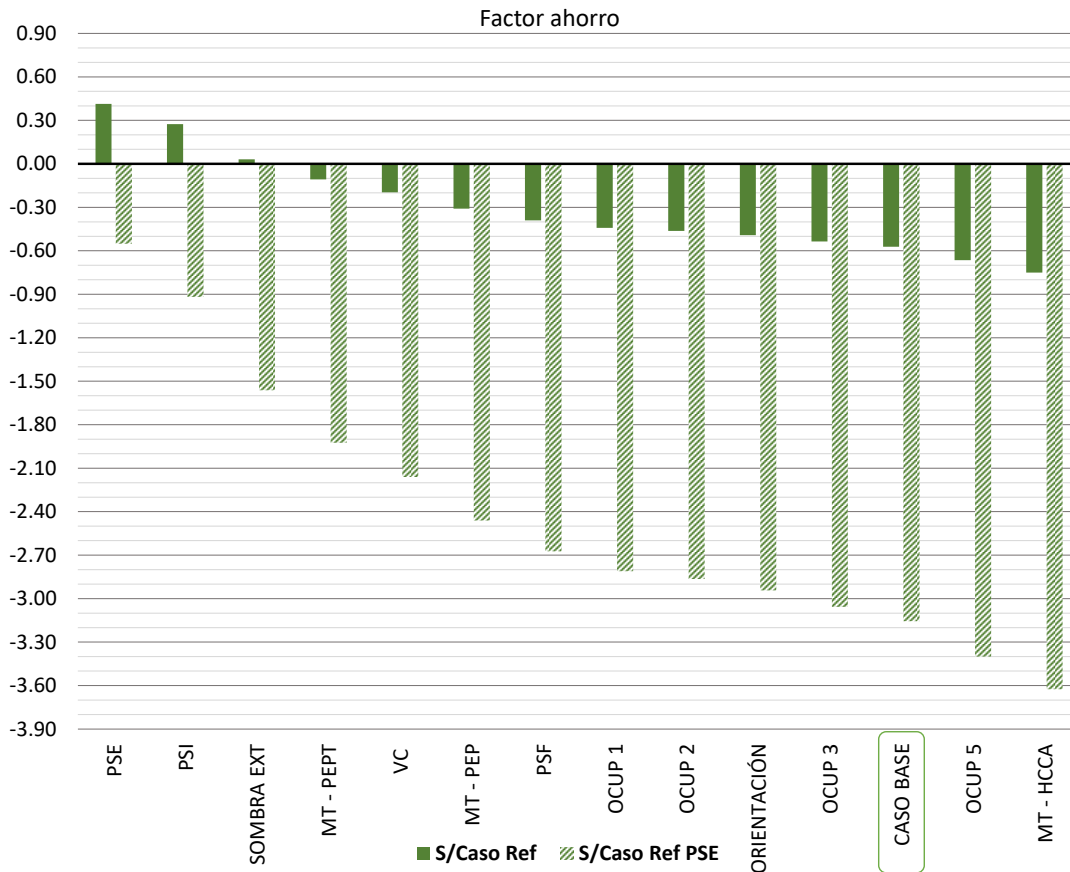


Figura 25. Factor de ahorro de las estrategias simuladas con relación al caso de referencia, para unidad A13

El resto de las estrategias corresponde a un coeficiente comparativo mayor a 1, lo que implica factores de ahorro negativos con relación al caso de referencia sin protección solar.

Por otro lado, cuando se comparan los desempeños con el del caso de referencia (pesado) que incluye protecciones solares ninguna estrategia presenta ahorros. Es decir, el edificio con el sistema constructivo liviano al aplicarle aún la mejor estrategia de forma individual, no se comporta mejor que el sistema pesado con protección solar.

Sobre el caso base

Con el fin de analizar la mejora en el desempeño térmico de las tipologías con el sistema liviano propuesto, se compara la eficiencia de las estrategias de diseño con relación al caso base (sistema liviano sin protección solar). La mayoría de las estrategias tienen un impacto positivo, demostrando un ahorro en la demanda total de energía para climatización. Las estrategias que no logran ahorro son mayor ocupación, tabiques internos con baja masa (bloques de HCCA) y mayor factor de huecos. En el caso de los bloques de HCCA, si bien incrementan la masa térmica del conjunto, no se considera como

cerramiento pesado al no superar los 120 kg/m². De esta forma, al colocarse como tabiques interiores el efecto de la conductividad térmica es prácticamente nulo y la capacidad térmica es menor que un cerramiento de mampuestos cerámicos o de hormigón. Las estrategias que sí implican ahorro son protección solar (exterior, interior o fija), sombreado exterior, mayor ventilación, incorporación de masa térmica y reducción en la ocupación. Es decir, colaboran al mejor desempeño por la reducción de ganancias térmicas: ya sea porque se controlan las externas o se reducen las internas, se genera una mayor disipación del calor o se aumenta la acumulación de energía térmica. En la Figura 26 se representan los factores de ahorro para cada estrategia respecto al caso base. Nuevamente, la estrategia que representa mayor ahorro es la protección solar exterior, con un factor de ahorro igual a 0.63.

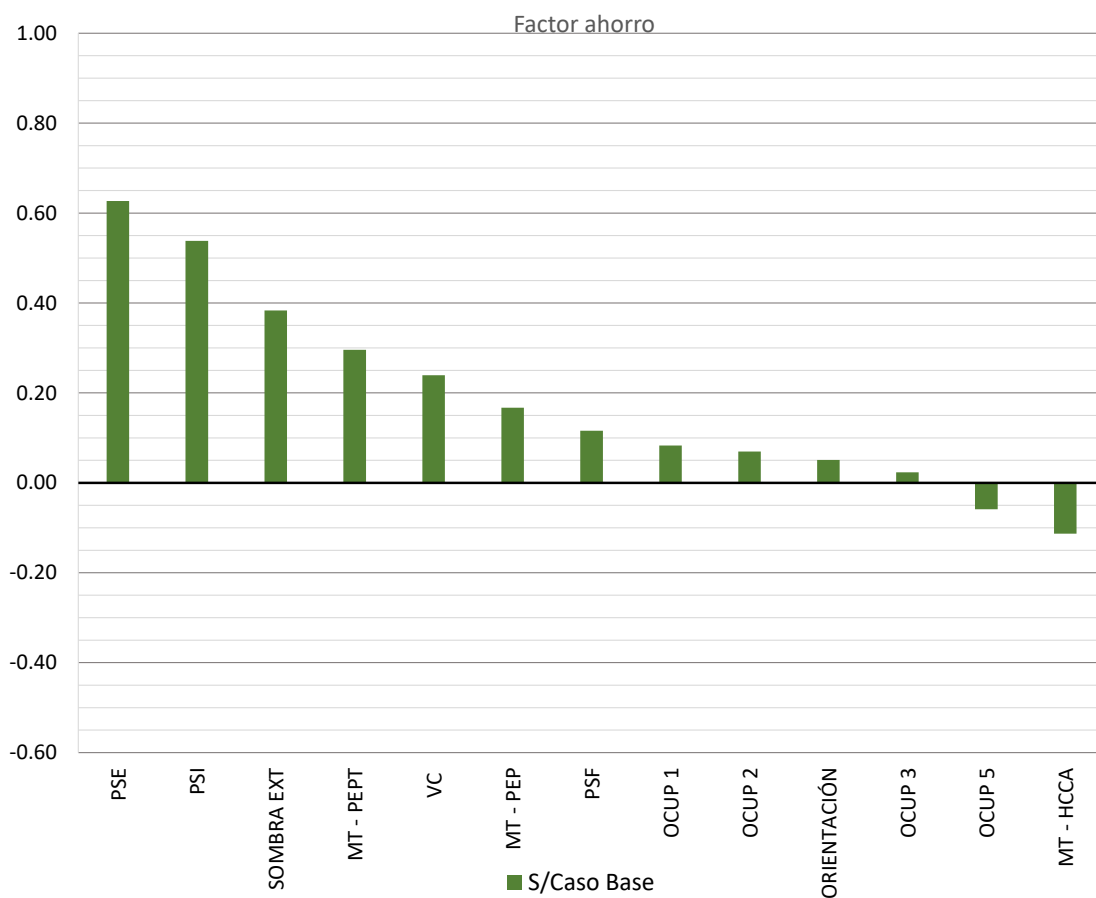


Figura 26. Factor de ahorro de las estrategias simuladas con relación al caso base, para unidad A13

Sobre la variación en ocupación

En la **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.** se muestran los valores obtenidos para la demanda total de energía anual para las diferentes ocupaciones, variando el número de personas, para la unidad A13 considerando el caso base y las estrategias Protección Solar Exterior y Ventilación

Continua. Se observa que a mayor ocupación mayor demanda para todas las opciones estudiadas. Se destaca la reducción en calefacción en menor medida que el incremento de refrigeración para los valores más altos de ocupación. Asimismo, la tasa de crecimiento de la refrigeración al aumentar la tasa de ocupación permanece constante, este comportamiento lineal no se constata en la reducción de

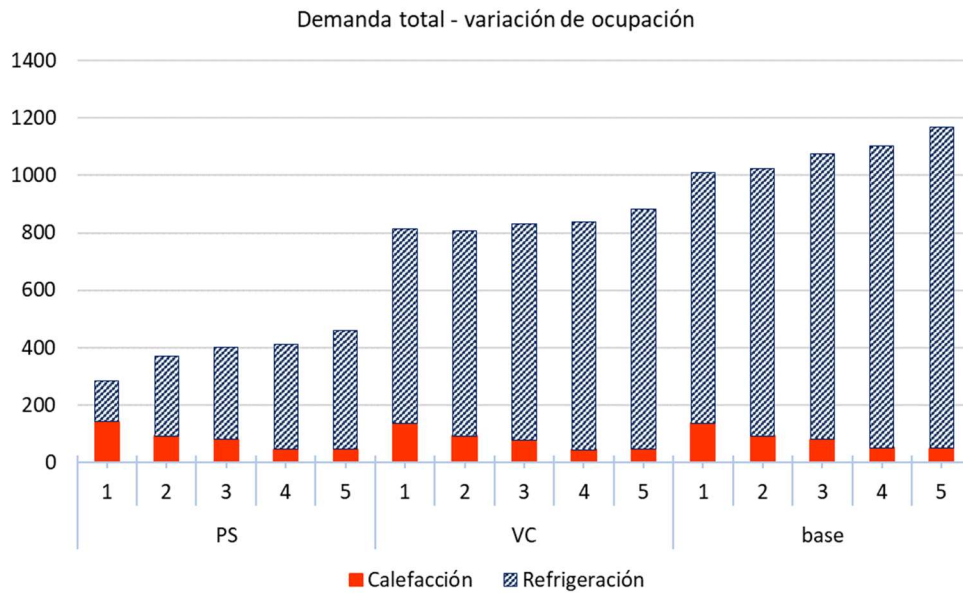


Figura 27. Demanda de energía total según variación de ocupación para UH A13

calefacción.

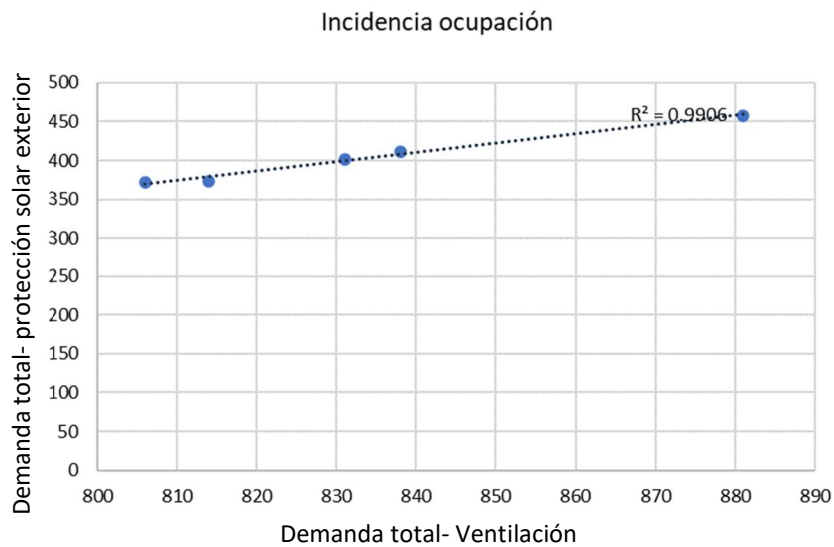


Figura 28. Correlación de demanda de energía entre la variación de ocupación con ventilación y con protección solar exterior para distintos tipos de ocupación

Por otra parte, en la Figura 28 se presenta la correlación existente entre las demandas energéticas totales al aplicar el incremento de ocupación con la estrategia de ventilación o con la de protección solar exterior.

Se aprecia una correlación muy próxima a 1, lo que sugiere que la incidencia en el incremento de número personas tiene en el mismo peso relativo para distintas estrategias aplicadas.

