



Facultad de Arquitectura,
Diseño y Urbanismo
UDELAR



UNIVERSIDAD
DE LA REPÚBLICA
URUGUAY

Universidad de la República - Uruguay
Facultad de Arquitectura, Diseño y Urbanismo

DESEMPEÑO ENERGÉTICO DE LA DOBLE FACHADA VENTILADA OPACA EN EDIFICIOS DE OFICINAS EN CLIMA TEMPLADO: EL CASO DE MONTEVIDEO

Tesis de maestría en Construcción de Obras de Arquitectura. Edición 2018

Tesista: Arquitecto Gabriel Pérez Miñón

Tutora: Dra. Silvana Flores Larsen

Co-tutora: Mg. Arq. Lucía Pereira Ruchansky

Año 2022

DEDICATORIA

Dedico este trabajo a mis padres por haberme incentivado en todo momento a formarme y desarrollar un espíritu crítico, a avanzar siempre desde un lugar sano basado en el esfuerzo, el trabajo y la humildad. A mis amigos de siempre y a los nuevos que conocí en este proceso, por estar siempre y por su apoyo constante.

AGRADECIMIENTOS

Primeramente, a mi familia, por su apoyo incondicional durante el transcurso de esta maestría, ya que sin su impulso todo hubiese sido menos placentero. A mi directora de tesis, la Dra. Silvana Flores Larsen, quien en todo momento me ha guiado en el proceso de construcción de esta tesis; ya que sin su apoyo este trabajo no hubiese sido posible. Su constante presencia, sus comentarios y su guía han sido un motor para continuar con lo propuesto en un principio. A la Mag. Arq. Lucía Pereira quien ha co-tutoreado este trabajo aportándome otras visiones complementarias que me han ayudado a enriquecer la búsqueda y complementar este trabajo desde diversos ángulos. A las personas de la Unidad Agroalimentaria Metropolitana que me facilitaron diversas fuentes de valiosa información. A los docentes de la Maestría en Construcción de Obras de Arquitectura y a la Facultad de Arquitectura por brindarme una visión más amplia y enriquecedora de la profesión. Y, por último, pero no menos importante a mis amigos y afectos cercanos por apoyarme siempre y darme el ánimo necesario.

RESUMEN

La envolvente arquitectónica se manifiesta como uno de los subsistemas tecnológicos más importantes del edificio, esta actúa como un filtro de las condiciones ambientales exteriores regulando los intercambios energéticos entre el interior y el exterior; actuando como una interfaz pasiva. Entre las alternativas constructivas destinadas a resolver la envolvente externa del edificio, la fachada ventilada opaca (FVO) es una opción a considerar.

La fachada ventilada es usada tanto en construcciones nuevas, como en intervenciones y rehabilitación de edificios. En la ciudad de Montevideo son pocos los ejemplos de fachadas ventiladas construidas, aunque su uso se está comenzando a implementar paulatinamente. Se entiende necesario realizar un estudio que permita definir el potencial de ahorro energético y eficiencia en edificios de oficinas situados en este contexto climático.

Se busca analizar si es una solución apropiada cuando se trata de mejorar la eficiencia energética del cerramiento en climas como el de Montevideo, ya que la mayoría de las publicaciones e investigaciones acerca del desempeño energético corresponden al contexto europeo, donde las variaciones climáticas son más extremas.

En esta tesis se presentan los primeros resultados del potencial de uso y desempeño energético de fachadas ventiladas opacas para el clima de Montevideo.

En este marco, el objetivo del presente trabajo, consiste en estudiar la eficiencia de una doble fachada ventilada aplicada a un edificio de oficinas existente ubicado en la ciudad de Montevideo. Primeramente, se ha simulado el caso base, es decir el edificio tal cual está construido, luego se ha simulado la hipótesis de que el edificio hubiese sido resuelto con una fachada tradicional que cumpla con la normativa departamental y por último el caso en que la envolvente hubiese sido resuelta con una FVO. Para ello, se utilizó el "software" libre SIMEDIF en su reciente versión 2.0, donde se dividió el edificio en 6 zonas térmicas elegidas estratégicamente y donde se definieron los elementos de conexión entre las zonas térmicas y sus características.

Los resultados de las simulaciones evidencian que las demandas energéticas para refrigeración son menores que las demandas para calefacción, con valores próximos a 0.20 kW/m^2 (58 kW totales para todo el edificio) el período cálido y en los tres casos de estudio. En el caso donde la envolvente se plantea como FVO se obtienen valores más parejos entre las diferentes zonas térmicas y algo más bajos que en los demás casos, sobre todo para la zona térmica con más superficie expuesta al exterior. El empleo de una FVO implica un ahorro de 7.4% de energía adicional para refrigerar el edificio respecto al caso base. En cuanto al período frío, la demanda energética del edificio es mayor, con valores cercanos a los 0.30 kW/m^2 (84 kW totales para todo el edificio) en el período frío para los tres casos analizados. La elección de una FVO implicaría el mismo ahorro de 4,8% que si la envolvente fuese ejecutada con cerramiento tradicional respecto al tipo de envolvente del caso base.

Luego del análisis de este edificio de oficinas se pueden transpolar los resultados obtenidos a edificios de similares características –alto porcentaje de vidriados en fachadas, similar carga de ocupación en relación al área, escasas posibilidades de ventilación natural, entre otras– se puede concluir que el empleo de una FVO en nuestro contexto climático y en edificios de estas características ofrece mejor desempeño en el período caluroso, pero no garantiza reducciones significativas en la energía adicional para refrigerar o calefaccionar el edificio respecto a las demás soluciones de envolvente estudiadas. Optar por una FVO en estos casos no se basa en criterios estrictamente vinculados a la eficiencia energética sino en conjunto con otros criterios que puedan ser relevantes como aspecto final, rapidez de construcción, costos, entre otros.

ÍNDICE

DEDICATORIA	2
AGRADECIMIENTOS	3
RESUMEN	4
ÍNDICE	5
CAPITULO I: INTRODUCCIÓN	7
1.1 CONTEXTO	7
1.2 OBJETIVOS GENERALES Y ESPECÍFICOS	8
1.3 ESTRUCTURA DE LA TESIS Y METODOLOGÍA	8
CAPÍTULO II: MARCO TEÓRICO	9
2.1 DESAFÍOS Y ESTRATEGIAS ACTUALES	9
2.2 SITUACIÓN ENERGÉTICA EN URUGUAY	10
2.3 FACHADAS VENTILADAS OPACAS	11
2.4 CLASIFICACIÓN DE LAS FACHADAS VENTILADAS OPACAS	14
2.5 PANORAMA DE LAS PRINCIPALES INVESTIGACIONES ACADÉMICAS	15
2.5.1 Movimiento de aire dentro de la cavidad	15
2.5.2 Desempeño térmico de las fachadas ventiladas opacas	18
2.5.3 Impacto de la envolvente ventilada opaca en el desempeño energético	20
2.6 FACTORES DE DISEÑO DE UNA FVO	21
2.6.1 Piel exterior	21
2.6.2 Diseño de las juntas	21
2.6.3 Diseño de la cámara de aire	21
2.6.4 Capa interior	22
2.7 PRINCIPALES CONCLUSIONES	22
CAPÍTULO III: METODOLOGÍA DE INVESTIGACIÓN	24
3.1 SELECCIÓN DEL CASO DE ESTUDIO	24
3.2 CARACTERIZACIÓN DEL CLIMA DE MONTEVIDEO	24
3.3 DESCRIPCIÓN DEL “SOFTWARE” DE SIMULACIÓN TÉRMICA	25
3.4 ZONIFICACIÓN TÉRMICA DEL EDIFICIO	27
3.5 GANANCIAS INTERNAS	29
3.6 VENTILACIÓN E INFILTRACIONES	29
3.7 CONEXIÓN DE LAS ZONAS TÉRMICAS CON LOS ELEMENTOS	32
3.7.1 Paredes masivas y capas de paredes	32
3.7.2 Tabiques livianos	36
3.7.3 Vidriados	39
3.7.4 Aberturas y vanos	40
3.8 CRITERIOS DE EVALUACIÓN DE DESEMPEÑO	41
CAPÍTULO IV: DESCRIPCIÓN DEL CASO DE ESTUDIO	43
CAPÍTULO V: ANÁLISIS BIOCLIMÁTICO DEL CLIMA DE MONTEVIDEO	53
CAPÍTULO VI: SIMULACIÓN DEL CASO BASE	59
6.1 ANÁLISIS DE RESULTADOS CASO BASE INVIERNO	59
6.1.1 Cálculo de energía auxiliar	61
6.1.2 Cálculo de confort	63
6.2 ANÁLISIS DE RESULTADOS CASO BASE VERANO	65

6.2.1 Cálculo de energía auxiliar	67
6.2.2 Cálculo de confort	69
6.3 CONCLUSIONES PRELIMINARES	71
CAPÍTULO VII: ANÁLISIS DE CASO DE FACHADA CONVENCIONAL Y CASO DE FACHADA VENTILADA OPACA	72
7.1 DESCRIPCIÓN DEL MODELO TÉRMICO PARA SIMULAR FACHADA CONVENCIONAL Y FACHADA VENTILADA	72
7.2 ANÁLISIS DE RESULTADOS	74
CAPÍTULO VIII: CONCLUSIONES	78
BIBLIOGRAFÍA	81

CAPÍTULO I: INTRODUCCIÓN

1.1 CONTEXTO

El uso de fachadas ventiladas opacas (FVO) ha aumentado considerablemente en los últimos años, puesto que constituye una solución de la envolvente en una variedad de tipos de edificios, climas y configuraciones de diseño. Una FVO es una fachada multicapa industrializada compuesta por dos capas opacas (usualmente una de ellas con aislación térmica) y un canal de ventilación entre ambas en el que circula el aire exterior. El sistema ofrece una amplia variedad de revestimientos externos, materiales, colores y tamaños de placas. El principal interés en las FVO es su potencial para reducir las cargas térmicas de enfriamiento debido principalmente al efecto de sombreado que bloquea la radiación solar en verano sobre el muro. Además, las fachadas ventiladas reducen los problemas de humedad del edificio: penetración de la lluvia, daños por heladas, descomposición, corrosión, crecimiento de moho y decoloración de materiales de construcción. Por otra parte, se considera una solución adecuada no sólo para la renovación de edificios existentes sino también para edificios nuevos (Ibáñez-Puy *et al.*, 2017).

La influencia de las fachadas ventiladas en la performance energética de los edificios es un tema de investigación actual, puesto que la respuesta es diferente de acuerdo al clima del lugar. La investigación internacional se orienta a comprender y cuantificar la influencia de las condiciones ambientales externas y las decisiones de diseño en la capacidad de las FVO de reducir el consumo energético y mejorar las condiciones higrotérmicas en el interior de edificios.

La principal diferencia en el análisis térmico y energético entre una fachada convencional y una FVO son los fenómenos específicos que ocurren dentro de la cámara de aire. Además de los procesos de conducción y transferencia de calor por radiación, la convección en el canal de ventilación es uno de los principales mecanismos de transferencia de calor que afecta el comportamiento de las FVO. En particular, el movimiento de aire puede producirse por convección natural o forzada, ya sea por el viento o por extractores automáticos de aire. El estudio por simulación computacional de dichos fenómenos es la base del análisis del desempeño de estos sistemas.