5.1.2 Fluctuaciones libres

Temperatura del aire

El estudio del comportamiento de las temperaturas interiores en fluctuaciones libres permite analizar las condiciones de confort térmico a partir de los valores de temperatura del aire interior cuando no hay aporte de energía complementaria para acondicionar los locales. Se puede comprender como una forma de medir el desempeño del diseño pasivo al independizarse de la energía auxiliar.

En este sentido, se presentan para cada uno de los casos simulados las siguientes variables, expresadas en °C: t_x : temperatura máxima absoluta

t_n : temperatura mínima absoluta

t_{xm} : temperatura máxima media

t_{mn} : temperatura mínima media

t_m : temperatura media del aire

A: amplitud térmica

A3		PESADO S/PS	PESADO PSE	SIN PS	PSE	PSI	PSF	MT PEP	MT PEPT	MT HCCA	VC	SOMB EXT	FH	OCUP 1	OCUP 2	OCUP 3	OCUP 5	ORIENT
P. Caluroso	t_x	30.6	27.8	34.1	29.5	29.1	33.6	30.1	30.2	34.7	31.9	32.0	39.3	33.8	33.9	33.9	34.1	33.2
	t_n	19.2	19.0	18.7	18.4	18.8	18.8	19.1	19.0	18.9	18.8	18.6	16.6	18.6	18.4	18.8	19.0	18.8
	t_{xm}	26.9	25.3	28.5	26.0	26.3	28.2	26.6	26.5	28.9	27.2	27.1	32.3	28.2	28.3	28.4	28.6	27.6
	t_{mn}	22.0	21.4	21.9	21.3	21.4	21.8	21.6	21.6	21.8	21.2	21.5	21.3	21.6	21.7	21.8	22.0	21.7
	t_m	24.4	23.4	25.2	23.6	23.8	25.0	24.1	24.1	25.3	24.2	24.3	26.8	24.9	25.0	25.1	25.3	24.7
P. Frío	t_x	28.6	26.8	31.8	28.5	29.1	31.5	28.7	28.6	32.4	30.1	30.2	40.0	31.6	31.7	31.7	31.9	30.9
	t_n	17.5	17.3	17.8	17.8	18.8	17.6	18.0	17.9	16.6	18.4	17.2	12.5	16.2	17.0	17.4	18.0	15.1
	t_{xm}	24.3	23.8	26.4	25.7	25.8	26.3	24.5	24.4	26.5	25.5	25.5	30.3	25.7	26.0	26.3	26.6	23.8
	t_{mn}	21.8	21.3	22.7	22.3	22.4	22.6	21.8	21.7	22.3	22.3	22.1	21.6	22.1	22.4	22.6	22.7	20.6
	t_m	23.0	22.5	24.5	24.0	24.1	24.4	23.2	23.1	24.4	23.9	23.8	25.9	23.9	24.2	24.5	24.6	22.2
Año	A	3.7	3.2	5.2	4.0	4.2	5.0	3.9	3.8	5.6	4.6	4.5	9.8	5.1	5.1	5.1	5.2	4.5

(A)

A13		PESADO S/PS	PESADO PSE	SIN PS	PSE	PSI	PSF	MT PEP	MT PEPT	MT HCCA	VC	SOMB EXT	FH	OCUP 1	OCUP 2	OCUP 3	OCUP 5	ORIENT
P. Caluroso	t_x	33.0	30.1	36.0	30.7	33.9	35.7	31.2	33.5	36.6	34.5	34.6	42.0	35.9	36.0	36.0	36.1	35.9
	t_n	18.6	18.7	18.3	17.7	18.0	18.2	18.2	18.1	18.2	18.7	18.1	17.2	18.2	18.1	18.3	18.3	18.2
	t_{xm}	28.2	26.5	29.6	26.7	27.7	29.1	27.2	28.1	29.9	27.2	28.1	33.9	29.4	29.4	29.5	29.6	28.7
	t_{mn}	21.4	21.0	21.0	20.6	20.7	20.9	20.9	21.3	20.8	20.7	20.8	20.2	20.8	20.9	20.9	21.0	20.9
	t_m	24.8	23.7	25.3	23.6	24.2	25.0	24.1	24.7	25.4	24.0	24.4	27.1	25.1	25.2	25.2	25.3	24.8
P. Frío	t_x	30.8	28.8	32.4	30.3	30.9	32.2	31.9	31.1	32.8	31.4	31.4	40.9	32.4	32.4	32.4	32.5	31.9
	t_n	16.6	16.5	14.9	16.8	14.9	14.8	16.6	15.4	14.2	16.5	14.1	12.5	12.7	13.7	14.2	15.2	12.0
	t_{xm}	25.0	24.5	26.4	25.7	25.8	26.1	25.8	25.0	26.6	25.5	25.1	30.7	25.6	26.0	26.2	26.5	23.0
	t_{mn}	21.7	21.5	21.4	21.5	21.3	21.4	21.7	21.5	21.1	22.1	20.9	20.3	20.6	21.1	21.3	21.5	19.2
	t_m	23.4	23.0	23.9	23.6	23.5	23.8	23.8	23.2	23.8	23.8	23.0	25.5	23.1	23.5	23.7	24.0	21.1
Año	A	5.0	4.2	6.8	5.1	5.8	6.5	5.2	5.2	7.2	5.0	5.8	12.0	6.8	6.7	6.7	6.8	5.8

(B)

Tabla 26. Valores de temperatura del aire para la unidad A3 (A) y A13 (B)

Se marcan en rojo las temperaturas máximas medias que sobrepasan los 27 °C. Se observa, a excepción de la protección solar exterior, que las demás estrategias presentan valores de t_{xm} por encima del valor de referencia. Sin embargo, no se observan temperaturas mínimas medias por debajo de 18 °C, aunque sí se presentan mínimas absolutas por debajo de dicho valor. Estas diferencias se vinculan con la amplitud térmica que se presenta en cada caso, del orden entre los 5 y 7 °C diarios, en base anual, salvo cuando el factor de huecos crece en exceso (FH=60%) que presenta un promedio de amplitud diaria de 12 °C. En tanto, se observa que los valores mínimos de amplitud se relacionan a la presencia de masa térmica, tal como lo expresan Karlsson et al (Karlsson et al., 2012).

Horas de confort térmico

Si bien los parámetros anteriores sirven para caracterizar térmicamente un ambiente, para relacionarlo con las condiciones de confort se utiliza el parámetro de temperatura operativa, tal como se definió anteriormente, en 4.1.4.

En la Tabla 27 se presentan los porcentajes de horas de confort, disconfort por calor y disconfort por frío para las distintas estrategias, para las dos unidades estudiadas, según valores de temperatura operativa. Este valor, calculado según la norma ABNT 15755, representa el promedio anual del porcentaje de horas para cada zona térmica (correspondiente a cada ambiente) cuando hay ocupación.

A3 Planta baja	% horas			A13 Planta alta	% horas		
	Confort	Disconfort calor	Disconfort frío		Confort	Disconfort calor	Disconfort frío
CASO REF CON PS	72.3%	6.2%	21.5%	PESADO - c/PSE	59.0%	23.2%	17.9%
CASO REF SIN PS	66.0%	21.0%	13.0%	PESADO - s/PSE	51.0%	38.0%	11.0%
MT - PEP	65.8%	18.8%	15.4%	PSE	49.5%	30.4%	20.1%
MT - PEPT	65.8%	18.5%	15.7%	PSI	47.3%	33.1%	19.6%
SOMBRA EXT	56.3%	27.9%	15.8%	SOMBRA EXT	47.2%	31.0%	21.9%
PSE	56.2%	26.8%	17.0%	MT - PEPT	47.1%	39.3%	13.7%
PSI	54.6%	29.4%	15.9%	OCUP 5	44.4%	40.5%	15.0%
ORIENTACIÓN	50.0%	22.3%	27.7%	MT - PEP	44.1%	41.2%	14.7%
OCUP 5	48.8%	40.5%	10.6%	PSF	43.3%	39.3%	17.4%
PSF	47.4%	40.5%	12.1%	SIN PSE - caso base	43.0%	41.0%	16.0%
CASO BASE	47.0%	42.0%	11.0%	MT - HCCA	41.7%	40.5%	17.8%
FH	46.0%	37.4%	16.6%	OCUP 3	41.2%	40.4%	18.4%
OCUP 3	45.9%	41.1%	13.0%	VC	41.2%	34.0%	24.9%
MT - HCCA	45.9%	41.7%	12.5%	FH	41.0%	37.2%	21.8%
OCUP 1	45.8%	36.4%	17.8%	OCUP 2	40.2%	38.6%	21.2%
OCUP 2	45.4%	40.4%	14.2%	ORIENTACIÓN	39.7%	25.4%	34.9%
VC	38.6%	41.0%	20.4%	OCUP 1	39.2%	35.1%	25.7%

Tabla 27. Porcentaje de horas de confort y disconfort según temperatura operativa para todo el año

Para la unidad en planta alta, las tres estrategias que presentan más cantidad de horas de confort son las mismas que representan los mayores factores de ahorro. Sin embargo, con relación a la T_{op} la estrategia que también se presenta como eficiente es la masa térmica que, sin embargo, presenta un coeficiente de ahorro menor que las otras, como lo presentan Verbeke y Audenaert (Verbeke & Audenaert, 2018). Para la unidad en planta baja, las estrategias que presentan mayor porcentaje de horas de confort son las que incorporan masa térmica.

Las estrategias que se identifican como eficientes en cada caso, para planta baja y alta, no son las mismas. Esto se debe a que la unidad A3, en planta baja, presenta menor área expuesta al contar con el piso superior construido. Esto también significa que ya cuenta con sombreadamiento en su cerramiento horizontal.

5.1.3 Selección de estrategias

Para la selección de estrategias de mejoras se aplica un método basado en modelos matemáticos de decisión. Debido a que el estudio contempla aspectos energéticos y también de confort, se seleccionó el método TOPSIS (por sus siglas en inglés por "*Technique for Order Performance by Similarity to Ideal Solution*"), dentro de los modelos de decisión multicriterio basados en rankings. Es un método desarrollado por Hwang y Yoon (Hwang & Yoon, 1981) basado en un algoritmo matemático que permite ordenar las posibles alternativas, identificando la alternativa ideal y la anti-ideal para cada criterio establecido, a partir del cálculo de la distancia euclidiana (Ceballos et al., 2013). Se define entonces la mejor alternativa o solución como la que presenta la menor distancia a la alternativa ideal y mayor distancia a la anti-ideal o ideal negativa.

Para ello, los criterios establecidos son: demanda de calefacción, demanda de refrigeración, demanda total anual, porcentaje de horas de confort y porcentaje de horas de desconfort por calor. Para asignarle una ponderación a cada criterio, se toma como referencia una escala ya establecida por Saaty para el método AHP, según presenta Ceballos (Ceballos et al., 2013). En este caso, el porcentaje de horas de confort (en fluctuaciones libres) presenta la mayor ponderación, identificando como de mayor relevancia las condiciones de confort en el resultado. Asimismo, la demanda de energía tiene una ponderación significativa. En la Tabla 28 se muestra la escala de valores de referencia y en Tabla 29 se muestran las ponderaciones de cada criterio.

Valoración	Definición	Descripción
1	Igual importancia	dos elementos son igual de importantes
3	Importancia moderada	es moderadamente más importante un elemento que otro
5	Fuerte importancia	es más importante un elemento que otro
7	Altamente importante	es mucho más importante un elemento que otro
9	Extrema importancia	es extremadamente más importante un elemento que otro
2,4,6,8	Valores intermedios	valores intermedios

Tabla 28. Escala de valores para los criterios. Fuente propia adaptada de Ceballos et al y Pérez et al.

Criterio	Valoración	Beneficio
Demanda calefacción	2	negativo
Demanda refrigeración	2	negativo
Demanda total	5	negativo
% horas confort	6	positivo
% horas discomfort calor	3	negativo

Tabla 29. Ponderación de criterios seleccionados y beneficio asociado

En la Tabla 30 se muestran los resultados finales del cálculo para cada alternativa: la distancia a la alternativa ideal positiva (d^+) y a la alternativa ideal negativa (d^-), la distancia relativa a la solución ideal positiva (R_i) y el ranking de estrategias obtenido, para la unidad en planta alta.

Alternativa	d^+	d^-	Resultado final	Ranking
PSE	0.008	0.094	0.92	1
PSI	0.019	0.079	0.80	2
SOMBRA EXT	0.039	0.057	0.59	3
MT - PEPT	0.056	0.043	0.43	5
VC	0.066	0.031	0.32	4
ORIENTACIÓN	0.091	0.025	0.22	8
MT - PEP	0.077	0.021	0.21	6
PSF	0.084	0.014	0.14	7

Tabla 30. Resultados del método TOPSIS

En función de los resultados obtenidos, se seleccionaron las estrategias que demostraron un mayor impacto en la reducción de consumo total para cada apartamento.

Estas son:

- Protección solar exterior (PSE)
- Sombreamiento exterior
- Ventilación continua (VC)
- Masa térmica en pisos
- Masa térmica en pisos y techos

En función de quién o cuándo se toman las decisiones de diseño o de las pautas de uso, se agruparon de 3 formas:

Combinación básica: se seleccionaron las mínimas estrategias que se aplican usualmente al construir de forma liviana en altura: pisos pesados (MT PEP) y una estrategia de uso: protección solar interior (PSI).