En la presente tesis se propone estudiar un edificio construido, identificado como “Caso Base” que está resuelto con una envolvente innovadora y comparar las demandas de energía auxiliar para calefacción y refrigeración en los casos hipotéticos de que su envolvente hubiese sido una fachada convencional según los requerimientos de la normativa actual de Montevideo y en el caso de que la envolvente hubiese sido resuelta con una FVO.

Existen investigaciones en donde se encontró que, en ciertos climas, las fachadas ventiladas opacas no son una estrategia con grandes beneficios térmicos respecto a otras fachadas aisladas, sino más bien que presentan ventajas vinculadas a lo estético o al mantenimiento (Ibáñez-Puy *et al.*, 2017).

Las fachadas ventiladas no han sido estudiadas en el clima de Montevideo, por lo que se desconoce su nivel de efectividad en cuestiones energéticas. Mediante el análisis que se llevará a cabo en este trabajo se podrá contextualizar el desempeño energético de las FVO en edificios de oficinas para el clima de Montevideo. Los resultados permitirán obtener un conocimiento específico de la eficiencia y capacidad de este sistema, su incidencia en la demanda energética y en las condiciones higrotérmicas interiores de este edificio. Estos resultados serán de mucha utilidad para adoptar criterios de proyecto a la hora de construir o rehabilitar edificios en nuestro contexto.

1.2 OBJETIVO GENERAL Y OBJETIVOS ESPECÍFICOS

Objetivo general

Determinar la efectividad de la doble fachada ventilada opaca para reducir la demanda energética de edificios de oficinas en el clima de Montevideo.

Objetivos específicos

1. Seleccionar un prototipo de edificio sobre el que se realizará el análisis.
2. Caracterizar el desempeño térmico y energético del edificio con su envolvente actual en las condiciones de clima de Montevideo mediante simulación computacional.
3. Evaluar el desempeño energético del edificio considerando un sistema convencional en su envolvente mediante simulación computacional.
4. Evaluar el desempeño energético del edificio considerando la solución de FVO en su envolvente mediante simulación computacional.
5. Analizar y comparar el desempeño energético del edificio con su envolvente actual, con una fachada en sistema convencional y con una FVO, tanto para invierno como para verano, en relación al clima de Montevideo.

1.3 ESTRUCTURA DE LA TESIS Y METODOLOGÍA

El presente trabajo de investigación se desarrolla en ocho capítulos. El primer capítulo de introducción contextualiza el uso e implementación del sistema de FVO a nivel global y plantea la carencia de investigación para este sistema en el contexto de Montevideo. Además, se plantea el objetivo general y los objetivos específicos del presente trabajo junto con la metodología de análisis.

El Capítulo II presenta los desafíos y estrategias actuales para hacer frente a las condiciones climáticas cada vez más severas y conseguir ambientes más confortables haciendo uso eficiente de la energía. Se presenta, además, el panorama de la realidad energética de Uruguay. Por último, se presenta el sistema de FVO, las principales líneas de investigación en la materia, clasificación de las mismas y análisis de las implicancias de los componentes del sistema.

En el Capítulo III se presenta la metodología de investigación, donde se selecciona el caso de estudio, se caracteriza el clima de Montevideo, se describe el “*software*” con el cual se realizarán las diferentes simulaciones energéticas y se realizan los cálculos de los diferentes parámetros a cargar para realizar las simulaciones y se definen los criterios de evaluación de desempeño. En el capítulo IV se describe el caso de estudio, su implantación, orientación, materialidad, dimensiones, y todos los elementos relevantes al momento de analizar su desempeño energético.

El análisis bioclimático del clima de Montevideo se realiza en el capítulo V en función de las estrategias bioclimáticas surgidas de los diagramas psicrométricos.

La simulación del caso base –el edificio tal cual se encuentra hoy– se desarrolla en el Capítulo VI, analizando los resultados para el período frío y para el cálido. En el capítulo siguiente –VII–, se realizan las simulaciones para el mismo edificio resuelto con fachada convencional y resuelto con FVO en ambos períodos y se analizan los resultados obtenidos. En el Capítulo VIII se desarrollan las conclusiones resultantes de las tres simulaciones y se presentan las limitaciones del trabajo, las dificultades, las posibilidades de trabajo futuro y la contribución de la tesis.

CAPÍTULO II: MARCO TEÓRICO

2.1 DESAFÍOS Y ESTRATEGIAS ACTUALES

Hoy en día abordar el cambio climático es una prioridad común debido a cuestiones éticas relacionadas con el concepto general de sostenibilidad y de futuro viable. En los últimos años, se está produciendo un proceso de calentamiento global cuya tendencia es ir aumentando, lo cual implica cambios en las condiciones ambientales; veranos más calurosos, períodos de sequías, fenómenos climáticos más severos, inviernos más extremos; entre otras cosas que repercutirán en la calidad de vida de las personas. Cada uno de los tres últimos decenios ha sido sucesivamente más cálido en la superficie de la tierra que cualquier decenio anterior desde 1850. La reducción de las emisiones de gases de efecto invernadero (G.E.I) y el desperdicio de energía son dos de los principales objetivos de la agenda internacional actual (IPCC, 2014).

La mitigación y la adaptación son enfoques complementarios para reducir los riesgos de los impactos del cambio climático. Las medidas de mitigación son aquellas acciones que están encaminadas a reducir y limitar las emisiones de G.E.I., mientras que las medidas de adaptación se basan en reducir la vulnerabilidad ante los efectos derivados del cambio climático. Los estudios más recientes demuestran que las reducciones más eficaces en las emisiones no evitan todos los impactos en el cambio climático, por lo que la necesidad de adaptación es inevitable. Debido a la actual y proyectada tendencia hacia un clima cada vez más cálido, precipitado por los altos niveles en emisiones de G.E.I en los países industrializados, la adaptación es una estrategia necesaria a todos los niveles como complemento de los esfuerzos de mitigación del cambio climático ya que no existe seguridad de que todo el cambio climático pueda ser mitigado (IPCC, 2014).

El sector de la construcción es uno de los sectores de mayor consumo energético y, en consecuencia, responsable de un alto porcentaje de emisiones de gases de efecto invernadero. La Agencia Internacional de Energía estimó que en los Estados Unidos el consumo de energía en el sector de la construcción es del 45% y en Europa de alrededor del 40%, donde por ejemplo en el Reino Unido ronda el 42%, mientras que en Italia es del 40% (IEA, 2012). Además, en Europa, el consumo de energía de los edificios construidos antes 1990, es decir, antes de adoptar una política común de ahorro de energía, fue aún mayor (European Environment Agency, 2014). Aunque la demanda de energía de los edificios con alto consumo energético podría ser parcial o totalmente equilibrada por el uso generalizado de fuentes de energía renovables, esto, sin embargo, representa un desperdicio de energía limpia (Ascione, 2017).

Dado el enorme impacto de los edificios en el consumo de energía y en la emisión de gases de efecto invernadero, los países de la Unión Europea están promoviendo el desarrollo de ciudades más eficientes donde la figura de edificios con energía neta cero (NZEB¹) o Edificios con Energía Casi Nula (EECN) juega un papel cada vez más importante. En este tipo de edificios, el diseño busca aprovechar las características termo-físicas de los materiales utilizados, que deben ser sensibles al clima (Won-Duck & Kang-Guk, 2013), reducir los flujos térmicos entre el interior y el exterior del edificio, minimizar sobrecalentamiento debido a la radiación solar en verano y maximizar el aporte solar en invierno (Arce *et al*, 2009, Giancola *et al.*, 2012).

¹ Edificio NZEB: edificio energéticamente eficiente donde, en base a las fuentes de energía, la energía suministrada anual real es menor o igual a la energía exportada renovable en el lugar (DOE, 2015)

La envolvente es el elemento constructivo que tiene mayor incidencia en el consumo de energía para acondicionamiento en un edificio, ya que representa la interfase entre los factores climáticos exteriores y la demanda interior de los ocupantes; donde las últimas son más o menos constantes y las primeras varían constantemente (Badarnah Kadri, 2012).

Una de las posibles estrategias a utilizar son las envolventes ventiladas, que ayudan a reducir el uso de energía para climatización y mejoran el confort térmico de los ocupantes (Gagliano & Aneli, 2020). Esta estrategia viene siendo estudiada ya desde la década de 1970, debido a la necesidad de ahorrar energía y se han publicado estudios experimentales y modelos de análisis. En las últimas décadas el tema ha resurgido con mayor fuerza debido al esfuerzo por diseñar edificaciones energéticamente eficientes y que adopten medidas de adaptación capaces de responder a la tendencia de un clima cada vez más cálido, principalmente en las zonas con climas cálidos y húmedos (Arce *et al.*, 2009).

2.2 SITUACIÓN ENERGÉTICA EN URUGUAY

A nivel mundial, aproximadamente el 31% del consumo total de energía corresponde a edificios donde el sector residencial consume el 23% y el 8% restante corresponde a comercios y servicios públicos. (MIEM, 2016). En Uruguay, el consumo final energético por fuente y por sector establece que los edificios consumen el 25% de la energía de los cuales el 18% corresponde al sector residencial y el 7% restante al sector comercial, servicios y sector público. Para el sector residencial la principal fuente consumida fue la electricidad representando el 47% y para el sector comercial, servicios y sector público, el 83% provino de la electricidad (MIEM, 2020).

De acuerdo al Balance Energético 2019 del Ministerio de Industria, Energía y Minería (MIEM, 2020) “En 2019, el abastecimiento de energía total prácticamente se mantuvo constante respecto a 2018 con una leve tendencia a la baja. La biomasa, al igual que en los últimos años, ocupó el primer lugar en la matriz primaria, luego de que en 2016 desplazara al petróleo y sus derivados que han sido históricamente la principal fuente de abastecimiento del país. En 2019, la disminución que se registró en el abastecimiento de petróleo y derivados (8%) fue compensada en gran medida por el aumento que tuvo el abastecimiento de electricidad de origen hídrico (24%) y de gas natural (46%). La energía solar, así como la electricidad de origen eólico prácticamente se mantuvieron constantes con aumentos de 3% y 0.4% respectivamente”.

Según el balance energético de 2019 (MIEM, 2020) se puede decir en cuanto a la generación de electricidad por fuente que el 98% de la energía producida proviene de fuentes renovables. Finalmente, en cuanto a las emisiones de dióxido de carbono los edificios representan el 7% del total donde el 6% corresponde al sector residencial y el 1% restante a comercios, servicios y edificios del sector público, siendo el sector transporte el que tiene el 60% de las emisiones de CO₂.

Una de las maneras de disminuir el consumo energético de edificios es a través de un buen diseño de la envolvente. Este buen diseño implica no solamente un adecuado nivel de aislación térmica, sino también un buen diseño de las áreas vidriadas, materiales, y sistemas novedosos en las fachadas que están siendo cada vez más utilizados, por cuestiones estéticas, de mantenimiento y energéticas. Entre estos sistemas no convencionales se encuentran: las dobles fachadas verdes, las pieles de vidrio, las fachadas opacas ventiladas en sus diferentes conformaciones, entre otros. Estos sistemas novedosos deben ser estudiados bajo distintas condiciones climáticas para conocer su eficiencia, por ejemplo, una piel de vidrio que funciona bien en determinado contexto climático no necesariamente tendrá un buen desempeño en otro contexto. En

el análisis bibliográfico se han encontrado estudios que aseveran que los beneficios de las FVO son más notorios en climas con veranos largos y calurosos donde los requerimientos para enfriamiento son mayores, mientras que para climas ventosos y fríos una FVO puede minimizar las pérdidas de calor por convección al conformar una barrera contra el viento (De Boeck *et al.*, 2015). Para el contexto bioclimático de Montevideo no se han realizado estudios al respecto y por tal motivo se ha decidido indagar en su desempeño en estas condiciones.

2.3 FACHADAS VENTILADAS OPACAS

Una fachada ventilada opaca —FVO— es una variante del muro cortina². Consiste en dos capas opacas, el sustrato y el revestimiento multicapa, y un canal de ventilación en medio (Fig.1). El panel exterior puede ser de paneles modulares de diferentes materiales opacos impermeables (metálico, cerámico, pétreo o de laminados de alta presión —HPL—). Estos paneles se cuelgan mediante una subestructura, generalmente metálica, a la cara exterior del muro, generando una cavidad de aire entre el muro y la cara externa. Esta cámara de aire puede tener juntas abiertas o cerradas y en su interior se produce un efecto chimenea que favorece su ventilación, en algunos casos, en ese canal de ventilación se coloca aislación térmica (Fernades Maciel & Carvalho, 2019).

El mayor interés en las fachadas ventiladas radica en que es una modificación de la envolvente que permitiría reducir las demandas energéticas del edificio (Ibáñez-Puy *et al.*, 2017). Por ello, el uso de fachadas ventiladas opacas ha aumentado considerablemente en los últimos años como una solución de revestimiento en una gran variedad de edificios, climas y configuraciones de diseño. Es una solución válida no sólo para edificios nuevos sino también para la readecuación de edificios existentes.

El sistema de FVO fue desarrollado inicialmente en países del norte de Europa para resolver problemas referidos a la durabilidad de las construcciones, buscando protegerlas de las lluvias fuertes, viento y demás inclemencias climáticas (Falk *et al.*, 2014). Sin embargo, actualmente, el mayor interés radica en su capacidad de reducir las ganancias térmicas por calentamiento en países del sur de Europa (Marinosci *et al.*, 2014).

² Muro cortina: es un sistema de fachada autoportante, generalmente ligera y acristalada, independiente de la estructura resistente del edificio, que se construye de forma continua por delante de la misma (Morris, 2013).

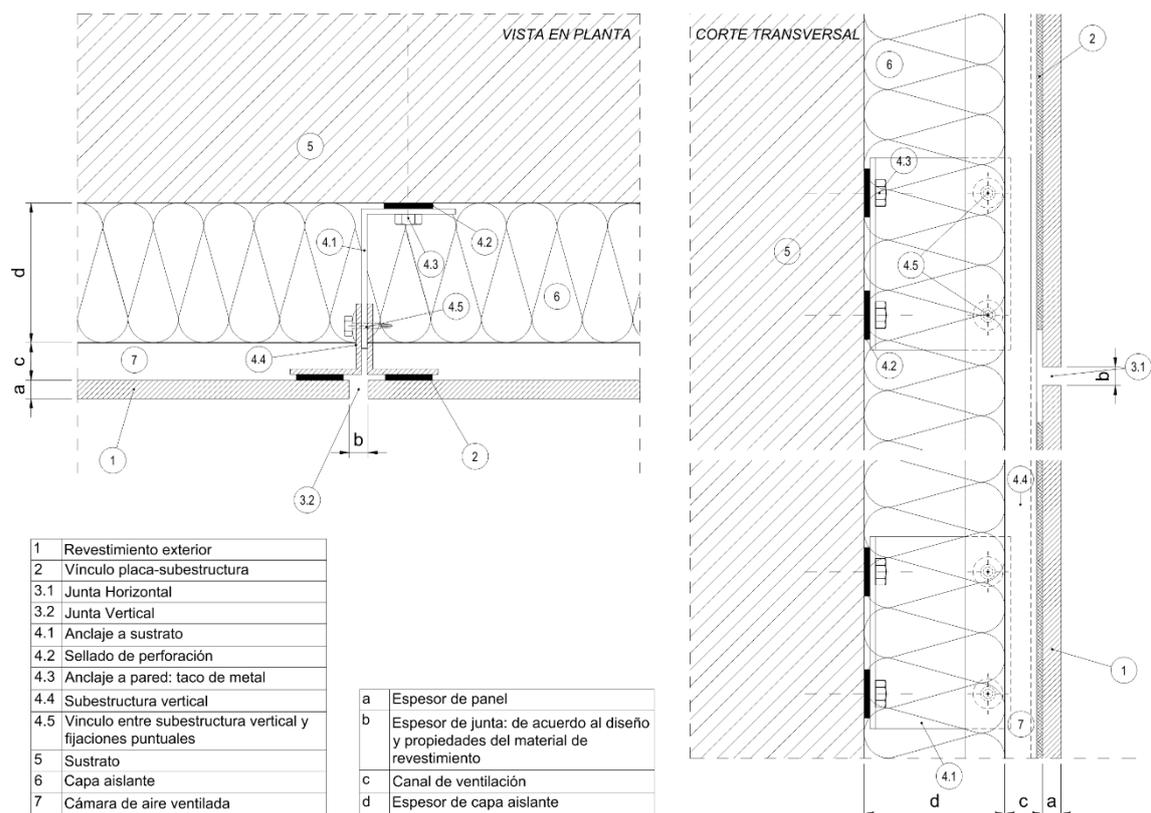


Fig. 1. Detalle constructivo de una posible FVO. Elaboración propia

El uso de FVO ofrece una amplia variedad de revestimientos exteriores y la posibilidad de elegir una amplia gama de materiales, colores y tamaño de piezas, además de ofrecer beneficios al reducir problemas constructivos debido al empleo de piezas industrializadas. Según fichas técnicas consultadas de fabricantes de placas europeas (Trespa, 2020), el sistema de fachadas ventiladas consta de los siguientes componentes:

a. Revestimiento exterior

Las placas o piezas que conforman la cara exterior de la fachada se usan como elementos de control climático y decorativos, ofreciendo de esta manera una solución arquitectónica con beneficios tanto energéticos como estéticos. Las juntas entre las placas pueden permanecer abiertas o cerradas, dependiendo del diseño y las propiedades higroscópicas del material elegido para la cara decorativa. El revestimiento exterior actúa como una barrera de radiación solar y de protección contra el viento y conforma la cara exterior de la cámara de aire ventilada.

b. Cámara de aire

La cámara de aire entre el revestimiento exterior y la aislación —si la hay— o el muro de sustrato permite que el aire circule a través de las respectivas entradas y salidas de ventilación. Para que haya ventilación continua detrás de la placa se requiere que la cámara de aire entre el revestimiento exterior y el aislamiento o la construcción tenga una profundidad específica. La profundidad de la cámara de aire, así como el tamaño mínimo de las entradas y salidas de ventilación, deben satisfacer la normativa de construcción, los reglamentos y los certificados aplicables.

En las fachadas ventiladas esta cámara de aire puede variar en espesor de acuerdo —también— a la subestructura de soporte de las placas, este es un espacio entre el

revestimiento exterior y el sustrato, es un lugar ideal para la colocación de la aislación siempre y cuando se deje el espacio propicio para que el aire fluya a través de la cámara eliminando de una manera natural la humedad producida por la lluvia y la condensación, para mantener en buenas condiciones el material de aislación garantizando su eficacia por más tiempo.

c. Subestructura

La fachada ventilada puede construirse usando diferentes sistemas para fijar la cara exterior a una subestructura.

Estos sistemas deben estar debidamente ensayados y certificados y ofrecen diferentes ventajas en términos de estética, pudiendo ser a través de fijación oculta —a través de cintas específicas diseñadas para tales propósitos—, remaches, encastres, etc.; cada uno con sus características de montaje, velocidad de ejecución y cualidades estéticas.

La conjunción de los componentes descritos arriba posibilita que se produzca el efecto chimenea, el cual hace que el aire circule a lo largo de la cámara, contribuyendo a evitar la acumulación de calor y eliminando la humedad producida por la lluvia o la condensación. El revestimiento exterior bloquea la radiación solar directa y proporciona un aislamiento continuo tal como se ve en la figura 2. Según los estudios, en sus contextos, esta combinación de componentes arroja una mejora del confort en las áreas ocupadas. Los residentes y los usuarios del edificio no solo tendrán a su disposición un espacio que requiere poco mantenimiento, sino que, además, por sus condiciones de reducción de la humedad y mejor desempeño térmico, el edificio contribuye de una manera positiva a mejorar la calidad ambiental interior. (Ibáñez-Puy *et al.*, 2017)

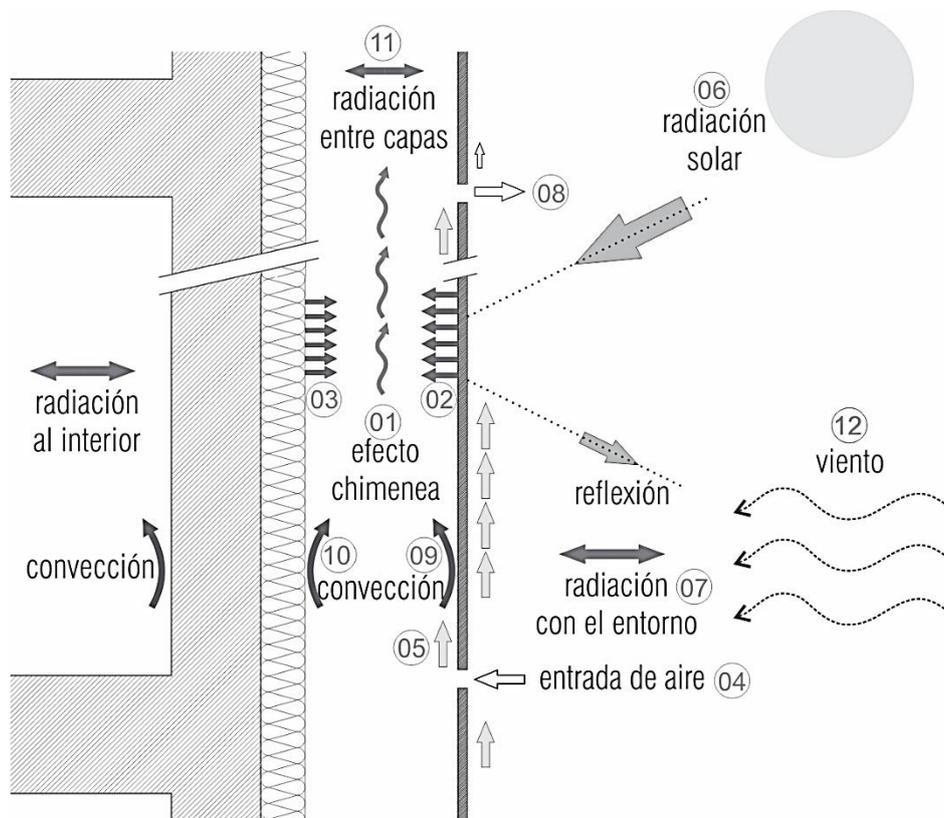


Fig. 2. Intercambios de calor que se producen entre los componentes de una FVO. Fuente: Elaboración propia en base a (Ibáñez-Puy *et al.*, 2017)