Combinación arquitectura: se combinaron estrategias que implican una decisión de proyecto y que el usuario no puede o puede ser muy dificultoso aplicarlas: pisos pesados (MT PEP), protección solar exterior (PSE) y sombreado exterior.

Combinación arquitectura + usuario: a las estrategias anteriores se le agregan decisiones que involucran a usuario en cuanto a pautas de uso: ventilación continua.

Demanda de energía

Al aplicar más de una estrategia simultáneamente, los valores obtenidos de demanda energética se reducen significativamente, logrando factores comparativos de 0.09 para la unidad en planta baja (A3) y entre 0.4 y 0.49 para la unidad en planta alta (A13). Estos valores significan unos coeficientes de ahorro en promedio de 0.87 para la unidad A3 y entre 0.51 y 0.59 para A13. Si se compara con el desempeño del caso base para la unidad A13 (1102 kWh/año), se obtiene una demanda que corresponde al 39 % para la combinación básica (427 kWh/año) y al 29 % para la combinación arquitectura (316 kWh/año), obteniendo el mínimo de 26 % para la combinación de arquitectura y usuario (287 kWh/año).

De esta forma, el mejor resultado lo obtiene la combinación de estrategias que involucra tanto a las decisiones de diseño como al usuario, logrando una demanda correspondiente al 70 % respecto a la mejor estrategia cuando se aplica por separado (protección solar exterior, 411 kWh/año) para la unidad A13, para el caso base.

Con estos valores se obtiene una demanda de energía anual para climatización de 7 kWh/m², alcanzando valores similares al caso de referencia, sistema pesado, con protecciones solares.

Demanda anual (kWh)	A3			A13		
	Calefacción	Refrigeración	Total	Calefacción	Refrigeración	Total
COMB. BÁSICA	4	51	55	44	383	427
COMB. ARQ	18	8	26	69	247	316
COMB. AR Q + U	18	7	25	69	219	287

Tabla 31. Demanda anual de energía para las combinaciones de estrategias

% demanda sobre caso base	A3			A13		
	Calefacción	Refrigeración	Total	Calefacción	Refrigeración	Total
COMB. BÁSICA	12%	8%	8%	87%	36%	39%
COMB. ARQ	52%	1%	4%	136%	24%	29%
COMB. ARQ + U	51%	1%	4%	135%	21%	26%

Tabla 32. Porcentaje de demanda anual de energía para las combinaciones de estrategias con relación al caso base

	FC		CA	
	A3	A13	A3	A13
COMB. BÁSICA	0.08	0.39	0.92	0.61
COMB. ARQ	0.04	0.29	0.96	0.71
COMB. ARQ + U	0.04	0.26	0.96	0.74

Tabla 33. Factor de comparación y coeficiente de ahorro respecto al caso base

Comportamiento en fluctuaciones libres

Al combinar diferentes estrategias, se observa una reducción en las temperaturas medias y en la amplitud anual para todas las combinaciones. El mayor impacto se observa en planta baja (unidad A3) tal como se veían en los resultados anteriormente presentados para cada estrategia por separado. Asimismo, en planta alta (unidad A13) se aprecia una disminución en la amplitud térmica anual del orden de 1,5 °C, respecto a cada estrategia. De esta forma, los valores de temperatura media permanecen dentro del rango de confort para las dos unidades, durante todo el año. Los valores de temperatura mínima media y máxima media también se ubican dentro del rango de confort, a excepción de esta última para la combinación básica en la unidad A13. Sin embargo, para esta misma unidad, algunos de los valores de temperaturas absolutas quedan por fuera del rango, tanto del límite superior como del inferior. Mientras que para la unidad A3 todas las temperaturas se encuentran dentro del rango de confort.

A3		COMB. BÁSICA	COMB. ARQ	COMB. ARQ + U
P. Caluroso	tx	27.7	26.8	26.6
	tn	18.6	18.5	17.8
	txm	25.1	24.5	24.1
	tnm	21.1	20.8	20.4
	tm	23.1	22.6	22.2
P. Frío	tx	27.1	26.2	26.2
	tn	17.8	16.8	17.1
	txm	24.0	23.2	23.1
	tnm	21.3	20.2	20.4
	tm	22.7	21.7	21.7
Año	A	3.4	3.3	3.2

A13		COMB. BÁSICA	COMB. ARQ	COMB. ARQ + U
P. Caluroso	tx	32.6	31.6	31.7
	tn	18.4	17.6	16.8
	txm	27.3	26.5	26.0
	tnm	20.7	20.6	20.1
	tm	24.0	23.5	23.1
P. Frío	tx	30.5	29.5	29.7
	tn	15.3	14.6	14.6
	txm	25.3	24.2	24.3
	tnm	21.4	20.8	20.7
	tm	23.3	22.5	22.5
Año	A	5.3	4.7	4.7

Tabla 34. Valores de temperatura del aire para cada unidad

Horas de confort térmico

Al aplicar simultáneamente más de una estrategia, en la unidad de planta baja (A3) se observa un aumento de las horas de confort, logrando como mínimo 60 % de las horas de ocupación al año con condiciones de confort. Esto representa un aumento del 38 % sobre el caso base (47%). Para la unidad en planta alta (A13) el aumento es del 10 % (54.5 % para la combinación Arq + Usuario) sobre el caso base (49.5%) y se aprecia una reducción del porcentaje de horas de disconfort por calor pasando de ser el 41 % para el caso base al 18 % -combinación Arq + Usuario-. Asimismo, para esta unidad, el mayor porcentaje de horas de disconfort es por calor para la combinación básica, que utiliza protecciones solares interiores. Sin embargo, la combinación de arquitectura y usuario es la que presenta el mayor disconfort por frío (28 %), siendo superior al caso base (16 %).

A3	% horas			A13	% horas		
	Confort	Disconfort calor	Disconfort frío		Confort	Disconfort calor	Disconfort frío
COMB. BÁSICA	71.5%	6.3%	22.2%	COMB. BÁSICA	49.7%	31.3%	19.0%
COMB. ARQ	66.9%	0.9%	32.2%	COMB. ARQ	56.1%	18.7%	25.2%
COMB. ARQ + U	65.1%	1.0%	33.9%	COMB. ARQ + U	54.5%	17.8%	27.7%

Tabla 35. Porcentaje de horas de confort, disconfort por calor y disconfort por frío para cada unidad

Estos porcentajes son comparables a los estudios presentados por Harkouss et al. (Harkouss et al., 2018) para la zona climática 3, correspondiente a climas templados (necesidad de calefacción y refrigeración) luego de haber integrado las estrategias de refrescamiento pasivo, en donde el porcentaje de sobrecalentamiento en horas ocupadas se reduce entre 1 y 28 % (dependiendo de la localidad).

5.2 Salto

5.2.1 Demanda energética

Para la ciudad de Salto las mismas estrategias simuladas presentan mayores demandas de energía térmica, lo que está asociado a un clima más caluroso. En la Figura 29 se presentan los valores de demanda energética para todas las estrategias simuladas sobre el caso base (944 kWh/año y 1499 kWh/año, planta baja y alta respectivamente). Se observa un incremento en promedio, del orden del 50% para cada estrategia. Asimismo, la estrategia que presenta menor demanda es la protección solar exterior (298 kWh/año y 675 kWh/año, planta baja y alta respectivamente), seguida de la protección solar interior (383 kWh/año y 793 kWh/año, respectivamente) y luego el sombreado de cerramientos opacos (522 kWh/año y 1012 kWh/año, respectivamente). Finalmente, la estrategia que presenta mayor demanda es la masa térmica interior con bloques HCCA (1063 kWh/año y 1629 kWh/año,

respectivamente). En la Tabla 36 se detallan los valores obtenidos para la demanda de calefacción y refrigeración de cada estrategia.

Como observación, se hace notar que debido al clima de Salto es que no se simularon las variaciones de ocupación, así como tampoco el factor de huecos debido a que el incremento de cualquiera de estas variables se corresponde en un aumento en la demanda de refrigeración, ya estudiado para la ciudad de Montevideo.

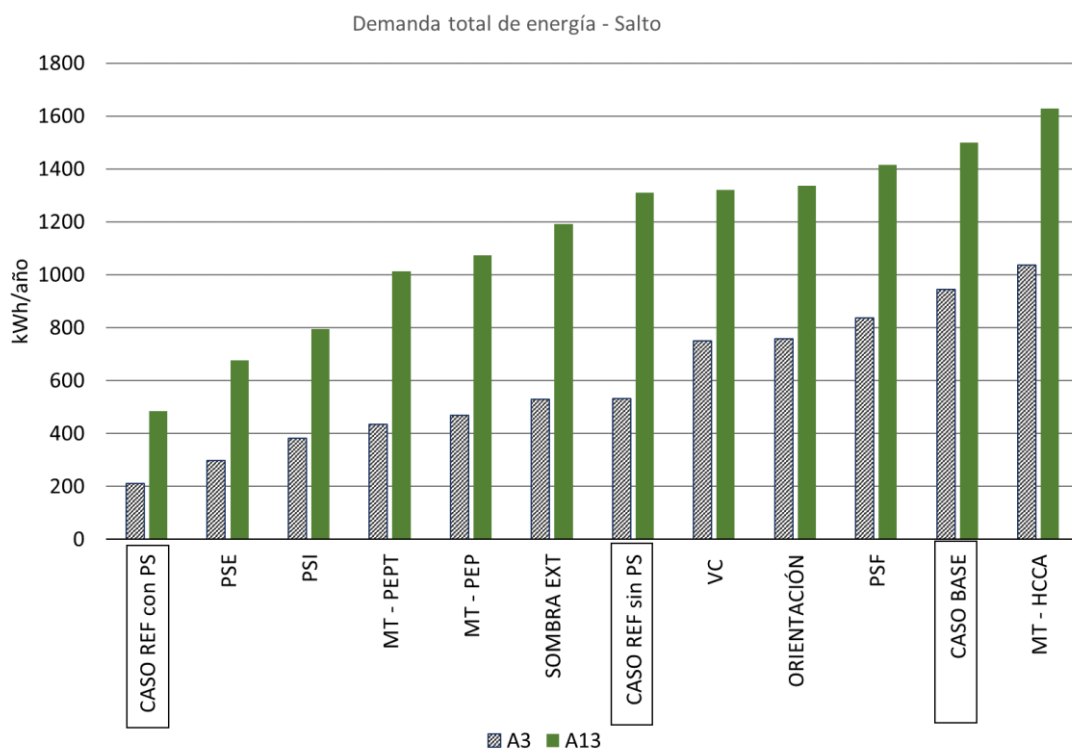
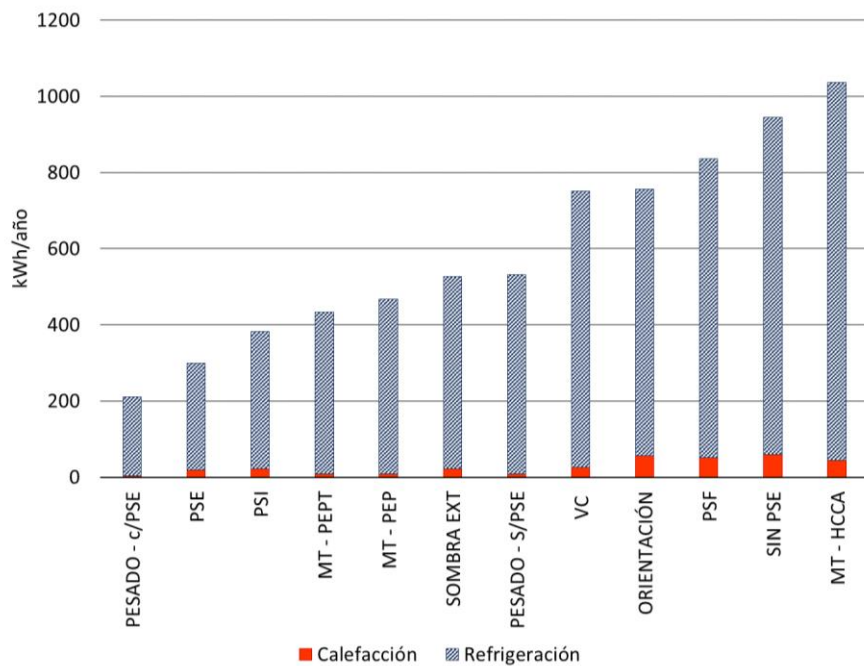


Figura 29. Demanda de energía total anual para calefacción y refrigeración, para apartamento en planta baja (A3) y planta alta (A13), en Salto