En la figura 2 se presentan los intercambios de energía que se dan entre los componentes de una FVO y se explican a continuación. El aire dentro de la cavidad se eleva a lo largo de la altura de la misma (1) ganando calor por conducción proveniente de la capa exterior (2) así como también de la capa interior (3). En la cara exterior del revestimiento, el aire entra a través de las aperturas inferiores (4) y sigue subiendo a medida que se calienta (5) debido a la radiación solar (6), y del entorno (7). Cuando alcanza suficiente temperatura (mayor que la del entorno), el aire comienza a salir de la cavidad (8) a través de las aperturas superiores extrayendo energía desde dentro de la cámara (convección). El aire próximo a las capas interiores se eleva por el efecto chimenea absorbiendo calor de las diferentes paredes (9, 10). El movimiento del aire también es condicionado por la radiación entre las dos capas que conforman la cavidad (11). La radiación solar no es el único conductor del aire dentro de la cavidad, el viento (12) también influye en el movimiento de aire (Ibáñez-Puy et al., 2017). En este esquema se sintetizan los intercambios energéticos entre los componentes del sistema descriptos anteriormente que conforman una FVO.

2.4 CLASIFICACIÓN DE LAS FACHADAS VENTILADAS OPACAS

De acuerdo al encuentro de las placas o piezas que conforman la fachada ventilada opaca estas se pueden clasificar en fachadas ventiladas de junta abierta o de juntas cerradas; presentando cada una de ellas características y comportamientos térmicos diferentes dados fundamentalmente por las características del flujo de aire dentro de la cavidad (M. Suárez *et al.* 2012).

En algunas aplicaciones el panel exterior es continuo o las juntas son selladas con diferentes materiales elásticos; en este caso la ventilación de la cámara de aire es posible por aperturas en el sector inferior y superior. En una FVO de junta cerrada el flujo ascendente es completamente continuo, homogéneo y simétrico a lo largo del canal produciéndose un efecto chimenea y un flujo de aire a lo alto de toda la fachada; por las aberturas inferiores ingresa aire a menor temperatura y por las aberturas superiores sale ese mismo aire a mayor temperatura (Ibáñez-Puy *et al.*, 2017).

En las FVO de junta abierta el flujo es mucho más complejo debido a las discontinuidades, la existencia de juntas abiertas permite que el aire exterior pueda entrar y salir libremente de la cavidad ventilada a lo alto de la toda la fachada, produciendo discontinuidades e inestabilidades en el flujo dentro del cavidad ventilada, el cual depende no solo de la geometría de la fachada, sino también de la radiación solar incidente, la temperatura exterior y las condiciones del viento (Sanjuan *et al.*, 2011).

Para las FVO de juntas abiertas —debido a estas discontinuidades— el efecto chimenea se ve reducido porque hay más aperturas en las que el aire entra y sale por diferentes puntos evitando que se produzca un flujo de aire continuo a lo alto de toda la fachada. (Sanjuan *et al.*, 2011). Muchas veces la decisión de optar por una FVO de juntas abiertas corresponde a la naturaleza del material de recubrimiento, a las dimensiones de sus piezas y a su respuesta frente a los cambios de humedad y temperatura que contraen y dilatan el material y en base a estos coeficientes se dimensionan las juntas.

De acuerdo al estudio de publicaciones referidas a la influencia del tipo de juntas en el desempeño térmico de las FVO en el hemisferio norte, se puede decir que las FVO de juntas abiertas tienen un mejor desempeño en la orientación norte —baja radiación solar— en condiciones de verano y cuando la capa exterior tiene baja absorción y color claro. Para el mismo período, pero para orientaciones con alta incidencia de radiación solar se desempeñan mejor las FVO de juntas cerradas —aperturas inferiores y superiores— y con la capa exterior de iguales características. Para el período frío y en

fachadas con baja incidencia de radiación solar se desempeñan mejor las cavidades selladas —sin ninguna apertura—, para igual período, pero para fachadas que reciben alta radiación solar se desempeñan mejor las FVO de juntas cerradas (Ibáñez-Puy *et al.*, 2017).

2.5 PANORAMA DE LAS PRINCIPALES INVESTIGACIONES ACADÉMICAS

En la presente sección se busca hacer una revisión de estudios recientes referidos a fachadas ventiladas opacas haciendo hincapié en las condiciones de la envolvente, metodologías de estudio y objetivos. La revisión se enfocó en tres aspectos principales: el movimiento de aire en la cavidad, el desempeño térmico de la FVO y el ahorro de energía.

2.5.1 Movimiento de aire en la cavidad

Los siguientes artículos revisados se refieren a fachadas ventiladas donde el intercambio de calor convectivo que se produce se debe principalmente al efecto chimenea dentro de la cavidad vertical. Los primeros tres estudios citados se centran en climas mediterráneos, puntualmente en la zona central de Italia debido a las características del clima mediterráneo que presenta inviernos templados y lluviosos y veranos secos y calurosos.

Statzi *et al.* (2014) en la Universidad Politécnica de Ancona —Italia—, han monitoreado las prestaciones térmicas de fachadas ventiladas opacas donde el recubrimiento estaba conformado por paneles de zinc-titanio. Este trabajo fue de tipo experimental donde las fachadas ventiladas fueron monitoreadas variando parámetros de diseño en un laboratorio exterior a escala real. El objetivo consistió en evaluar la estratificación térmica dentro de la cavidad ventilada. Las mediciones estuvieron dirigidas a comprender los impactos de varios factores, como la altura de la cámara de aire, los efectos del viento y la influencia de la radiación solar. Los autores confirmaron que columnas de aire más altas proporcionan mejores desempeños, pero también encontraron nuevos resultados, entre los cuales está el alto impacto del viento sobre las prestaciones térmicas en fachadas ventiladas de poca altura. Además, más allá de la fuerte relación entre el efecto de acumulación logrado y el impacto de las diferencias temperatura entre interior y exterior, el monitoreo permitió identificar la estratificación de temperatura en la cámara de aire.

Un segundo estudio de los mismos autores (Statzi *et al.*, 2011) se centró solo en sistemas de envolventes ventiladas donde la cara externa estaba compuesta de piezas cerámicas. Los autores monitorearon este sistema de fachadas ventiladas variando parámetros de diseño en un laboratorio a escala real para evaluar el comportamiento térmico durante los períodos de verano e invierno. El objetivo de la investigación fue lograr una comprensión completa de este tipo de fachadas ventiladas, donde se buscó cuantificar el comportamiento térmico y la dinámica del termofluido dentro de la cámara de aire y estudiar los fenómenos que se dan dentro del espacio vertical. El trabajo experimental analizó dos alturas de canales verticales, —6 y 12 m— respectivamente, midiendo y correlacionando las temperaturas del aire, el flujo de calor y parámetros térmicos. Obtuvieron como resultados que la fachada de 12 m., en presencia de alta radiación solar, se caracterizó por una mayor velocidad del aire en la cámara, debido a un efecto de chimenea más significativo, con temperaturas más bajas de las distintas capas del muro durante la noche. A través de estudios termográficos, los autores también encontraron que un sistema diseñado adecuadamente, además del buen comportamiento térmico en la mitigación de las cargas de enfriamiento y la mejora de las condiciones interiores, puede ser muy útil —también— durante la estación fría,

debido a la ausencia de puentes térmicos gracias a la colocación de aislación justo después del muro de sustrato.

Algunas variaciones en las capas habituales y tecnologías de las fachadas ventiladas fueron estudiadas por Marinosci *et al.* (2014), para climas del centro de Italia. Este estudio se realizó de manera experimental en una instalación real en San Mauro Pascoli —un edificio con una altura de 7,7 m aproximadamente— en el cual fueron analizadas y comparadas en términos de comportamiento térmico en verano varias configuraciones de fachadas ventiladas. Para el análisis experimental se colocaron termocuplas usadas como sensores de temperatura en las diferentes capas del sistema para evaluar el desempeño en cada una de las configuraciones analizadas. Se variaron los espesores de la cámara de aire (10 o 24 cm), la presencia de juntas abiertas entre los revestimientos externos, la apertura o cierre de las rejillas de ventilación de entrada y salida en la parte inferior y superior, y las diferentes terminaciones de la cara exterior. Se determinó —entre otras cosas— que un recubrimiento con un alto coeficiente de absorción, al tener una temperatura superficial más elevada, da lugar a un efecto de chimenea mejorado con mayor velocidad del aire en la cámara. Por otro lado, si el recubrimiento tiene una alta reflectancia solar, el flujo de calor en general es menor, por lo que toda la pared funciona mejor en términos de confort y disminuyen las cargas de refrigeración. Además, la presencia de juntas abiertas distorsiona el efecto chimenea, debido a la ventilación cruzada.

Por su parte Peci López *et al.* (2012) estudiaron los efectos del viento en el desempeño de las fachadas ventiladas analizando variaciones en la conformación de la envolvente y variando criterios de diseño. El sistema constructivo fue analizado cambiando las condiciones del viento dentro de la cámara para evaluar el desempeño del sistema en según las condiciones de ventilación dentro de la cámara de aire. De acuerdo al clima, las investigaciones fueron llevadas a cabo de forma experimental y numérica en Dinamarca, donde el módulo desarrollado fue colocado en la fachada suroeste de un edificio existente. Para validar el desempeño del modelo numérico se utilizó el “software” de simulación TRNSYS 2016 que mediante la aproximación zonal se utiliza para estudiar la dinámica de los fluidos; luego las variables más importantes se contrastaron con los datos experimentales. Se validaron los datos del modelo numérico luego de la fase experimental en condiciones de invierno y de verano. Los autores encontraron que más allá de la indiscutible utilidad en verano para disipar ganancias solares, las fachadas ventiladas también ofrecen beneficios en condiciones de invierno, sobre todo las FVO de junta cerrada en las fachadas que reciben alta radiación solar —norte, este, oeste—.

Los períodos de verano e invierno también han sido analizados por Seferis *et al.* (2011) que, mediante análisis numéricos llevados a cabo con el “software” ESP-r, evaluaron la convección producida dentro de la cámara de aire y la flotabilidad del aire dentro de la misma para el clima mediterráneo de Grecia. El estudio numérico fue validado frente a experimentos llevados a cabo en una instalación de pruebas en Atenas. La pared probada contaba con 24 cm en total, un revestimiento externo de 1,5 cm (más 2,5 cm de hormigón), un espacio de aire de 4 cm, una capa de aislamiento térmico de 5 cm. Se llevó a cabo un seguimiento experimental de un modelo a escala real y luego los datos recabados fueron comparados con las simulaciones realizadas con el “software” ESP-r obteniendo resultados equivalentes que pudieron ser validados.

Otro módulo de prueba de fachadas ventiladas fue investigado por Iribar-Solaberrieta *et al.* (2015) donde construyeron un laboratorio de pruebas en Bilbao (España), en el marco del proyecto DYNASTEE. El estudio partió de parámetros medidos a través de las células PASLINK las cuales surgen de un proyecto europeo cuyo objetivo era generar un sistema de ensayo estandarizado para condiciones exteriores que pudiera ser capaz de caracterizar muros con su correspondiente valor del coeficiente global de transmisión

del calor "U". Los datos de entrada para modelar y validar el modelo matemático fueron recabados y luego analizados a través del "software" para procesamiento de datos y funciones MATLAB (2010) para luego ingresarlos al programa de simulación energética de edificios TRNSYS (TRNSYS 16, 2016). El edificio simulado contaba con 6 pisos y 36 apartamentos en total y se evaluaron las mejoras alcanzables mediante la adopción de fachadas ventiladas en dos climas diferentes: Burgos (clima frío) y Almería (clima cálido). De la investigación se obtuvo que optimizando las fachadas ventiladas, en ambos climas, se pueden lograr beneficios y, por lo tanto, reducir la demanda de calefacción y necesidades de refrigeración, respectivamente resultando las siguientes recomendaciones: en general, en climas cálidos, se recomienda el aumento de la emisividad de las capas exteriores, mientras que, en lugares cálidos, una alta inercia de los revestimientos externos puede proporcionar beneficios térmicos.

Otros trabajos específicos se centran en los fenómenos que se producen en las fachadas ventiladas de junta abierta donde la circulación vertical del aire se ve afectada por la ventilación cruzada que se da a través de las juntas. Este sistema según la publicación de Sanjuan *et al.* (2011) requiere un estudio profundo para evaluar los fenómenos que se producen por el efecto de las juntas en lo que respecta a los rendimientos térmicos. Una comprensión precisa del desempeño de los sistemas de juntas abiertas presenta dificultad ya que los flujos de aire que se producen son complejos de evaluar con fiabilidad, para la mejor aproximación al fenómeno es preciso un estudio de dinámica de fluidos respaldado por experimentos. El estudio se desarrolló en la Universidad de Madrid comparando datos experimentales y modelado de los fenómenos a través de método de elementos finitos mediante el "software" de simulación "Ansys Fluent" (2005). Los autores encontraron, aplicando varios cálculos de dinámica de fluidos en "Ansys Fluent 2005", que el modelado da mejor ajuste para lo que concierne a la resolución de la turbulencia, respecto a lo experimental. La información medida en el modelado 3D fue usada para testear el comportamiento térmico de las fachadas ventiladas y también para probar la fiabilidad del modelo (modelo de turbulencia) y para conocer el impacto de algunas condiciones de diseño, como pueden ser radiación solar o dimensiones de las juntas y de la cámara de aire.

Un segundo estudio de algunos de los mismos autores (Sanjuan *et al.*, 2011) compara en España el rendimiento energético de una fachada ventilada de junta abierta respecto a un muro tradicional con cámara estanca en el que existe una circulación convectiva del aire. Se encontró que con las juntas abiertas se disminuye la acumulación de calor y se elimina humedad mediante la ventilación. El estudio computacional de Dinámica de los Fluidos —CFD— fue aplicado para estudiar las turbulencias que se producen mediante el modelo RANS —promedio de Reynolds—, mientras que la radiación se estudió mediante el modelo de ordenadas discretas. Para el clima de Madrid, los resultados mostraron una correlación entre la radiación solar y el caudal de flujo dentro de la cavidad. Además, sobre el perfil de los flujos de calor, temperatura del aire en la cavidad, temperaturas superficiales en la superficie interior del hueco, se observa que para la fachada ventilada el aumento con la altura era mucho más acentuada en comparación con la pared sellada. Finalmente, los autores concluyen que las fachadas de juntas abiertas presentan un mejor desempeño durante la temporada cálida y bajo condiciones de fuerte radiación, en la exposición sur de del edificio —hemisferio Norte— mientras que, para el lado norte, es preferible el uso de cavidades selladas. Este estudio fue realizado solo mediante simulación a través del "software" "Ansys Fluent 2005".

Según Suárez M. *et al.* (2012) que desarrollaron también un tercer trabajo estudiando los desempeños energéticos de las fachadas ventiladas de junta abierta, en las que compararon el rendimiento energético y el comportamiento térmico de esos sistemas a los alcanzables por medio de soluciones tradicionales con cámara de aire cerrada. El estudio numérico mediante simulaciones de dinámica de fluidos a través de computadora —CFD— fue validado frente a mediciones —por ejemplo, termografía—

en un módulo experimental situado en Madrid. Los autores concluyen en que los principales beneficios de las fachadas ventiladas se lograron para climas caracterizados por inviernos suaves y temporadas de verano caluroso, principalmente dirigidos a la aplicación de fachadas ventiladas opacas en la orientación sur del edificio. Las simulaciones numéricas fueron validadas con la etapa experimental.

Investigaciones numéricas, también en este caso por medio de un modelo computacional de dinámica de fluidos 2-D y mediciones experimentales fueron realizados por Giancola *et al.* (2012), con referencia a una instalación a escala completa en el sur de España, Almería concretamente —clima mediterráneo—. En una típica condición de clima mediterráneo, la fachada ventilada de juntas abiertas fue construida utilizando lamas de cerámica como capas externas. Se realizó un seguimiento en lo que se refiere a temperaturas, flujos de calor y radiación solar incidente. Se colocaron en la zona de estudio todos los equipos de seguimiento a diferentes alturas en las que se realizaron las medidas térmicas, junto con los estudios de termografía. Los resultados revelaron que se pueden obtener beneficios también en temporada de invierno, debido a que la temperatura del aire dentro de la cavidad es más elevada que la del ambiente exterior y por tanto las pérdidas de calor son menores. Esta investigación demostró correlación entre las medidas antes mencionadas y el desarrollo un modelo CFD que, para estudios futuros, se puede implementar fácilmente en “*software*” de simulación de energía.

En resumen, de acuerdo a los trabajos referidos anteriormente, hay diferentes modelos de aproximación que son usados para evaluar el desempeño de FVO que incluyen métodos analíticos, empíricos, experimentales, y modelos de Dinámica de Fluidos por Computadora, que permiten a los diseñadores comprender el comportamiento de los sistemas y predecir el desempeño final de las estrategias usadas evitando soluciones erradas. Sin embargo, los investigadores continúan realizando estudios experimentales con el fin de mejorar la validación de los modelos computacionales.

2.5.2 Desempeño térmico de las fachadas ventiladas opacas

La principal diferencia en el estudio de una fachada convencional y una ventilada es el fenómeno que ocurre en la cámara de aire ventilada. La convección, aparte de la conducción y radiación, es uno de los principales procesos de transferencia de calor que afectan el comportamiento de las fachadas ventiladas opacas según Falk & Sandin, (2013).

La ventilación natural puede ser conducida por dos fenómenos: la flotabilidad y el viento. La ventilación conducida por viento es consecuencia de la diferencia de presión en las superficies de la fachada producidas por las fuerzas del viento, mientras que la ventilación conducida por flotabilidad (efecto chimenea) ocurre como resultado de la diferencia de temperatura entre la parte inferior y superior de la cámara de aire.

El desempeño de las fachadas ventiladas opacas depende de parámetros externos (condiciones climáticas: radiación solar, dirección y velocidad del viento, y temperatura) y del diseño específico (geometría, materiales, etc.) Mientras que los parámetros de diseño pueden ser elegidos, las condiciones externas son dadas por el lugar en que se implanta el edificio, y constantemente cambian, por eso es importante tener en cuenta su implicancia. Para simplificar el análisis las condiciones externas pueden ser evaluadas para el período caluroso y para el período frío. La envolvente debe ser diseñada para responder a estas condiciones con el objetivo de disminuir los requerimientos energéticos para acondicionamiento térmico.

Parámetros externos

El medio en el que se encuentra el edificio presenta variaciones constantes respecto a la velocidad del aire, humedad relativa, temperatura, radiación solar, calidad del aire, ruido, entre otros; todos estos son considerados factores básicos que afectan el desempeño de edificio y el confort interior de los usuarios, la radiación y el viento son los actores fundamentales en el desempeño térmico de las FVO (Ibáñez-Puy M. *et al.*, 2017).

Hay consenso en que la ventilación de la cavidad de aire es el resultado de una convección mixta, producida por el aumento de temperatura producido por la radiación por la acción del viento, siendo el último preponderante en los pisos superiores y el primero en los inferiores (Gratia & De Herde, 2004).

Radiación solar

Debido a la trayectoria del sol, variable en azimut y altura, el momento del año y la orientación de la fachada están directamente involucrados con los niveles de radiación que recibe el plano. Es importante tener en cuenta la influencia de la inclinación del sol en cada estación para determinar el máximo de radiación solar perpendicular a la pared.

El efecto de la flotabilidad del aire dentro de la cámara influye en el desempeño de la cavidad ventilada, cuando hay radiación solar —tanto en verano como en invierno—, se produce un aumento instantáneo de la temperatura del aire en la misma, como la zona superior de la cavidad está a mayor temperatura el efecto de flotabilidad aumenta, de esta forma se aumenta la disipación de calor (Patania F. *et al.*, 2010; Suárez M. *et al.*, 2012). Esto significa una disminución de la temperatura de la capa interior de la fachada y una disminución de la diferencia de temperaturas entre el ambiente exterior y el exterior, reduciéndose así las ganancias térmicas (Ciampi M. *et al.*, 2003).

Por otro lado, existen discrepancias respecto al desempeño de las FVO durante el período invernal; mientras que algunos autores concluyen que bajo radiación solar la FVO se convierte un elemento activo que contribuye a la acumulación de calor en la cavidad reduciendo las pérdidas térmicas (Aparicio-Fernández *et al.*, 2014; Giancola *et al.*, 2012), otros investigadores señalan que la FVO significa un aumento de las pérdidas de calor en comparación con las soluciones no ventiladas por el sombreado que ejerce sobre el cerramiento (Sanjuan C. *et al.*, 2011; Suárez M. *et al.*, 2012).

Viento y flujo de aire

A pesar de que el viento es también un aspecto fundamental en el movimiento de aire dentro de la cavidad, la mayoría de los estudios no lo consideran porque fueron desarrollados para condiciones de estado estacionario (Sanjuan *et al.*, 2011).

Sin embargo Marinosci *et al.*, (2014) demostraron que un incremento en la velocidad del viento sobre la fachada significa mayor rango de disipación de la cara exterior del sistema y mayor ventilación de la cavidad; esto produce una reducción en verano o un aumento en invierno de la transmisión de calor por conducción a través de la cavidad.

Por su parte Gagliano *et al.* (2016) concluyeron que la influencia de la velocidad del viento es más notoria cuando hay ausencia de radiación solar, durante la noche y para fachadas con orientación Norte —hemisferio Norte—, el efecto del viento es el factor dominante en la ventilación de la cámara, ya que debido a la ausencia de radiación no se produce ventilación por convección.