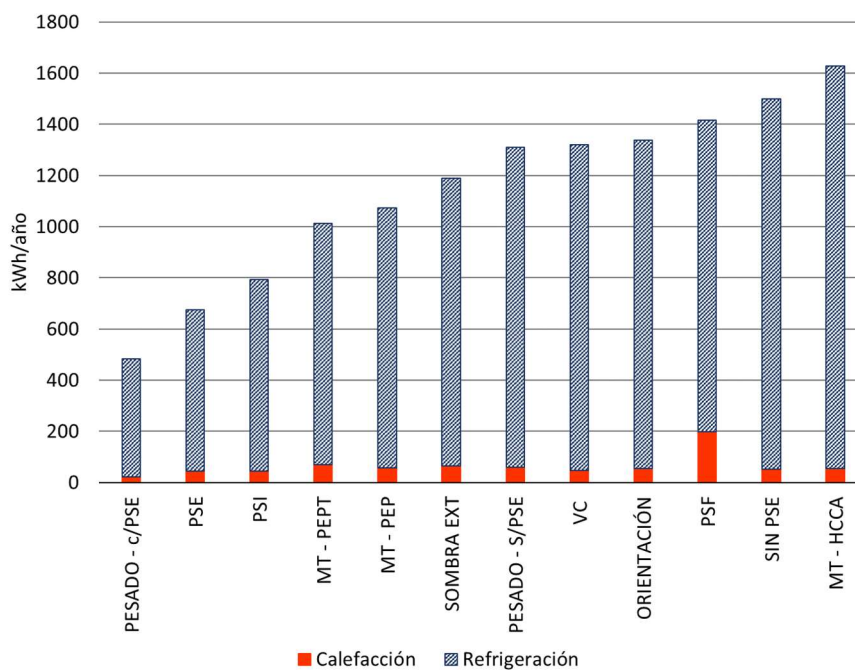
Demanda anual (kWh)	A3			A13		
	calefacción	refrigeración	Total	calefacción	refrigeración	Total
CASO REF con PS	3	208	211	23	460	483
PSE	19	280	298	43	631	675
PSI	22	361	383	44	749	793
SOMBRA EXT	23	505	528	71	941	1012
CASO REF sin PS	9	522	531	57	1016	1073
MT - PEPT	9	425	434	65	1125	1190
MT - PEP	8	459	467	61	1250	1310
VC	25	726	751	47	1273	1321
PSF	52	784	836	54	1283	1337
ORIENTACIÓN	57	699	756	198	1217	1416
CASO BASE	59	885	944	53	1446	1499
MT - HCCA	44	992	1036	56	1573	1629

Tabla 36. Demanda de energía (kWh) de calefacción, refrigeración y total anual para las dos unidades

En la Figura 30 se representan los resultados para demanda de calefacción y refrigeración para cada estrategia. Si se compara con Montevideo, se desprende que Montevideo tiene en promedio 25% más de demanda por calefacción en cada estrategia, mientras que la demanda de refrigeración para Montevideo representa un 35% menos que la de Salto.



(A)



(B)

Figura 30. Demanda de energía para calefacción y refrigeración para unidad A3 (A) y A13(B) para Salto

El coeficiente comparativo se muestra en la Tabla 37 y el factor de ahorro en la Figura 31. Ambos datos indican que las estrategias que presentan menor demanda de energía respecto al caso de referencia son las de control solar móvil en ventanas y sombreamiento exterior en opacos, con valores coeficiente comparativos de 0.63, 0.74 y 0.94 respectivamente. Mientras que, si se observa el comportamiento de las estrategias respecto al caso base, es decir al sistema liviano sin protección solar, se aprecia que todas las estrategias resultan en una reducción de la demanda a excepción de la situación con bloques de HCCA. Ver Figura 32.

Estrategia	Coeficiente comparativo	
	A3	A13
PESADO - S/PSE	1.00	1.00
PESADO - c/PSE	0.40	0.45
SIN PSE	1.78	1.40
PSE	0.56	0.63
PSI	0.72	0.74
PSF	1.57	1.25
MT - PEP	0.88	1.22
MT - PEPT	0.82	1.11
MT - HCCA	1.95	1.52
VC	1.41	1.23
SOMBRA EXT	0.99	0.94
ORIENTACIÓN	1.42	1.32

Tabla 37. Coeficiente comparativo para Salto

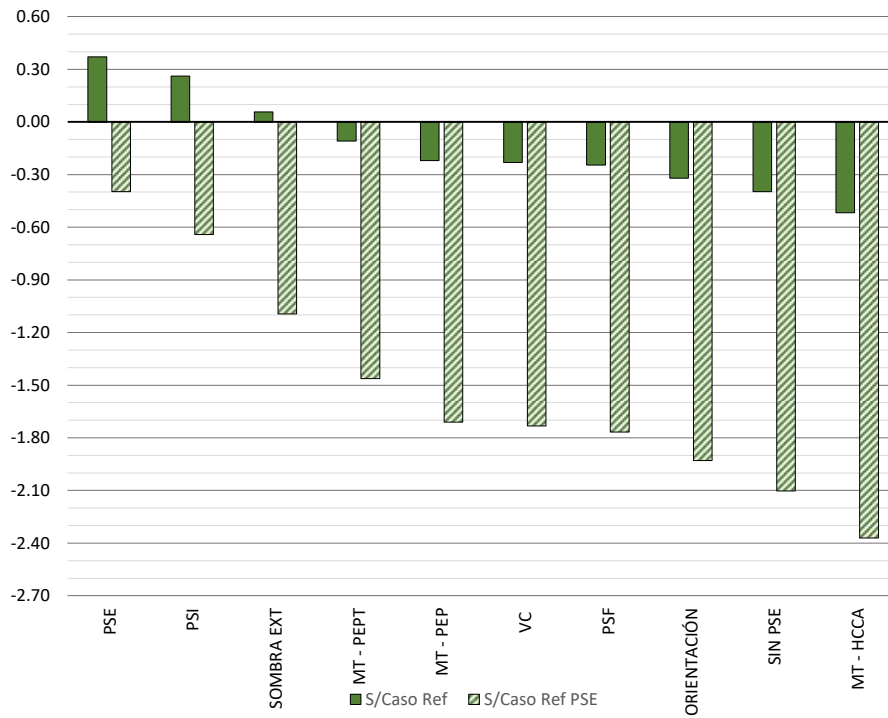


Figura 31. Factor de ahorro de las estrategias simuladas con relación al caso de referencia, para unidad A13 para Salto

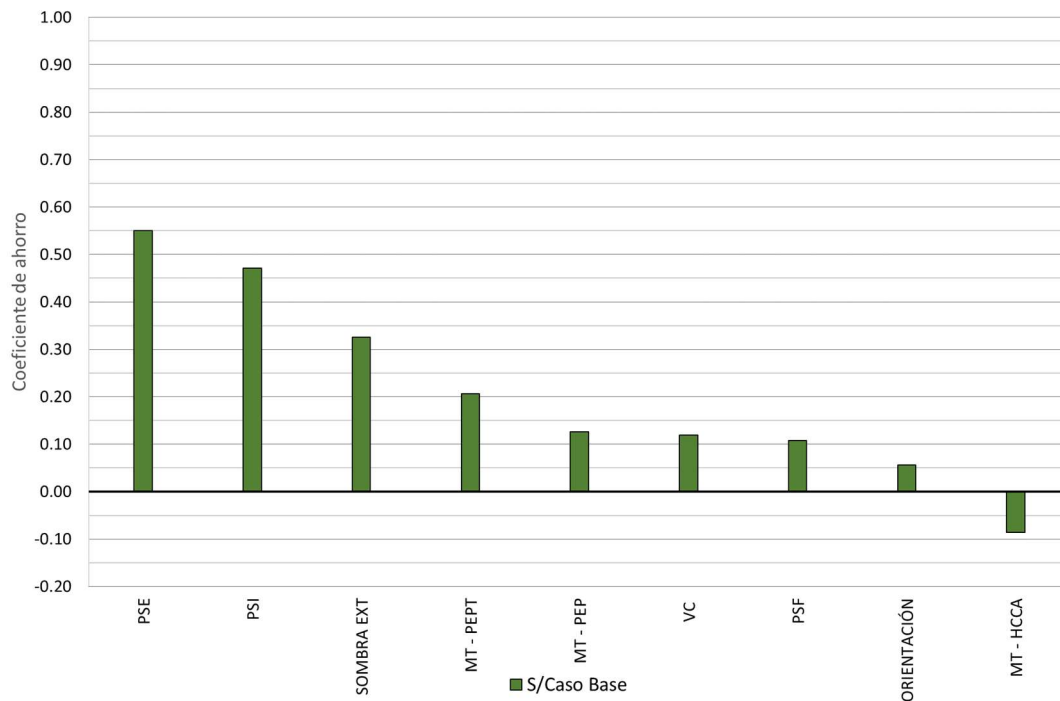


Figura 32. Factor de ahorro de las estrategias simuladas con relación al caso base, para unidad A13

Estos datos nos permiten observar las diferencias en el peso de cada estrategia, al analizar comparativamente Montevideo y Salto. Mientras que para Montevideo las estrategias a aplicar en un

Estos datos nos permiten observar las diferencias en el peso de cada estrategia, al analizar comparativamente Montevideo y Salto. Mientras que para Montevideo las estrategias a aplicar en un sistema liviano con techo expuesto (correspondiente a la unidad A13), en orden de menor consumo energético son protección solar exterior , protección solar interior, sombra exterior, masa térmica en piso y techo, ventilación continua , masa térmica en pisos, protección solar fija, orientación y tabiques con bloques HCCA, para Salto se verifican las primeras 4 en el mismo orden (protección solar exterior 675 kWh/año , protección solar interior 793 kWh/año, sombra exterior 1012 kWh/año, masa térmica en piso y techo 1190 kWh/año) pero luego le siguen masa térmica en pisos 1310 kWh/año, ventilación continua 1321 kWh/año, protección solar fija 1337 kWh/año, orientación 1416 kWh/año y bloques HCCA 1629 kWh/año.

5.2.2 Fluctuaciones libres

Temperatura del aire

Al analizar el comportamiento de la temperatura del aire interior, se destaca cómo las temperaturas máximas medias superan los 27 °C en todos los casos para el sistema constructivo liviano, ver Tabla 38. Se observa, asimismo, que el menor valor se da para la protección solar exterior como sucede en Montevideo, pero en esta ocasión con un valor mayor y también para ventilación continua. Se observa también que en el período frío las temperaturas mínimas medias no son inferiores a los 21 °C. Sin embargo, se presentan mínimas absolutas por debajo de los 15 °C, con un promedio de 16,2 °C para la planta alta y de 18 °C para la planta baja, constatando nuevamente el efecto del área expuesta.

Respecto a la amplitud térmica, todas las estrategias presentan una reducción respecto al caso base, a excepción de los tabiques interiores con bloques HCCA. Asimismo, en las mejoras simuladas por separado, solamente en planta alta se logra mejorar el valor obtenido para el caso de referencia (sistema constructivo pesado, $A = 5,6^{\circ}\text{C}$) con el uso de protecciones solares exteriores ($A = 5,5^{\circ}\text{C}$) y en ningún caso se alcanza la amplitud térmica del caso de referencia con protección solar ($A = 3,5^{\circ}\text{C}$ y $A = 4,7^{\circ}\text{C}$, planta baja y planta alta, resp).

A3		PESADO S/PS	PESADO PSE	CASO BASE	PSE	PSI	PSF	MT PEP	MT PEPT	MT HCCA	VC	SOMB EXT	ORIENT
P. Caluroso	tx	30.9	28.8	34.4	30.2	30.8	34.0	30.4	30.5	35.2	33.2	32.3	34.7
	tn	19.1	18.9	18.8	18.3	18.3	18.6	19.1	19.1	18.5	17.6	18.4	18.5
	txm	28.2	26.5	29.9	27.1	27.5	29.6	27.7	27.9	30.4	27.1	28.4	29.2
	tnm	22.6	22.0	22.4	21.7	21.9	22.3	22.1	22.2	22.3	21.0	22.1	22.3
	tm	25.4	24.2	26.2	24.4	24.7	26.0	24.9	25.0	26.3	24.0	25.2	25.8
P. Frío	tx	29.4	27.6	32.7	29.0	29.5	32.2	29.4	29.4	33.5	31.2	30.4	33.0
	tn	18.5	18.2	17.1	17.3	17.3	17.0	18.8	18.8	16.6	17.3	17.0	15.6
	txm	25.1	24.3	27.0	25.9	26.1	26.9	25.3	25.3	27.1	25.8	26.0	24.8
	tnm	22.5	21.8	23.1	22.6	22.6	23.1	22.5	22.5	22.8	22.3	22.6	21.5
	tm	23.8	23.1	25.1	24.3	24.4	25.0	23.9	23.9	24.9	24.1	24.3	23.2
Año	A	4.1	3.5	5.7	4.3	4.6	5.5	4.2	4.2	6.2	4.8	4.9	5.1

Referencias:

tx: temperatura máxima absoluta (°C)

tn: temperatura mínima absoluta (°C)

txm: temperatura máxima media (°C)

tnm: temperatura mínima media (°C)

tm: temperatura media del aire (°C)

A: Amplitud térmica (°C)

A13		PESADO S/PS	PESADO PSE	CASO BASE	PSE	PSI	PSF	MT PEP	MT PEPT	MT HCCA	VC	SOMB EXT	ORIENT
P. Caluroso	tx	33.7	31.1	37.4	31.1	31.3	36.7	31.6	34.4	38.0	35.5	35.5	37.5
	tn	18.8	18.6	18.1	18.1	18.1	17.7	18.4	18.4	17.5	17.4	17.4	18.3
	txm	29.6	27.8	31.4	27.8	28.0	31.0	28.3	29.8	31.7	27.5	27.5	30.8
	tnm	21.9	21.5	21.5	21.0	21.0	21.4	21.3	21.9	21.3	20.3	20.3	21.4
	tm	25.8	24.6	26.4	24.4	24.5	26.2	24.8	25.8	26.5	23.9	23.9	26.1
P. Frío	tx	31.7	29.4	34.9	31.6	32.1	34.4	33.8	32.2	35.6	31.5	31.5	35.2
	tn	16.0	17.2	14.4	16.5	16.5	14.4	16.4	16.3	13.3	14.8	14.8	11.2
	txm	25.8	25.0	27.2	26.0	26.2	26.9	26.7	25.8	27.4	25.4	25.4	24.4
	tnm	22.3	21.9	21.9	21.8	21.8	21.8	22.1	21.9	21.6	21.1	21.1	20.2
	tm	24.0	23.5	24.5	23.9	24.0	24.4	24.4	23.9	24.5	23.3	23.3	22.3
Año	A	5.6	4.7	7.6	5.5	5.7	7.4	5.8	5.9	8.1	5.7	5.7	6.8

Tabla 38. Valores de temperatura del aire para la unidad A3 y A13

Horas de confort térmico

En cuanto al confort térmico, analizado en función del porcentaje de horas de temperatura operativa dentro del rango establecido, para planta alta los mayores porcentajes se presentan para el uso de protección solar exterior (44,9 % y ventilación continua 45,1 %) y la protección solar interior (42,2%). Igualmente, todas las estrategias presentan mayores valores que el caso base, a excepción de los bloques de HCCA para las dos unidades. La estrategia de orientación es la que cuenta con mayor porcentaje de horas por disconfort por frío para ambas unidades, 17,5 % para A3 y 24,8 % para A13, superando las del caso base (7,7 % y 12,0 %, resp.)

A3	% horas			A13	% horas		
	Confort	Disconfort calor	Disconfort frío		Confort	Disconfort calor	Disconfort frío
CASO REF CON PSE	72.0%	15.6%	12.5%	CASO REF CON PSE	55.5%	33.3%	11.2%
MT - PEPT	58.8%	32.7%	8.5%	VC	45.1%	33.8%	21.1%
MT - PEP	58.6%	32.4%	9.0%	PSE	44.9%	39.4%	15.7%
CASO REF SIN PSE	57.3%	36.7%	6.0%	CASO REF SIN PSE	43.5%	50.5%	6.0%
PSE	51.8%	35.4%	12.8%	PSI	42.6%	42.2%	15.3%
VC	49.6%	34.0%	16.4%	MT - PEPT	39.3%	52.7%	8.0%
PSI	47.9%	40.2%	12.0%	SOMBRA EXT	38.7%	44.4%	16.9%
ORIENTACIÓN	47.6%	34.9%	17.5%	ORIENTACIÓN	37.3%	37.9%	24.8%
SOMBRA EXT	47.0%	41.5%	11.5%	MT - PEP	35.9%	52.3%	11.8%
PSF	39.6%	52.1%	8.3%	PSF	35.9%	51.2%	12.9%
CASO BASE	38.6%	53.7%	7.7%	CASO BASE	34.8%	53.2%	12.0%
MT - HCCA	38.1%	53.0%	8.9%	MT - HCCA	34.6%	51.9%	13.5%

Tabla 39. Porcentaje de horas de confort y disconfort según temperatura operativa para todo el año

5.2.3 Selección de estrategias

Para la selección de estrategias se realizó el mismo procedimiento que para Montevideo, aplicando los mismos criterios y valoraciones para analizar las estrategias más apropiadas.

El ranking obtenido para las estrategias se muestra en la Tabla 40. En este caso, si bien las dos primeras estrategias son las mismas que para Montevideo el ranking posterior difiere. Así es que la tercera alternativa es la masa térmica en pisos y techo, y la alternativa más alejada de la opción ideal, en función de los criterios establecidos, es la protección solar fija.

Alternativa	d+	d-	Resultado final	Ranking
PSE	0.007	0.080	0.92	1
PSI	0.017	0.017	0.79	2
MT - PEPT	0.044	0.056	0.48	3
MT - PEP	0.053	0.044	0.38	4
VC	0.064	0.053	0.37	5
SOMBRA EXT	0.056	0.030	0.31	6
ORIENTACIÓN	0.070	0.017	0.22	7
PSF	0.080	0.010	0.03	8

Tabla 40. Resultados del método TOPSIS para Salto

A su vez, también se combinaron las estrategias tal como se hizo en Montevideo, en función de quién o cuándo se toman las decisiones de diseño o según las pautas de uso:

- *Combinación básica:* se seleccionaron las mínimas estrategias que se aplican usualmente al construir de forma liviana en altura: pisos pesados (MT PEP) y una estrategia de uso: protección solar interior (PSI).

- *Combinación arquitectura*: se combinaron estrategias que implican una decisión de proyecto y que el usuario no puede o puede ser muy dificultoso aplicarlas: pisos pesados (MT PEP), protección solar exterior (PSE) y sombreado exterior.
- *Combinación arquitectura + usuario*: a las estrategias anteriores se le agregan decisiones que involucran a usuario en cuanto a pautas de uso: ventilación continua.

Demanda de energía

Se verifica para Salto lo ya visto para Montevideo: la combinación de estrategias redundante en un mejor desempeño energético de la edificación, obteniendo el mejor resultado la combinación de estrategias que involucran decisiones de proyecto y pautas de uso de los ocupantes. De esta forma se obtiene un factor de ahorro del 60% para la unidad en planta alta (A13) y de 40 % para la unidad en planta baja (A3), según se observa en la Tabla 43. Asimismo, de la Tabla 41, se desprende que se obtiene una reducción del 54 % como mínimo con la combinación básica (162 y 692 kWh/año, planta baja y alta, resp.) respecto al caso base (944 kWh/año y 1499 kWh/año). Las estrategias de combinación de arquitectura y usuario presentan aún valores menores de demanda (63 y 519 kWh/año), presentando una reducción de al menos 25 % respecto a la combinación básica, con una reducción de la demanda de 65% para planta alta y 93% para planta baja, sobre el caso base. Con estos valores se obtiene una demanda de energía anual para climatización de 12 kWh/m², alcanzando valores similares al caso de referencia, sistema pesado, con protecciones solares.

Demanda anual (kWh)	A3			A13		
	Calefacción	Refrigeración	Total	Calefacción	Refrigeración	Total
COMB. BÁSICA	1	161	162	39	653	692
COMB. ARQ	7	61	68	68	479	547
COMB. AR Q + U	6	57	63	67	452	519

Tabla 41. Demanda anual de energía para las combinaciones de estrategias

% demanda sobre caso base	A3			A13		
	Calefacción	Refrigeración	Total	Calefacción	Refrigeración	Total
COMB. BÁSICA	2%	18%	17%	74%	45%	46%
COMB. ARQ	11%	7%	7%	128%	33%	36%
COMB. ARQ + U	10%	6%	7%	126%	31%	35%

Tabla 42. Porcentaje de demanda anual de energía para las combinaciones de estrategias con relación al caso base

	CC		FA	
	A3	A13	A3	A13
COMB. BÁSICA	0.30	0.53	0.70	0.47
COMB. ARQ	0.13	0.42	0.87	0.58
COMB. AR Q + U	0.12	0.40	0.88	0.60

Tabla 43. Factor de comparación y coeficiente de ahorro para las diferentes combinaciones de estrategias

Temperatura del aire

Al analizar las temperaturas del aire que se obtienen para las diferentes combinaciones, se aprecia que para la unidad de planta alta (A13) la temperatura máxima media supera los 27 °C, mientras que para la unidad A3 este parámetro se mantiene dentro del rango de confort. A su vez, en el período frío, se obtiene una temperatura media del orden de los 23 °C para cada combinación de estrategias. Finalmente, la amplitud térmica se ve reducida en mayor medida para la unidad en planta baja que para la unidad en planta alta.

A3		COMB. BÁSICA	COMB. ARQ	COMB. ARQ + U
P. Caluroso	tx	27.9	27.5	27.5
	tn	18.8	18.4	17.7
	txm	25.8	25.3	25.2
	tnm	21.5	21.3	20.8
	tm	23.6	23.3	23.0
P. Frío	tx	27.2	26.7	27.1
	tn	18.5	17.7	17.7
	txm	24.4	23.6	23.7
	tnm	21.7	21.0	21.1
	tm	23.0	22.3	22.4
Año	A	3.5	3.3	3.5

A13		COMB. BÁSICA	COMB. ARQ	COMB. ARQ + U
P. Caluroso	tx	32.5	32.1	32.0
	tn	17.9	17.6	17.3
	txm	28.3	27.9	27.6
	tnm	21.1	21.1	20.5
	tm	24.7	24.5	24.1
P. Frío	tx	31.0	30.7	30.9
	tn	15.0	14.6	14.6
	txm	25.6	24.8	24.9
	tnm	21.6	21.0	21.1
	tm	23.6	22.9	23.0
Año	A	5.6	5.3	5.5

Tabla 44. Valores de temperatura del aire para cada unidad

Horas de confort térmico

En cuanto al porcentaje de horas dentro del rango de confort, se aprecia un aumento para la unidad A3 respecto a la implementación de una sola estrategia a la vez para el caso base, logrando incluso valores superiores al caso de referencia que es de 57 %. Para la unidad A13, el valor alcanzado con la combinación básica (44 %) es levemente menor al de la estrategia de protección solar exterior (45 %) aplicada al caso base, y superado (49%) para la combinación Arq + U. Esta última estrategia también reduce el porcentaje de horas de disconfort por calor (29 %), tal como se observa en la Tabla 45, siendo menor respecto al caso base (53 %).

A3	% horas		
	Confort	Disconfort calor	Disconfort frío
COMB. BÁSICA	70%	15%	15%
COMB. ARQ	74%	4%	22%
COMB. ARQ + U	73%	4%	23%

A13	% horas		
	Confort	Disconfort calor	Disconfort frío
COMB. BÁSICA	44%	42%	15%
COMB. ARQ	51%	30%	20%
COMB. ARQ + U	49%	29%	22%

Tabla 45. Porcentaje de horas de confort, disconfort por calor y disconfort por frío para cada unidad

Tabla 45. Porcentaje de horas de confort, disconfort por calor y disconfort por frío para cada unidad

6 Consideraciones finales

El trabajo presentado aborda el estudio del comportamiento de una edificación con sistema constructivo liviano con relación a la demanda de energía para climatización, a la temperatura interior y porcentaje de horas dentro del rango de confort térmico, para dos localidades de Uruguay, a partir de simulaciones energéticas.

A partir de un modelo seleccionado, el estudio realiza un análisis comparativo entre dos opciones de sistemas constructivos: uno pesado (o tradicional) y uno liviano (o no tradicional) conformado por una estructura del tipo *Steel frame*. A este último, se le incorporan diferentes estrategias de diseño pero que no modifican el sistema constructivo, en tanto que materiales y espesores se consideran constantes.

Los estudios realizados demostraron que el modelo simulado con el sistema constructivo liviano (SCL), tomado como caso base, sin ninguna estrategia aplicada, presenta mayor demanda energética para climatización que el mismo modelo simulado con un sistema del tipo pesado (SCP), tradicional, tomado como caso de referencia, para las mismas condiciones de simulación. Según los resultados obtenidos, el caso base (SCL), correspondiente al modelo conformado completamente por una envolvente liviana, es el que presenta el peor desempeño. Para Montevideo, el SCL demanda para planta baja 687 kWh/año y planta alta 1102 kWh/año, esto significa entre 131 y 57 % más energía que el SCP (298 kWh/año y 701 kWh/año, resp.), según sea planta baja y planta alta, respectivamente. Pero si comparamos contra el caso de referencia mejorado (SCP con la aplicación de protecciones solares exteriores), que presenta demandas de 86 y 265 kWh/año, el SCL demanda 700 % y 314 % más, respectivamente. Para la ciudad de Salto, se replica el comportamiento, pero con menores diferencias, alcanzando el SCL valores de demanda energética de 944 y 1499 kWh/año, lo que corresponde al 78 y 40 % de aumento de demanda de energía respecto al SCP (531 kWh/año; 1073 kWh/año), mientras que respecto al caso de referencia mejorado (211 kWh/año; 483 kWh/año) el aumento de demanda de energía corresponde al 347 y 210 % para planta baja y alta, respectivamente. Respecto a condiciones de confort, el SCL si bien presenta temperaturas medias dentro del rango de confort, la temperatura máxima media excede el rango del confort térmico en ambos periodos, con amplitudes superiores a 2 °C respecto al SCP mejorado en Montevideo y a 3 °C en Salto. En cuanto a horas de confort térmico, el SCL no supera el 50% de las horas en Montevideo, y en Salto no supera el 40 %, en comparación con el SCP mejorado que obtiene un 72% de horas de confort en planta baja y 57% en promedio para ambas ciudades.