2.5.3 Impacto de la envolvente ventilada opaca en el desempeño energético

En España, la incorporación de una fachada ventilada opaca bien diseñada siempre significa ahorros energéticos respecto a una fachada convencional (Sanjuan C. *et al.*, 2011). El diseño de una fachada convencional muchas veces tiene carencias en cuanto a la aislación y se hace evidente la presencia de puentes térmicos, los cuales, generalmente desaparecen con la aislación continua de la fachada ventilada opaca.

En términos generales se puede decir que la FVO tiene un efecto muy positivo en las demandas energéticas de un edificio. Por lo tanto, es interesante en climas muy cálidos donde las demandas de enfriamiento son altas y según algunos estudios no sería tan beneficiosa en áreas donde son necesarias altas demandas para calefacción (Iribar-Solaberrieta *et al.*, 2015).

No se puede desconocer que una FVO tiene diferentes desempeños energéticos en invierno que en verano. La mayoría de los autores acuerdan en que las FVO funcionan como una estrategia pasiva de enfriamiento en verano especialmente en aquellas orientaciones que reciben mayor radiación directa (S, O, E) en el hemisferio norte. Es posible afirmar que las fachadas ventiladas alcanzan altos desempeños energéticos durante el período de verano, con una reducción de las ganancias de flujo de calor por encima del 40% comparado con la misma fachada, pero no ventilada (Ciampi M. *et al.*, 2003; Sanjuan *et al.*, 2011; Balocco C., 2002). Este desempeño energético es menos ventajoso, incluso negativo para bajos niveles de radiación solar —orientación norte o días de invierno— en el hemisferio norte (Patania F. *et al.*, 2010; Suárez M. *et al.*, 2012; Gagliano A. *et al.*, 2016).

De acuerdo a Naboni E. y Tarantino S. (2014) quienes analizaron los ahorros energéticos de las FVO en diferentes climas y para diferentes tipos de edificios — edificios de oficinas y residenciales—, encontraron, en términos generales, que la efectividad es mayor en edificios de oficinas con grandes ganancias internas que en usos residenciales.

De acuerdo a la literatura de referencia —contexto europeo principalmente— se puede establecer que el sistema de fachadas ventiladas opacas es muy efectivo para reducir las demandas energéticas para el acondicionamiento de los edificios, desde una perspectiva térmica, la cara externa funciona como una protección entre el flujo de calor que entra y sale del edificio en comparación con las fachadas no ventiladas, consecuentemente, su efectividad evita ganancias durante el verano y pérdidas leves en invierno por el uso de aislación térmica en la cámara de aire (Patania F. *et al.*, 2010; Ciampi M. *et al.*, 2003; Balocco C., 2002; Sanjuan C. *et al.*, 2011; Suárez M. *et al.*, 2012).

Los beneficios de las FVO son más notorios en climas con veranos largos y calurosos donde los requerimientos para enfriamiento son mayores. Las ventajas en verano están basadas en la reducción del flujo térmico, en primera instancia, debido al sombreado de la capa externa y luego, por el efecto de enfriamiento que genera la ventilación de la cámara de aire, reduciendo la brecha entre temperatura interior y temperatura exterior. Con respecto a los materiales, la mejor configuración es aquella en que la capa exterior tiene la menor absorción térmica (Suárez M. *et al.*, 2012).

El flujo de aire interior dentro de la cámara ayuda a disipar el calor, en casos de mucha radiación solar el efecto chimenea es el factor preponderante y la fachada de juntas cerradas es la opción que más se ajusta, ya que el flujo es homogéneo y efectivo, sin embargo, en sitios con menor radiación los mayores ahorros energéticos son alcanzados con fachadas de juntas abierta y una cavidad ancha. En este caso la acción del viento es la preponderante (Sanjuan C. *et al.*, 2011).

Para climas ventosos y fríos una FVO puede minimizar las pérdidas de calor por convección al conformar una barrera contra el viento. Durante el invierno se busca la acumulación de calor, por eso una envolvente con alta absorción y juntas cerradas es mejor —por ejemplo: piezas oscuras de cerámica—. Sin embargo, para evitar pérdidas de calor debido a los intercambios con las capas frías exteriores en las noches de invierno, se podrían usar materiales reflectivos para la cara exterior. Por otro lado, se ha observado que las pérdidas en invierno pueden ser reducidas si la cámara es cerrada creando una cámara de aire estanca (Ibáñez-Puy M. *et al.*, 2017).

2.6 FACTORES DE DISEÑO DE UNA FVO

Los diferentes componentes que conforman el sistema de FVO influyen en el desempeño energético total del conjunto, por lo que cada uno de los elementos debe ser analizado en profundidad, conociendo la función que atienden y su incidencia en la eficacia del sistema. El diseño y elección más adecuado de los componentes ha sido estudiado por diversos autores —sobre todo en el contexto europeo— permitiendo establecer determinadas pautas de diseño según el clima y la orientación de las FVO.

2.6.1 Piel exterior

Cuando la radiación solar alcanza la capa externa, esta es en parte absorbida y en parte reflejada, dependiendo de las características del material empleado, la radiación solar tiene una gran influencia en la temperatura del revestimiento. Teniendo en cuenta que la ventilación depende del calentamiento del aire en la cavidad, la influencia de la capa exterior es muy importante. Es importante tener en consideración la rugosidad relativa de la cámara y el coeficiente de radiación solar que depende del color de la cara exterior de la fachada, entre otras cosas, como las características más importantes a considerar. Es importante tener presente que la elección de materiales claros puede evitar la acumulación de calor en condiciones de verano (Ciampi *et al.*, 2003).

2.6.2 Diseño de las juntas

La disposición y dimensión de las juntas (o entradas o salidas de aire en casos de fachadas de junta cerrada) inciden en el desempeño de las FVO porque ejercen influencia en la presión del aire según el estudio de Marinosci *et al.* (2014). El flujo de aire a través de la cavidad depende del tipo de envolvente exterior, si son juntas abiertas o cerradas, en el caso de fachadas continuas el flujo ascendente es continuo, homogéneo y simétrico a lo alto de la fachada. Por otro lado, en una fachada con juntas abiertas las discontinuidades hacen el flujo mucho más complejo; hay mediciones que demuestran que el efecto de ventilación se ve reducido porque hay más aberturas por las que el aire puede entrar y salir de la cavidad (Sanjuan *et al.*, 2011).

Generalmente se ha concluido que las aberturas más pequeñas en la fachada son aconsejables en invierno para minimizar la pérdida de calor, mientras que las aberturas más grandes son preferibles en condiciones de verano para aumentar las tasas de ventilación y evitar el sobrecalentamiento (Suárez M. *et al.*, 2012).

2.6.3 Diseño de la cámara de aire

Con respecto al diseño de la cámara de aire hay muchos estudios sobre el ancho y la altura de la misma para las fachadas ventiladas; deben ser evaluadas en función de la cantidad de calor solar transferido a través de ella y de la temperatura resultante.

Las cámaras de aire demasiado estrechas pueden ser menos eficientes debido al efecto de acumulación que ocurre dentro de la cavidad (Ciampi *et al.*, 2003). Por otro lado, una cámara de aire con un ancho incrementado implica complejizar el proceso constructivo y en consecuencia aumentaría los costos, por lo tanto, se debe buscar el ancho óptimo de la cavidad donde se produzca una ventilación suficiente que no garantice acumulación dentro de la misma.

De acuerdo a estudios realizados, un aumento en la altura de la fachada significa un aumento en la velocidad del flujo de aire dentro de la cavidad, lo que permite un mejor desempeño energético. El aire se calienta rápido en este espacio debido a la gran distancia entre las aperturas inferiores y superiores, dando lugar a un mayor gradiente de temperatura a lo largo del alto de la fachada (Sanjuan C. *et al.*, 2011; Statzi *et al.*, 2014).

2.6.4 Capa Interior

En los puntos anteriores se ha hecho foco en la transferencia de calor por convección y por radiación; sin embargo, la conducción es un factor a considerar. La capa interior es generalmente el elemento que le confiere al muro su resistencia térmica; usualmente materializado con elementos masivos (ladrillos, hormigón) y cubierto con materiales aislantes.

Sin embargo, la industrialización de los procesos constructivos ha promovido un cambio de lo masivo realizado "*in-situ*" a elementos prefabricados de bajo peso. Independientemente de la opción elegida, es importante evaluar la implicancia de las transferencias de calor. Mientras los primeros ofrecen una gran inercia térmica los segundos ofrecen menor resistencia y en consecuencia una rápida reacción (Guillén *et al.*, 2014).

2.7 PRINCIPALES CONCLUSIONES

La revisión bibliográfica muestra que, en el contexto europeo fundamentalmente, las FVO pueden ser muy efectivas para reducir las demandas de refrigeración, con beneficios más notorios en climas con veranos largos y calurosos; también se ha demostrado la incidencia de la acción del viento sobre el sistema, el cual podría ser un factor relevante en el clima costero de Montevideo. La acción del viento implica mayor disipación de la cara exterior del sistema y mayor ventilación de la cavidad; esto produce una reducción en verano o un aumento en invierno de la transmisión de calor por conducción. Además, la influencia de la velocidad del viento es más notoria cuando hay ausencia de radiación solar, ya que pasa a ser el factor dominante en la ventilación de la cámara, debido a la ausencia de convección; en tanto un aumento en la altura de la fachada implica un aumento en la velocidad del flujo de aire dentro de la cavidad, lo que permite un mejor desempeño energético.

Según la mayoría de los estudios, las FVO como estrategia pasiva de enfriamiento en verano en las orientaciones que reciben los mayores niveles de radiación directa son muy efectivas. Los artículos consultados coinciden en que los mejores desempeños energéticos se dan en verano y para fachadas con orientación Sur en el Hemisferio Norte. Por otro lado, no hay consenso respecto al desempeño de las FVO durante el período invernal, puesto que algunos consideran que permitirían reducir las pérdidas térmicas cuando hay radiación solar suficiente, mientras que otros consideran que aumentan las pérdidas térmicas en comparación con las soluciones no ventiladas.

Para el clima de Montevideo no se han hecho estudios acerca de la efectividad del sistema de FVO ni de su conformación para las condiciones de invierno y de verano. En

el presente trabajo de investigación se tomará un prototipo de edificio situado en la ciudad de Montevideo sobre el que se realizará el análisis. Se realizará la simulación computacional del edificio tal cual se encuentra construido —sin FVO— para conocer su comportamiento térmico a lo largo del año en la ciudad de Montevideo (temperatura interior, temperatura de muros, carga térmica, entre otros). Luego, se realizará la simulación computacional del edificio suponiendo la hipótesis de que su envolvente fuera tradicional de mampostería y por último se simulará suponiendo que la envolvente actual pueda ser ventilada en vez de sellada como es actualmente. Para realizar las simulaciones térmicas se utilizará el “*software*” libre de simulación SIMEDIF V2.01

El cometido es analizar y comparar el edificio tal cual está ejecutado y el edificio con una supuesta fachada tradicional y el edificio ventilando su configuración de fachada actual conformando una FVO. Este análisis se realizará tanto para invierno como para verano, y buscará cuantificar el desempeño energético de la FVO respecto a los otros dos casos en el clima de Montevideo.