La demanda de energía comienza a reducirse respecto a la del caso base con la incorporación de ciertas estrategias de diseño: protección solar, masa térmica, ventilación, orientación. Así es que, cualquier estrategia que se aplique tanto de reducción de ganancias, como de almacenamiento o disipación de calor tiene un impacto positivo en la reducción de la demanda del caso base. Sin embargo, nunca se logra alcanzar la misma demanda que para el sistema constructivo pesado (SCP), caso de referencia.

Dentro del conjunto de estrategias seleccionadas, con las que se obtiene una menor demanda de energía, es decir, que generan un mayor impacto en la reducción de la demanda, se identifican aquellas que controlan las ganancias de radiación solar, evitando el sobrecalentamiento de los ambientes interiores, para las dos localidades. Al aplicar la estrategia de protección solar exterior la demanda de energía es 160 y 411 kWh/año, lo que representa el 23 y el 37 % respecto al caso base (687 y 1102 kWh/año) para planta baja o planta alta para Montevideo, y para Salto el 32 y 45 %, respectivamente. Mientras que con la estrategia de protección solar interior la demanda energética es el 33 y 46 % para las unidades inferior y superior, en Montevideo, y en Salto estos valores representan el 41 y 53 % de la demanda inicial. Estos resultados ponen en evidencia el impacto de las ganancias de calor exteriores en el comportamiento térmico de los locales, remarcando la importancia de controlar la radiación solar incidente para evitar el sobrecalentamiento, en las dos zonas climáticas del país.

La contribución del diseño pasivo que incorpora la estrategia de protección solar exterior se evidencia también al analizar los valores de temperatura del aire, ya que la muestran como la única estrategia, entre las estudiadas, cuya aplicación presenta una temperatura máxima media dentro del rango de confort (26,7 °C) para la unidad en planta alta. En cuanto a horas de confort según temperatura operativa, las estrategias de protección solar se ubican en primer lugar con el mayor porcentaje de horas en condiciones de confort en planta alta (50 %) para Montevideo, significando un aumento del 16% respecto al caso base. En tanto que, para Salto no es la estrategia que más horas de condiciones de confort presenta, sin embargo, se aprecia también un aumento del 10% aproximadamente respecto al caso base, dejando evidencia del peso que tiene el uso de protecciones solares en la zona cálida del país.

Otra de las estrategias que se estudió fue la incorporación de masa térmica al interior de la vivienda en pisos o pisos y techos. Se observa que actuando como estrategia aislada no se reduce más la demanda que con la utilización de protecciones solares. Sin embargo, la reducción en la demanda de energía no es despreciable representando para Montevideo el 36 y 62 % (masa térmica en pisos y techos) y 38 y 70 % (masa térmica en pisos) del caso base. Para Salto, nuevamente se repite el patrón: a mayor masa térmica, mayor reducción de demanda energética, pero con una reducción más atenuada: 49 y 79 % para masa térmica en pisos y techos. Se aprecia una mayor incidencia de la estrategia en planta baja al

considerar el impacto de la inercia térmica del suelo, ya que de esta forma no está aislado del ambiente interior. Asimismo, esta estrategia tiene un impacto positivo en las condiciones de confort al reducir la amplitud térmica, obteniendo valores similares al caso de referencia con sistema pesado, solamente un 4 % por encima para planta alta y 3% para planta baja. En cuanto a cantidad de horas de confort, en planta baja es la estrategia que presenta mayor cantidad de horas dentro del rango de confort, alcanzando (Montevideo) o superando (Salto) las horas del caso de referencia (sistema pesado). No sucede lo mismo en planta alta, sin embargo, representa una mejora del orden de 2 % y 10 % (masa térmica solo en piso y en piso y techo respectivamente) respecto al caso base. Esto se aplica para las dos ciudades.

Dentro de las otras estrategias estudiadas, la ventilación continua es la que presenta mayor diferencia entre Montevideo y Salto para las horas de confort, representando para Montevideo en planta baja el menor porcentaje de confort (39 %) y para Salto en planta alta el mayor porcentaje (45 %), representando un aumento del 30 % en relación con el caso base. Sin embargo, la demanda de energía para ambas ciudades tiene un valor del orden del 80 % respecto al mismo caso para la unidad de planta alta.

Si bien las estrategias se estudian por separado para observar su incidencia en el comportamiento térmico del ambiente interior, se destaca que el mejor comportamiento se obtiene al aplicar una combinación de estrategias que involucran tanto a decisiones proyectuales como de pautas de uso. Luego de analizar las diferentes estrategias según el modelo de decisión multicriterio basado en rankings *TOPSIS*, se seleccionaron las estrategias masa térmica en pisos, protección solar interior, protección solar exterior, sombreado exterior y ventilación continua y se agruparon según tomadores de decisión. Así es que surgen tres combinaciones: básica, arquitectura y arquitectura + usuario.

Los estudios realizados muestran la importancia de la aplicación de estrategias combinadas para el control de la demanda de energía y de las condiciones térmicas interiores. De estos nuevos estudios se aprecia que la demanda más baja se obtiene con la combinación de arquitectura + usuario. Esta combinación (25 kWh/año, Montevideo; 63 kWh/año, Salto) representa una reducción del 96 y 93 % de demanda energética en referencia al caso base (687 kWh/año, Montevideo; 944 kWh/año, Salto) en la unidad en planta baja. Sin embargo, en la planta alta (287 kWh/año, Montevideo; 519 kWh/año Salto) se obtienen reducciones del 74 y 65 % respecto del caso base (1102 kWh/año, Montevideo; 1499 kWh/año, Salto). Sin embargo, si se compara con el caso de referencia mejorado estas unidades presentan un aumento de la demanda del 7%, lo que permite concluir que no se logra alcanzar el comportamiento del sistema pesado con protección solar, pero la mejora es significativa. En ambas ciudades se produce una reducción de la refrigeración en todos los casos. Sin embargo, hay un aumento de calefacción en todos los casos a excepción de la unidad en planta baja respecto al caso base.

En cuanto al estudio de condiciones de confort térmico, al combinar las estrategias se obtiene para Montevideo un aumento de las horas en condiciones de confort del 38 % (65 %, planta baja) y 27 % (55 % planta alta) respecto al caso base, que presenta 47 y 43 % de horas de confort al año. Para Salto, también hay un incremento de las horas de confort en relación con el caso base (39 y 35 % de horas de confort), pero con mayor incidencia, representando un incremento del 87 % para planta baja (73 % horas de confort) y un 41 % para la planta alta (49 % horas de confort). A excepción de la unidad de planta baja en Salto, con este aumento no se superan las horas de confort del caso de referencia mejorado (72 y 56 %).

Respecto a las temperaturas medias del aire que se obtienen en cada período, son menores para todos los casos que las del caso base. Para la planta alta en Montevideo se presenta una disminución de 3,3 °C y para Salto de 2,3 °C, ubicándose todas las temperaturas dentro del rango de confort. Asimismo, en todos los casos se logra una reducción en el promedio de amplitud térmica diaria de 2 °C. Finalmente, al combinar las estrategias se observa que se obtiene una menor demanda de energía y mayores porcentajes de horas de confort térmico que en fluctuaciones libres. Esto permite deducir que los picos de consumo son menores, es decir se requiere equipamiento de menor potencia.

En cuanto a la incidencia de la ocupación, los estudios permitieron comprobar que existe una relación lineal entre la ocupación de los ambientes y la demanda energética, aumentando los requerimientos de refrigeración al aumentar las ganancias internas. Sin embargo, no siempre se produce una reducción en la calefacción. Este impacto en la demanda se mantiene al aplicar la estrategia de ventilación o protección solar exterior, lo que sugiere que la incidencia en el incremento de número personas tiene en el mismo peso relativo para distintas estrategias aplicadas.

Del análisis de los resultados surge que el factor forma, como estrategia de diseño, tiene un peso significativo en la demanda de energía, principalmente por los intercambios de calor a través del techo con la bóveda celeste y la exposición a la radiación solar. En este trabajo queda en evidencia al comparar los resultados de las mismas estrategias entre una unidad con el techo expuesto y otra que no lo tiene expuesto.

Finalmente, las mismas estrategias aplicadas en las dos localidades ubicadas en diferentes zonas térmicas permiten observar que las relacionadas al control de radiación solar son válidas en ambas ciudades.

Futuras líneas de investigación

A partir de los resultados obtenidos se pueden sugerir algunas líneas futuras de investigación relacionadas con sistemas constructivos livianos y su comportamiento termo-energético de las construcciones en general.

Los estudios en esta investigación fueron en base a un sistema liviano. En la actualidad, y a partir de políticas nacionales, se fomenta la construcción con madera, la cual dependiendo del sistema no correspondería a un sistema liviano, por ejemplo, los paneles CLT (por sus siglas en inglés correspondientes a *Cross Laminated Timber*), pero tampoco cuenta con las mismas propiedades higrotérmicas que los materiales con los que se compone un sistema tradicional. Una línea de investigación que aborde estas nuevas tecnologías, desde lo material y el diseño, resulta de interés.

Por otro lado, es de interés estudiar el comportamiento de sistemas constructivos livianos en escenarios futuros de cambio y variabilidad climática y la posible adaptación desde el diseño, con énfasis en la incorporación de nuevos materiales que respondan a la reducción de la demanda energética con criterios de sustentabilidad.

La incidencia de la carga de ocupación es un tema fundamental para poder aproximarse a la demanda energética en un edificio debido a la sensibilidad que presentan los resultados a la variación de esta carga. El abordaje de la parametrización de este tipo de carga para comprender la incidencia en la demanda total de energía para climatización es una profundización interesante del tema.

Referencias bibliográficas

- Amándola, D (2013). Las tecnologías en la producción de vivienda social. Reflexiones. En Vivienda popular N°23.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. (2013). NBR 15575-4 - Edificações habitacionais - Desempenho. Parte 4: Sistemas de vedações verticais internas e externas. *Associação Brasileira de Normas Técnicas*, 57.
- Aste, N., Leonforte, F., Manfren, M., & Mazzon, M. (2015). Thermal inertia and energy efficiency - Parametric simulation assessment on a calibrated case study. *Applied Energy*, 145(2015), 111–123. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2015.01.084>
- Berkeley, L., Ridge, O. A. K., Ut-battelle, M. B. Y., For, A., Energy, S., Or, D., In, T., Form, A. N. Y., By, O. R., Means, A. N. Y., & The, W. (2019). *EnergyPlus Essentials*.
- Bustamante, W., Bustamante, F. E., Otárola, R., & Pino, A. (2012). Análisis de estrategias para confort térmico y lumínico de edificios en diferentes climas de la zona central del Chile. *Arq*, (82), 16–19. <https://doi.org/10.4067/s0717-69962012000300019>
- Cabeza Prieto, A., Sánchez-Guevara, C., Camino Olea, M. (2014). *Estudio de la inercia térmica al comportamiento térmico de edificios*. 1–6. https://oa.upm.es/34843/1/CABEZA_PRIETO_CONSTEC14_INERCIA.pdf
- Camacho, M. y Sosa, D. (2019). Construcción en seco. En-clave de energía. Textos de tecnología. Instituto de la construcción. Facultad de Arquitectura, Diseño y Urbanismo.
- Ceballos, B., Lamata, M. T., Pelta, D., & Sanchez, J. M. (2013). El método topsis relativo vs. Absoluto. *Recta*, 14(2), 181–192.
- Chen, X., Yang, H., & Sun, K. (2016). A holistic passive design approach to optimize indoor environmental quality of a typical residential building in Hong Kong. *Energy*, 113, 267–281. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2016.07.058>
- Díaz Arnesto, G, Picción, A, Camacho, M, López, M y Millicua, S. (2007.). Evaluación del desempeño térmico de un sistema constructivo liviano para la situación climática de Uruguay.
- DNE-MIEM. (2015). *Estudio de medidas de eficiencia energética en el sector residencial y evaluación de costos y beneficios asociados en Uruguay*.
- DOE, U. S. (2021). Input Output Reference. *The Encyclopedic Reference to EnergyPlus Input and Output*, c, 1996–2016.
- Eli, L. G., Krelling, A. F., Mendes, L. S., Machado, R. M. e S., Mazzaferro, L., Melo, A. P., & Lamberts, R. (2019). *Manual de Simulação Computacional de Edifícios com o Uso do Objeto Ground Domain no Programa EnergyPlus - Versão 9.0.1*.
- Evans, J. M. (2002). Energía en edificios: identificación de alternativas de diseño de bajo impacto. En Avances en Energías Renovables y Medio Ambiente. Vol. 6, N° 1, 2002. Argentina. ISSN 0329-5184
- Givoni B. (1969). Man climate and architecture. Elsevier Publishing Company Limited.