CAPÍTULO III: METODOLOGÍA DE INVESTIGACIÓN

A continuación, se presenta la metodología desarrollada, la cual responde a una investigación de tipo cuantitativa, desarrollada de forma experimental mediante simulación energética con el programa SIMEDIF V2.0.

La investigación se estructura en 5 grandes etapas: (I) Selección y caracterización del caso de estudio; (II) Caracterización del clima de Montevideo y estrategias bioclimáticas (III) Simulación del Caso Base (IV) Simulación caso “Fachada Convencional” y (V) Simulación del caso base con FVO “Caso Modificado”.

Para estudiar el efecto de las FVO en el clima de Montevideo se analizará en un edificio de oficinas mediante simulación computacional el efecto de dichas fachadas sobre la demanda energética destinada a calefacción y refrigeración.

Debido a que la incorporación de las FVO modificará la envolvente del edificio, se debe realizar previamente un análisis de las condiciones climáticas que afectan el comportamiento térmico del edificio, de forma de potenciar aquellas que son beneficiosas para el confort y proponer estrategias basadas en el análisis bioclimático. Para ello, se realizará en primer lugar un análisis del clima de la localidad, a continuación, se simulará térmicamente el edificio con su diseño actual, que se denominará “Caso Base”, luego se simulará con la hipótesis de que la fachada fuese convencional de mampostería “Fachada Convencional” y por último el diseño que incorpora ventilación en la fachada del caso base, transformándola en una FVO, que se denominará “Caso Modificado”. Para cada caso, se calculará la carga térmica de calefacción y refrigeración, de forma de poder compararlos y determinar el impacto de las FVO en los períodos analizados. El análisis de los resultados obtenidos permitirá conocer la incidencia en la demanda energética al reconvertir la fachada existente en una FVO en el clima de Montevideo respecto al caso base y respecto al caso de fachada convencional.

A continuación, se presenta la metodología utilizada para hacer un análisis bioclimático previo, realizado a partir de datos climáticos desarrollados por el Laboratorio de Energía Solar de la UdelaR que sirve como insumo para conocer en profundidad las características bioclimáticas de Montevideo. Luego se describe brevemente la herramienta de simulación térmica SIMEDIF, sus principales hipótesis de trabajo y metodología de cálculo, y finalmente se presenta el modelo termofísico con que se describe el edificio caso de estudio desde el punto de vista térmico.

3.1 SELECCIÓN DEL CASO DE ESTUDIO

La elección del caso de estudio se debe a que es un edificio de oficinas, y en nuestro país, el uso de fachadas ventiladas está principalmente asociado a este tipo de programas, además de que el edificio, por sus características, tiene todas las fachadas expuestas con condiciones similares en cada una de ellas.

3.2 CARACTERIZACIÓN DEL CLIMA DE MONTEVIDEO

Para analizar el clima del lugar se utilizó el “software” “*Climate Consultant 6.0*”; el cual permite la visualización y análisis de los parámetros climáticos correspondientes a la localidad de estudio. Para ello se utilizó el archivo (en formato EPW) del Año

Meteorológico Típico³ (AMT) de Montevideo obtenido de la Dirección Nacional de Energía (Laboratorio de Energía Solar -UdelaR-, 2021), obteniendo el resumen promedio mensual de temperatura, humedad relativa, radiación solar sobre superficie horizontal y velocidad y dirección de viento para Montevideo (34.83S, 56.01W, 33m s.n.m.). A su vez, a través del mismo “software” se obtuvo la carta bioclimática para Montevideo, utilizando como modelo de confort: “California Energy Code Comfort Model, 2013”, el cual considera un rango de temperaturas de confort entre 20°C y 23,9°C (California Energy Commission, 2020). A partir de ella se analizaron las estrategias bioclimáticas apropiadas al clima en estudio.

El análisis de los parámetros climáticos se complementó con los datos de radiación solar por orientación obtenidos del “software” Geosol. Adicionalmente se analizó la relación de la velocidad del viento y dirección del viento, y la velocidad del viento y la temperatura de bulbo seco, mediante los gráficos que se obtiene del “software” SIMEDIF, el cuál determina dichas variables para un día típico por cada uno de los doce meses del año, utilizando el mismo archivo climático mencionado.

3.3 DESCRIPCIÓN DEL “SOFTWARE” DE SIMULACIÓN TÉRMICA

Para realizar las simulaciones térmicas se utilizará el “software” libre de simulación SIMEDIF V2.04, que permite analizar el comportamiento térmico de edificios multiambientes frente a diferentes condiciones climáticas, detectar problemas de falta de confort (sobrecalentamiento o bajas temperaturas), evaluar las distintas alternativas constructivas durante la etapa de diseño, como por ejemplo variaciones en la geometría del mismo, orientación, ubicación y tamaño de áreas vidriadas, estructura y conformación de la envolvente, materiales y sistemas de acondicionamiento pasivos e híbridos a utilizar, etc.

SIMEDIF (Flores Larsen & Lesino, 2001) es un “software” de cálculo de descarga libre que permite estudiar el comportamiento térmico transitorio de edificios multiambientes desarrollado en 1984 en el INENCO⁵. Ha sido actualizado y modernizado con una versión con núcleo de cálculo en el moderno lenguaje científico Python, con lo que se constituye en una herramienta muy utilizada para diseño e investigación en Argentina y en el mundo y enseñado en doctorados y maestrías de Argentina y del exterior. Ha sido reconocido en la literatura internacional como uno de los “software” de relevancia para simulación térmica de edificios, junto a “EnergyPlus”, TAS, eQUEST y DOE-2, entre otros (De Boeck *et al.*, 2015, Mata *et al.*, 2019). La ventaja de este “software” frente a otros de mayor envergadura es su gratuidad, la sencillez del ingreso de datos, sus bases de datos actualizadas con sistemas constructivos, datos climáticos y materiales específicos de Sudamérica y su interfase en español con tutoriales en YouTube (INENCO - LEB, 2021), entre otras cosas.

SIMEDIF es una herramienta de diseño para calcular la temperatura horaria del aire dentro de los espacios de un edificio, la temperatura superficial horaria de las paredes y la energía auxiliar de calentamiento/enfriamiento que se necesita para mantener los espacios a una temperatura determinada por un termostato que puede definirse hora

³ AMT es una serie de datos anual que se considera representativa de la situación meteorológica más típica de un sitio para un periodo de tiempo determinado, en general, de largo plazo. Es una herramienta de alta utilidad para evaluar y modelar el comportamiento térmico de edificios y construcciones, y el rendimiento de dispositivos de conversión de energía solar en energía útil para propósitos humanos. (Dirección Nacional de Energía, 2021)

⁴ Disponible en <http://170.210.201.130/index.php/es/software/simedif-2-0-calculo-termico-de-edificios/>

⁵ Instituto de Investigaciones en Energía no Convencional situado en el campus de la Universidad Nacional de Salta –Argentina–.

por hora para el año completo. También cuenta con un módulo para calcular condiciones de confort dentro de los espacios (método del Voto Medio Predicho y Porcentaje de Personas en Disconfort, PMV y PPD respectivamente, ASHRAE55). El programa permite analizar el comportamiento del edificio en diferentes condiciones climáticas, detectar problemas de confort térmico (sobrecalentamiento o bajas temperaturas), evaluar posibles alternativas en el diseño de un edificio, tales como variaciones en su geometría, orientación, ubicación y tamaño del edificio, la estructura y los materiales de la envolvente, la adición de sistemas pasivos e híbridos como enfriadores tierra-aire, enfriadores evaporativos, doble fachadas verdes, etc. En los edificios existentes, el “software” puede utilizarse para validar el modelo de construcción a través de datos medidos o para cuantificar la eficacia de las posibles alternativas de rediseño en el caso de trabajar en rehabilitación energética.

La figura 3 muestra un esquema del ingreso de datos en el “software”. El primer paso es definir la localidad en que está emplazado el edificio, a través de un archivo climático en formato EPW (“EnergyPlus Weather Format”), o bien mediante un archivo con datos medidos. El siguiente paso consiste en definir las zonas térmicas. Una zona térmica es un volumen de aire que se puede considerar a una temperatura uniforme. Este volumen puede ser un ambiente del edificio, una parte de un ambiente o un grupo de ambientes. El “software” calculará la evolución en el tiempo de la temperatura de cada zona térmica, haciendo un balance energético sobre el volumen de aire. La zona puede ser forzada a tener una temperatura fijada por el usuario (en este caso, el usuario deberá ingresar los valores de temperatura o ‘termostato’, hora por hora, a las que desea mantener el espacio). También se pueden definir hora por hora las ganancias internas y las renovaciones de aire de la zona. A continuación, se deben ingresar los elementos de conexión entre las zonas: paredes masivas, tabiques livianos, vidriados, aberturas, etc.

Para cada uno habrá que definir sus características geométricas y térmicas (conductividad, densidad, calor específico, resistencia térmica, etc.). El paso siguiente consiste en adicionar los sistemas pasivos, si los hubiere (muros Trombe, dobles fachadas verdes, intercambiadores tierra-aire, etc.). Y finalmente, se realiza la simulación. Los resultados se pueden analizar de manera gráfica, a través de la interfase DView, o abrir los archivos de resultados en el programa de preferencia (Excel u otro) y realizar el análisis de forma manual. Una descripción detallada del modelo térmico de cada elemento, del método de cálculo por balance energético y de las características generales del ingreso de datos pueden consultarse en el manual del “software”.



Fig. 3. Esquema de las etapas de entrada de datos en SIMEDIF. Fuente: Manual de SIMEDIF.

En el siguiente apartado se describe el modelo térmico del edificio en estudio, su zonificación y las características térmicas de los materiales que se ingresaron en SIMEDIF.

3.4 ZONIFICACIÓN TÉRMICA DEL EDIFICIO

Para poder iniciar la simulación en SIMEDIF es necesaria la definición de los locales o zonas térmicas en el interior del edificio a estudiar para que el programa pueda evaluar la evolución de la temperatura en el tiempo, la cual se calcula a partir de un balance energético sobre el volumen de aire correspondiente. Las zonas térmicas se consideran una simplificación de la realidad y pueden agrupar varios espacios que tienen características térmicas similares.

Para el análisis del edificio se definen seis zonas térmicas, como muestra la Fig. 4. La primera es el núcleo central —Zona Térmica NC— que incluye caja de escaleras, ascensores, servicios higiénicos y circulaciones perimetrales a este núcleo; esta zona se considera como un gran prisma central que abarca todos los pisos del edificio y que será descrita con un nodo de temperatura en contacto con las otras zonas. Se definen además cinco zonas térmicas adicionales correspondientes a las oficinas y locales que rodean al núcleo central en cada uno de los niveles respectivamente.

En la tabla 1 se indica, para cada zona térmica, el área de pisos, su volumen interior y la suma de las áreas vidriadas de sus cuatro fachadas en cada una de las orientaciones, discriminadas de acuerdo a si los vidriados son transparentes y opacificados. Se observa, por ejemplo, que, si bien en la zona térmica de Planta Baja el área vidriada es la mayor de todas, en realidad la mayoría está distribuida en la orientación sur, que es la que en invierno recibe la menor cantidad de radiación solar.