- Hensen, J. L. M., & Lamberts, R. (2012). Introduction to building performance simulation. *Building Performance Simulating for Design and Operation*, 9780203891(January 2011), 1–14. <https://doi.org/10.4324/9780203891612>
- Harkouss, F., Fardoun, F., & Biwole, P. H. (2018). Passive design optimization of low energy buildings in different climates. *Energy*, 165, 591–613. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2018.09.019>
- Hwang, C.-L., & Yoon, K. (1981). *Lecture Notes in Econmoics and Mathematical Systems*.
- Instituto Uruguayo de Construcción En Seco (2020). Recuperado 16 de marzo de 2020, de <http://www.iucose.com.uy/>
- Instituto Uruguayo de Meteorología (s.f.) Estadísticas climatológicas. <https://www.inumet.gub.uy/clima/estadisticas-climatologicas/tablas-estadisticas>
- Jannat, N., Hussien, A., Abdullah, B., & Cotgrave, A. (2020). A comparative simulation study of the thermal performances of the building envelope wall materials in the tropics. *Sustainability (Switzerland)*, 12(12). <https://doi.org/10.3390/SU12124892>
- Jáuregui, E. (2009). Introducción al sistema Steel Framing. Buenos Aires.
- Karlsson, J., Wadsö, L., & Öberg, M. (2012). A conceptual model that simulates the influence of high thermal inertia in building structures. *Fib Symposium 2012: Concrete Structures for Sustainable Community - Proceedings*, 60, 631–634.
- Laboratorio de Energía Solar (2020). Recuperado 16 de marzo de 2020, de <http://les.edu.uy/>
- Lee, D. H. K., & Givoni, B. (1971). Man, Climate, and Architecture. In *Geographical Review* (Vol. 61). <https://doi.org/10.2307/214009>
- Manta Porteiro, F. (2015). Construcción en Seco en Edificios de Vivienda en Propiedad Horizontal. En *Edificar* 2015 v.19 n°68
- Ministerio de Transporte y Obras Públicas. Memoria constructiva general para edificios públicos (2006). Edición 2006. Montevideo.
- Mussio, G. (2019). La evaluación de sistemas constructivos no tradicionales en programas habitacionales. La experiencia del equipo docente del Instituto de la Construcción a través del Informe Técnico de Evaluación. Textos de tecnología. Instituto de la construcción. Facultad de Arquitectura, Diseño y Urbanismo.
- Neila, F., Bedoya, C. (1997). Técnicas arquitectónicas y constructivas de acondicionamiento ambiental. España.
- OIKOS. (2013). Estudio de Caracterización y Prospectiva para la Industria de la Construcción. 252. Retrieved from https://www.miem.gub.uy/sites/default/files/informe_caracterizacion_y_prospectiva_construccion.pdf
- Picción, A. y Milicua, S. (2005) Tratamiento de datos climáticos de localidades de Uruguay para evaluación térmica y energética de proyectos de edificios. Proyecto de investigación más desarrollo (I+D). Montevideo
- Pajek, L., Hudobivnik, B., Kunič, R., & Košir, M. (2017). Improving thermal response of lightweight timber

building envelopes during cooling season in three European locations. *Journal of Cleaner Production*, 156, 939–952. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2017.04.098>

Pereira, H. A. da C., Melo, A. P., Sorgato, M., Versage, R., Matos, M., & Lamberts, R. (2013). *Manual de simulação computacional de edifícios naturalmente ventilados no programa EnergyPlus*. 41.

Pungercar, V., Zhan, Q., Xiao, Y., Musso, F., Dinkel, A., & Pflug, T. (2021). A new retrofitting strategy for the improvement of indoor environment quality and energy efficiency in residential buildings in temperate climate using prefabricated elements. *Energy and Buildings*, 241. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2021.110951>

Reilly, A., & Kinnane, O. (2017). The impact of thermal mass on building energy consumption. *Applied Energy*, 198, 108–121. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2017.04.024>

Tonelli, C., & Grimaudo, M. (2014). Timber buildings and thermal inertia: Open scientific problems for summer behavior in Mediterranean climate. *Energy and Buildings*, 83, 89–95. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2013.12.063>

UNIT 1026:1999. *Aislamiento térmico de edificios. Zonificación climática*. Montevideo: Instituto Uruguayo de Normas Técnicas, 1999.

UNIT-ISO 6946:2018. *Componentes y elementos para edificación - Resistencia térmica y transmitancia térmica - Métodos de cálculo*. (2018). Montevideo: Instituto Uruguayo de Normas Técnicas, 2018.

UNIT-ISO 10456:2007. *Materiales y productos para edificación - Propiedades higrotérmicas - Valores de diseño tabulados y procedimientos para determinar los valores térmicos de diseño y declarados*. Montevideo: Instituto Uruguayo de Normas Técnicas, 2016.

UNIT-ISO 17772-1:2017. *Desempeño energético de los edificios - Calidad del ambiente interior - Parte 1: Parámetros de entrada del ambiente interior para el diseño y evaluación del desempeño energético de los edificios*. Montevideo: Instituto Uruguayo de Normas Técnicas, 2019.

Veiga, R. K., Eli, L. G., Olinger, M. S., Machado, R. M. e S., Mazzaferro, L., Melo, A. P., & Lamberts, R. (2019). *Manual de Uso do Energy Management System (EMS) no Programa EnergyPlus - Versão 9.1*.

Verbeke, S., & Audenaert, A. (2018). Thermal inertia in buildings: A review of impacts across climate and building use. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 82 (November 2016), 2300–2318. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2017.08.083>

Anexos

Módulos EnergyPlus

Heat Balance Algorithm

Este algoritmo define el tipo de transferencia de calor y humedad que se utiliza para realizar los cálculos entre las superficies del edificio. En este caso el algoritmo seleccionado considera solamente el calor sensible y no tiene en cuenta el almacenamiento o difusión de humedad de los elementos constructivos (DOE, 2021).

Field	Units	
Algorithm		Conduction Transfer Function
Surface Temperature Upper Limit	°C	200
Minimum Surface Convection Heat Transfer Coefficient	W/m ² K	0.1
Maximum Surface Convection Heat Transfer Coefficient	W/m ² K	1000

Site: Ground Temperature: Undistributed: KusudaAchenbach

Mediante esta entrada se definen las condiciones para la temperatura del suelo. El modelo seleccionado calcula temperaturas del suelo no distorsionadas a partir de tres parámetros para definir una correlación de temperaturas como función de la profundidad y del tiempo (DOE, 2021).

Field	Units	
Name		GT_KA
Soil thermal conductivity	W/mK	1.5
Soil density	Kg/m ³	1500
Soil Specific Heat	J/kgK	2085

Surface Property: Other Side Conditions Model

Este objeto permite definir el modelo de transferencia para el intercambio de calor entre las superficies. El modelo seleccionado permite usar los cálculos habituales de transferencia de calor incluyendo componentes multicapa. Este objeto es utilizado para las transferencias de calor entre el piso del apartamento de planta baja y el suelo (DOE, 2021).

Field	Units	
Name		GC_OSCD
Type of modeling	W/mK	Ground coupled surface

Site: Ground domain: slab

Este objeto permite definir las condiciones de simulación de transferencia de calor en superficies horizontales que se encuentran en contacto con el suelo (Eli et al., 2019).

Field	Units	
Name		GD
Ground domain depth	m	10
Aspect ratio		1
Perimeter offset	m	5
Soil thermal conductivity	W/mK	1.5
Soil density	Kg/m ³	1500
Soil Specific Heat	J/kgK	2085
Soil moisture content volume fraction	%	30
Soil moisture content volume fraction at saturation	%	50
Undistributed ground temperature model type		Site: Ground Temperature: Undistributed: KusudaAchenbach
Undistributed ground temperature model name		GT_KA
Evapotranspiration ground cover parameter		0.4
Slab boundary condition model name		GC_OSCD
Slab location		On grade
Horizontal insulation		No
Vertical insulation		No
Simulation timestep		Hourly
Geometric mesh coefficient		1.6
Mesh density parameter		6

Airflow Network

Para el cálculo de la ventilación natural se utilizó el módulo Airflow Network. Esto permite que el caudal de ventilación natural no sea ingresado como un valor fijo, sino que se calcula en función de coeficientes de presión del viento sobre el edificio y demás características del entorno, permitiendo que las ventanas se abran o cierren según las condiciones ambientales (Pereira et al., 2013). También mediante este módulo se calculan las infiltraciones de aire para cada zona.

Dado que el edificio tiene forma de poliedro irregular, es necesario ingresar manualmente los coeficientes de presión de viento, la matriz de coeficientes de presión y definir los nodos externos para cada abertura. En este caso, los mismos fueron calculados mediante la herramienta on line CpSimulator (CpSimulator, 2022).

Field	Units	
Name		AFN Control
Airflow network control		Multizone without distribution
Wind pressure coefficient type		Input
High selection for local wind pressure calculation		External node
Building type		
Maximum number of iterations	dimensionless	500
Initialization type		Zero node pressure
Relative airflow convergence tolerance	dimensionless	0.0001
Absolut airflow convergence tolerance	Kg/s	0.000001
Convergence acceleration limit		-0.5
High dependence on external node temperature		No
Node		SkylineU

AirflowNetwork:MultiZone:Component:SimpleOpening

Name	ventana	puerta
Air Mass Flow Coefficient When Opening is Closed {kg/s-m}	0.0009058	0.00156
Air Mass Flow Exponent When Opening is Closed {dimensionless}	0.6	0.6
Minimum density difference for two-way flow (kg/m ³)	0.0001	0.0001
Discharge coefficient (dimensionless)	0.6	1

AirflowNetwork Model:Wind Pressure Coefficients

	AirflowNetwork Model:Wind Direction											
	0	30	60	90	120	150	180	210	240	270	300	330
A2_V_D2	-0.39	-0.35	-0.27	-0.16	-0.23	0.16	0.47	0.47	0.21	-0.28	-0.45	-0.47
A2_V_D1	-0.39	-0.34	-0.21	-3.90E-02	5.96E-02	0.41	0.5	0.42	0.11	-0.35	-0.42	-0.42
A2_P_TZ	0.29	0.52	0.47	0.2	-0.16	-0.33	-0.33	-0.37	-0.39	-0.37	-0.51	-0.16
A2_V_TZ	0.28	0.51	0.47	0.2	-0.15	-0.32	-0.33	-0.37	-0.38	-0.36	-0.5	-0.16
A2_P1	-8.45E-02	0.32	0.52	0.55	0.37	-0.35	-0.48	-0.32	-0.28	-0.23	-0.24	-0.28
A2_V_EC	0.15	0.45	0.5	0.21	-0.27	-0.36	-0.38	-0.34	-0.33	-0.33	-0.38	-0.18
A3_V_DNE	0.36	0.53	0.41	0.13	-0.16	-0.31	-0.28	-0.4	-0.42	-0.37	-0.59	-0.19
A3_V_DNO	0.49	-0.35	-0.52	-0.46	-0.46	-0.43	-0.25	-0.29	-0.21	1.38E-03	0.2	0.43
A3_V_DNO_NE	0.41	0.51	0.32	5.29E-02	-0.2	-0.31	-0.25	-0.42	-0.4	-0.35	-0.57	-0.33
A3_V_TZ	0.35	-9.43E-02	-0.48	-0.45	-0.46	-0.39	-0.33	-0.23	-6.42E-02	0.23	0.47	0.53
A3_P_TZ	0.34	-9.38E-02	-0.52	-0.47	-0.48	-0.4	-0.33	-0.26	-0.1	0.2	0.46	0.54
A3_V_EC	0.27	-5.77E-02	-0.37	-0.42	-0.41	-0.36	-0.37	-0.25	-5.76E-02	0.23	0.49	0.5
A4_V_EC_NO	0.18	-8.24E-02	-0.23	-0.31	-0.34	-0.32	-0.47	-0.4	5.58E-04	0.45	0.51	0.46
A4_V_K	7.55E-02	-0.16	-0.12	-0.31	-0.31	-0.43	-0.67	-0.56	9.60E-04	0.34	0.52	0.42
A4_V_ECSE	-0.39	-0.35	-0.24	-0.1	0.34	0.43	0.47	0.41	2.99E-02	-0.32	-0.42	-0.39
A4_V_D1NO	-2.17E-02	-0.13	-8.53E-02	-0.24	-0.32	-0.43	-0.62	-0.65	-0.19	0.48	0.48	0.21
A4_PV_D1	-0.48	-0.23	-6.72E-02	-0.19	-0.41	-0.47	-0.55	0.27	0.52	0.48	-0.22	-0.72
A4_V_D2	-0.49	-0.24	-6.64E-02	-0.17	-0.41	-0.46	-0.6	0.15	0.49	0.54	-0.17	-0.71
A1_V_E	-0.63	-0.42	1.44E-02	0.49	0.32	-0.8	-0.41	-0.33	-0.33	-0.34	-0.14	-0.41
A1_V_NE	-8.98E-02	0.32	0.52	0.52	0.32	-0.37	-0.48	-0.32	-0.28	-0.23	-0.24	-0.28
A2_P_EC	-3.08E-02	0.38	0.52	0.49	0.23	-0.39	-0.46	-0.31	-0.28	-0.24	-0.25	-0.25
A1_PTZ	7.47E-02	0.39	0.52	0.48	0.15	-0.41	-0.43	-0.31	-0.27	-0.26	-0.23	-0.2
A1_V_TZ	6.40E-02	0.38	0.51	0.48	0.16	-0.42	-0.43	-0.31	-0.27	-0.26	-0.23	-0.2
A3_P_EC	0.22	-5.66E-02	-0.21	-0.31	-0.34	-0.33	-0.48	-0.32	5.16E-02	0.49	0.52	0.44
A1_V_DO	-0.39	-0.35	-0.28	-0.1	-7.40E-02	0.15	0.45	0.49	0.29	-0.17	-0.5	-0.47
A14_V_D1	0.17	-6.72E-02	-0.12	-0.24	-0.35	-0.41	-0.63	-0.72	-0.23	0.69	0.89	0.56
A14_PV_D1	-0.5	-0.25	-8.57E-02	-0.21	-0.42	-0.6	-0.47	0.6	0.97	0.87	0.17	-0.95
A14_V_D2	-0.5	-0.25	-8.43E-02	-0.19	-0.41	-0.58	-0.54	0.47	0.97	1	0.46	-0.9
A13_V_EC	0.39	-1.80E-02	-0.44	-0.43	-0.42	-0.36	-0.4	-0.38	-2.67E-02	0.37	0.67	0.69
A13_P_EC	-0.3	-0.22	-0.26	-0.31	-0.34	-0.35	-0.54	-0.4	0.24	0.61	0.5	0.16
A13_V_DNE	0.49	0.78	0.63	0.28	-0.11	-0.38	-0.28	-0.42	-0.42	-0.37	-0.65	-0.13
A12_V_EC	0.31	0.68	0.7	0.37	-0.21	-0.45	-0.36	-0.35	-0.33	-0.32	-0.44	-0.13
A12_P_TZ	0.37	0.69	0.61	0.28	-0.15	-0.39	-0.32	-0.39	-0.39	-0.37	-0.56	-0.13
A12_V_TZ	0.34	0.67	0.63	0.32	-0.11	-0.38	-0.33	-0.38	-0.38	-0.36	-0.55	-0.17
A13_V_DNO	0.74	-0.33	-0.59	-0.45	-0.45	-0.43	-0.27	-0.36	-0.15	0.2	0.54	0.9
A13_V_DNO_NE	0.58	0.86	0.61	0.23	-0.14	-0.37	-0.26	-0.43	-0.4	-0.35	-0.62	-0.25
A14_V_EC_NO	0.34	-0.12	-0.26	-0.32	-0.34	-0.31	-0.51	-0.51	3.84E-02	0.51	0.55	0.54
A14_V_K	0.33	-0.11	-0.19	-0.27	-0.33	-0.42	-0.67	-0.62	3.07E-02	0.44	0.76	0.73
A14_V_ECSE	-0.39	-0.35	-0.26	-6.67E-02	0.38	0.56	0.44	0.3	5.18E-02	-0.35	-0.44	-0.4
A11_V_DE	8.17E-02	0.53	0.84	0.76	3.57E-02	-0.62	-0.43	-0.32	-0.31	-0.32	-0.21	-0.22
A11_P_EC	0.25	0.58	0.63	0.57	0.33	-0.27	-0.5	-0.32	-0.27	-0.27	-0.31	-0.25
A11_V_EC	-0.33	0.3	0.58	0.6	0.46	-0.16	-0.59	-0.32	-0.27	-0.26	-0.31	-0.46
A11_P_TZ	0.26	0.55	0.67	0.54	0.12	-0.42	-0.47	-0.31	-0.26	-0.27	-0.27	-0.11
A11_V_TZ	0.25	0.54	0.67	0.58	0.16	-0.42	-0.47	-0.31	-0.26	-0.27	-0.26	-0.13
A11_V_DO	-0.39	-0.36	-0.28	-0.11	6.15E-03	2.01E-02	0.3	0.61	0.74	9.16E-02	-0.48	-0.42
A13_P_K_TZ	0.4	-0.14	-0.56	-0.47	-0.48	-0.41	-0.33	-0.36	-0.1	0.26	0.58	0.71
A13_V_K	0.4	-0.1	-0.55	-0.45	-0.46	-0.4	-0.34	-0.33	3.07E-02	0.38	0.64	0.7
A12_V_D1	-0.39	-0.34	-0.23	-0.15	-5.38E-02	0.26	0.34	0.36	2.86E-02	-0.38	-0.45	-0.43
A13_TECHO	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
A13_TECHODNE	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
A13_TECHODNO	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1

Zone HVAC: Ideal Loads Air System

Para el cálculo de demanda de energía para refrigeración y calefacción se selecciona un equipo ideal. Esto significa que no se modela todo un sistema de climatización sino un único componente. Se considera un equipo con un rendimiento del 100%, lo que implica que no se considera la energía para

el funcionamiento del equipo en el cálculo de la demanda total de energía. Se acciona únicamente cuando el local está ocupado y según la temperatura de consigna establecida que se muestra en la Tabla 46.

La temperatura de consigna se entiende como la temperatura a la cual se activan o desactivan los equipos de climatización. En este caso, se toma para calefacción una temperatura de consigna de 20°C, esto es si en el local se registran temperaturas inferiores se activa la calefacción. Para refrigeración se toma una temperatura de 26 °C, es decir para temperaturas del local superiores a este valor se activa la refrigeración. Estas temperaturas corresponden a la categoría II para los espacios habitables en edificios residenciales, según anexo informativo de la norma UNIT-ISO 1777-2.

	Temperatura de consigna (°C)
Calefacción	20
Refrigeración	26

Tabla 46. Temperaturas de consigna

Energy Management System (EMS)

Se utiliza este módulo del programa para aproximarse al uso de una vivienda en cuanto al manejo de la ventilación natural. Mediante programación, este módulo permite alternar entre el accionamiento de la refrigeración artificial y la apertura de ventanas para la ventilación de los locales en función de las condiciones ambientales. De esta forma, en el consumo de energía estimado para refrigeración está considerado el potencial de la ventilación natural. En este sentido, el programa acciona el equipo para refrigerar cuando las condiciones del aire exterior permiten la refrigeración de los locales por medio de la ventilación natural. Para este fin se considera que la temperatura del aire exterior tiene un límite inferior de 19 °C. (Veiga et al., 2019).

Relevamiento de casos

Se presenta a continuación, una selección de los posibles casos de estudio del relevamiento realizado de los proyectos promovidos por la Agencia Nacional de Vivienda. En Montevideo se relevaron 267 proyectos de los cuales 3 fueron preseleccionados para la consideración del estudio por las características tipológicas que poseen. También se preseleccionaron un proyecto en Tacuarembó y otro en Salto.

A continuación, se presenta un resumen de los casos preseleccionados.

Montevideo

Proyecto N°022 – Barrio Sur

“Es un complejo de 11 casas independientes, 6 casas de 2 dormitorios algunas de ellas con cocheras y 5 de 1 dormitorio, en dúplex, todas orientadas y ventiladas a sus propios patios de uso exclusivo. Las casas se desarrollan en dos plantas, en la planta baja se ubica el living comedor con cocina integrada y el patio de uso exclusivo y en la planta alta se ubican los dormitorios con el baño, ya sea para las de 1 ó 2 dormitorios. La distribución del complejo se realiza mediante un bloque de casas una al lado de la otra, ventilando las mismas hacia un corredor lateral y al patio de uso exclusivo. La particularidad del complejo es que está diagramado para que las ventanas (dormitorios) y puertas ventanas (living comedor) de las casas, no se visualicen unas con otras, dando así total intimidad a cada unidad.”





Plantas albañilería proyecto Nº 022 Fuente: elaboración propia

Proyecto Nº272 Malvín

Se trata de un conjunto habitacional conformado por 8 unidades de vivienda de 2 dormitorios. Cuatro se implantan en planta baja y cuatro en planta alta con acceso mediante escaleras abiertas. Además, se proyectan un espacio con destino estacionamiento. El sistema constructivo es no tradicional, y se trata del Royal Building System, con cerramiento superior en isopanel (adjuntan contrato de permiso para la utilización del DAT).



Volumetría y planta albañilería proyecto Nº272. Fuente: elaboración propia

Proyecto N°299 _ Lezica

Se trata de un conjunto habitacional implantado en un terreno de 50 m de ancho con acceso por la Avda. Lezica y la calle Gutenberg, una calle central donde se ubican las viviendas alineadas, apareadas dúplex, separadas entre sí generando espacios libres propios de cada unidad en el frente, lateral y fondo. El sistema constructivo es tradicional, con estructura de hormigón armado y mampostería en cerámica.



Volumetría y planta albañilería proyecto N°299 Fuente: elaboraci



Tacuarembó

Proyecto N°336

“Se trata de un conjunto habitacional conformado por 70 unidades de vivienda (54 de 2D y 16 de 3D) que se distribuyen en dos bloques con dos niveles y en unidades aisladas implantadas en fracciones independientes. Estas últimas se desarrollan en una sola planta.

El conjunto tiene calle interior a la que se vuelcan las viviendas. El sistema constructivo es EMMEDUE no tradicional que tiene DAT aprobado por el Mvotma.”

ARBOLEDA I

Unidades 39 - 54



Prototipo Abedul 3D
150 m² Exclusivos



Superficie	
Área de construcción	56 m ²
Área exterior	94 m ²

Abedul 3D	
Estar - Comedor cocina integrada	10.30 m ²
Dormitorio 1	10.75 m ²
Dormitorio 2	7.65 m ²
Dormitorio 3	6.25 m ²
Baño	2.95 m ²

ARBOLEDA I

Unidades 01 - 38



Prototipo Abedul 2D
150 m² Exclusivos



Superficie	
Área de construcción	49 m ²
Área exterior	101 m ²

Abedul 2D	
Estar - Comedor cocina integrada	10.30 m ²
Dormitorio 1	10.75 m ²
Dormitorio 2	7.65 m ²
Baño	2.95 m ²

ARBOLEDA I

Prototipos de viviendas 01 - 54



Plano general del proyecto
14.168 m² De Terreno

Abedul 2D 38 u
Abedul 3D 16 u



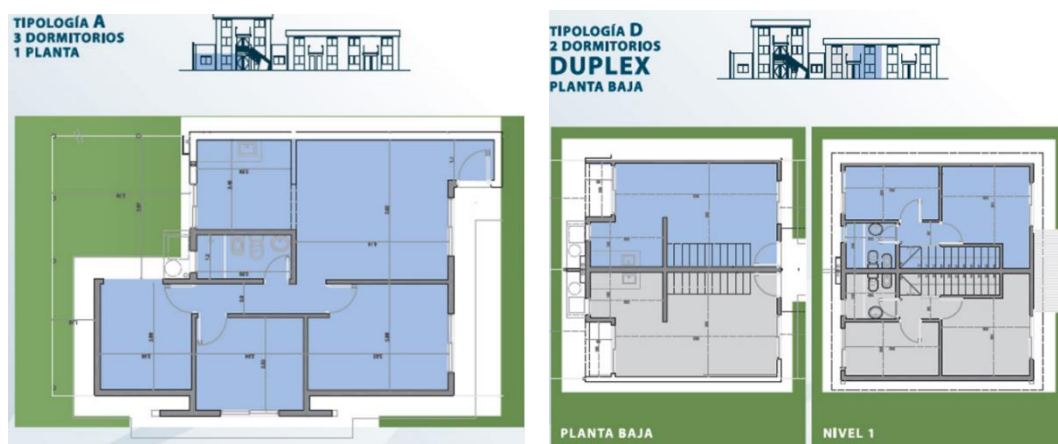
Volumetría y planta albañilería proyecto N°336. Fuente: elaboración propia

Salto

Proyecto N°114

“Se trata de un conjunto habitacional conformado por sesenta y seis viviendas (7 de 2D desarrolladas en una planta, 52 de 2D dúplex y 7 de 3D desarrolladas en una sola planta).El se implanta en tiras de vivienda, con planta baja y tres plantas altas, con acceso a las plantas altas por medio de una escalera exterior.A su vez, se consideraron espacios de esparcimiento tanto de uso común, como de uso exclusivo de las unidades de vivienda que conforman el conjunto.

El proyecto presentado (manzana A) integra un proyecto global que se compondrá de 246 viviendas, tal como se observa en planos y está aprobado por la de la Intendencia departamental de Salto según consta en informe adjunto, el que se irá haciendo por etapas sucesivas.El sistema constructivo es tradicional, con entrepisos en hormigón armado, techos livianos en paneles de chapa autoportante (5 GRECAS de Cubierta ACH) y muros de mampostería y hormigón con revoque interior termoaislante ISOLTECO”



Volumetría y planta albañilería proyecto N°114. Fuente: elaboración propia

Caso seleccionado