Por otra parte, en los pisos 1 a 3 la distribución de las áreas vidriadas es bastante similar respecto a las cuatro orientaciones, por lo que podría esperarse un comportamiento similar en dichos pisos. Finalmente, en el piso 4 y último, el área vidriada es menor, lo cual, sumado a un contacto mayor con el exterior a través del techo, permite inferir que puede ser un espacio con mayor requerimiento de calefacción. Este análisis preliminar será confirmado luego de realizar las simulaciones computacionales correspondientes.



Fig. 4. Distribución de zonas térmicas del edificio
Fuente: elaboración propia en base a recaudos proporcionados por UAM - CA

Zona térmica	Área de suelo (m ²)	Volumen (m ³)	Área vidriada transparente (m ²) por fachada				Área vidriada opacificada (m ²) por fachada			
			N	S	E	O	N	S	E	O
ZT NC - Núcleo Central	118	2596	8.8	0	0	0	0	0	0	0
ZT 0 - Oficinas PB	351	1369	0	88.7	21.9	21.9	0	0	0	0
ZT1 - Oficinas 1 piso	329	1306	21.2	21.6	23.5	22.3	11.2	9.5	11.3	10.5
ZT2 - Oficinas 2 piso	329	1306	25.6	21.6	25.6	25.6	11.2	9.5	11.2	11.2
ZT3 - Oficinas 3 piso	329	1306	25.6	21.6	25.6	25.6	11.2	9.5	11.2	11.2
ZT4 - Oficinas 4 piso	176	699	19.4	21.6	17.7	4.0	0	9.5	7.7	1.7

Tabla 1. Caracterización de las zonas térmicas
Fuente: elaboración propia.

3.5 GANANCIAS INTERNAS

Las ganancias internas son consideradas según la zona térmica y uso de la misma. En este apartado se definen los equipos existentes que entregan o extraen calor, la cantidad de personas y períodos de uso y de ocupación.

Los datos de cantidad de personas que permanecen por planta, las ganancias internas conformadas por los aportes de iluminación y otros equipos como las correspondientes a aparatos eléctricos fueron obtenidas del “Balance Térmico Ashrae por funciones de transferencia” realizado por el estudio Barbot Rocha para el edificio del CA de la UAM que se estudia en esta tesis.

El edificio del CA tiene un horario de funcionamiento de 07:00 a 20:00h de lunes a viernes; para este rango horario se considera un coeficiente 1 para ganancias por ocupación, por iluminación y para otras cargas, en las horas por fuera de este rango se considera un coeficiente 0 para la ocupación y para otras cargas; en cuanto a las ganancias por iluminación por fuera del rango horario de ocupación se considera un coeficiente de 0.1 entre las 22:00 y las 05:59h, un coeficiente de 0.5 entre las 06:00 y las 06:59h y entre las 20:00 y las 21:59h. Las ganancias internas de calor se expresan en la tabla 2.

Para la zona térmica correspondiente al Núcleo Central no se consideran significativas las ganancias internas y por lo tanto se desprecian.

En la zona térmica 0 correspondiente a las oficinas de planta baja el balance térmico estima 119 ocupantes y para cada uno de ellos estima como aporte 60W. Las ganancias por personas corresponden a 7140 W, por iluminación 6251 W y otras ganancias internas 2000 W dando un total de 15391 W.

En la zona térmica 1 y 2 correspondiente a las oficinas de primer y segundo piso respectivamente se estiman 57 ocupantes. Las ganancias por personas corresponden a 3420 W, por iluminación 6251 W y otras ganancias internas 2000 W dando un total de 11671 W.

En la zona térmica 3 correspondiente a las oficinas de tercer piso se estiman 59 ocupantes. Las ganancias por personas corresponden a 3540 W, por iluminación 6251 W y otras ganancias internas 2000 W dando un total de 11791 W.

En la zona térmica 4 correspondiente a las oficinas de cuarto piso se estiman 33 ocupantes. Las ganancias por personas corresponden a 1980 W, por iluminación 3750 W y otras ganancias internas 2000 W dando un total de 7730 W.

Zona térmica	Ganancias internas de calor (W)			
	Ocupación	Iluminación	Equipos	TOTAL
ZT NC - Núcleo Central	-	-	-	-
ZT 0 - Oficinas PB	7140	6251	2000	15391
ZT1 - Oficinas 1 piso	3420	6251	2000	11671
ZT2 - Oficinas 2 piso	3420	6251	2000	11671
ZT3 - Oficinas 3 piso	3540	6251	2000	11791
ZT4 - Oficinas 4 piso	1980	3750	2000	7730

Tabla 2. Totales de ganancias internas de calor por zona térmica
Fuente: elaboración propia.

3.6 VENTILACIÓN E INFILTRACIONES

Para la simulación del edificio se deben tener en cuenta los aportes o pérdidas de calor debido al ingreso de aire proveniente del exterior. Este ingreso puede ser voluntario —

ventilación— o involuntario —infiltraciones a través de la envolvente—. Se calculan por separado para cada caso y luego se suman, para obtener las renovaciones totales de cada zona.

Renovaciones de aire proveniente de infiltraciones

En el caso de las infiltraciones por carpintería, se consideran principalmente las aportadas por las aberturas, se las puede calcular utilizando la expresión matemática (1) desarrollada en el Anexo B de la norma IRAM 11604. Los valores del caudal de infiltraciones de la carpintería (q_i) son provistas por el fabricante. Se obtienen por mediciones de laboratorio, según el procedimiento establecido en la norma IRAM 11523. Para una zona térmica de volumen V_{zona} (m^3), con una carpintería de “ l_i ” metros lineales de junta, en una localidad con velocidad media del viento v_i (m/s) y un coeficiente de corrección “ c_i ” que depende de la altura del edificio y la rugosidad del terreno, se pueden calcular las renovaciones debidas a infiltraciones como la suma para todas las aberturas de la zona térmica a través de la siguiente expresión (IRAM, 2001):

$$n_{infiltr} = \frac{\sum_i 0.0464 l_i q_i [0.516 (c_i v_i)^2]^{0.67}}{V_{zona}} \quad (1)$$

en donde:

$n_{infiltr}$	número de renovaciones por hora de la zona térmica (1/h)
l_i	longitud de las juntas de contacto de la carpintería (m)
q_i	caudal de infiltración de aire por unidad de longitud de junta (m^2/h)
c_i	coeficiente de corrección de la velocidad media del viento
v_i	velocidad de viento en la localidad considerada (m/s)
V_{zona}	volumen de la zona térmica

En cuanto al cálculo de renovaciones de aire por infiltraciones del edificio en estudio, se toma como coeficiente de corrección de la velocidad media del viento un valor de 1.8 según la tabla B.1 de la norma IRAM 11604 por estar el edificio a 33 m snm y emplazado en un área suburbana. Para los vidriados fijos se toma un valor $q_i=15m^3/(h.m)$ y para las aberturas móviles se toma un valor $q_i=30m^3/(h.m)$ (Volantino *et al.* 2012).

Para el cálculo se toma una velocidad de viento de 5m/s como velocidad promedio del viento en los meses de enero y julio de acuerdo a los datos del año meteorológico típico (Laboratorio de Energía Solar -UdelaR-, 2021).

No se considera un cálculo diferenciado para invierno y verano ya que las aberturas de los espacios no son móviles y el edificio no contempla ventilación por apertura de ventanas en verano. Los resultados del cálculo se muestran en la tabla 3.

CALCULO DE RENOVACIONES DE AIRE POR INFILTRACIONES						
	li (m)	qi = m ³ /(h.m)	ci	vi (m/s)	V zona (m ³)	n° renovaciones (1/h)
ZTNC	17.60	30.00	1.80	5.00	2596	0.12
	0.00	15.00	1.80	5.00	2596	0.00
						0.12
ZT 0	33.60	30.00	1.80	5.00	1369	0.42
	121.57	15.00	1.80	5.00	1369	0.75
						1.17
ZT 1	0.00	30.00	1.80	5.00	1306	0.00
	276.40	15.00	1.80	5.00	1306	1.80
						1.80
ZT 2	0.00	30.00	1.80	5.00	1306	0.00
	258.60	15.00	1.80	5.00	1306	1.68
						1.68
ZT 3	0.00	30.00	1.80	5.00	1306	0.00
	258.60	15.00	1.80	5.00	1306	1.68
						1.68
ZT 4	25.00	30.00	1.80	5.00	699	0.61
	112.80	15.00	1.80	5.00	699	1.37
						1.98

Tabla 3. Cálculo de renovaciones de aire por infiltraciones según norma IRAM 11604

Fuente: elaboración propia.

Renovaciones de aire por ventilación voluntaria

Para el cálculo de las renovaciones de aire voluntarias —tabla 4— se toma del balance térmico el valor 20m³/(h-persona) como valor de norma por salubridad para todas las zonas térmicas excepto para la zona térmica del núcleo central ya que en dicha zona no hay permanencia de personas. Para calcular las renovaciones voluntarias de este espacio se toma un valor de 4 renovaciones por hora (correspondiente a condiciones de salubridad en baños y cocinas), pero para no sobreestimar las renovaciones de aire en toda la zona se calcula el porcentaje del área total de la zona correspondiente a dichos espacios —28%—y se multiplican las 4 1/h por el porcentaje de área de servicios con el fin de repartir las renovaciones de baños y cocinas en toda la zona térmica.

RENOVACIONES DE AIRE VOLUNTARIAS				
Zona térmica	Vent. Nec. (m ³ /h.pers)	N° personas	Volumen ZT (m ³)	n° renovaciones (1/h)
ZTNC	–	–	2596	1.15
ZT0	20	119	1369	1.74
ZT1	20	57	1306	0.87
ZT2	20	57	1306	0.87
ZT3	20	59	1306	0.90
ZT4	20	33	699	0.94

Tabla 4. Cálculo de renovaciones de aire voluntarias para cada zona del edificio.

Fuente: elaboración propia.

Las renovaciones de aire totales por cada zona térmica corresponden a las renovaciones por infiltraciones sumadas a las renovaciones de aire voluntarias. Con estos valores totales expresados en la tabla 5 se procederá al cálculo teniendo en cuenta los horarios de funcionamiento del edificio, ya que cuando este esté sin ocupantes las únicas renovaciones de aire que se contemplarán son las de infiltraciones.

Zona térmica	Renovaciones de aire totales (1/h)		
	Renov. Infiltraciones	Renov. Volunarias	Total (1/h)
ZT NC - Núcleo Central	0.12	1.15	1.27
ZT 0 - Oficinas PB	1.17	1.74	2.91
ZT1 - Oficinas 1 piso	1.80	0.87	2.67
ZT2 - Oficinas 2 piso	1.68	0.87	2.55
ZT3 - Oficinas 3 piso	1.68	0.90	2.58
ZT4 - Oficinas 4 piso	1.98	0.94	2.92

Tabla 5. Cálculo de renovaciones de totales para cada zona del edificio.

Fuente: elaboración propia.

3.7 CONEXIÓN DE LAS ZONAS TÉRMICAS CON LOS ELEMENTOS

Cada zona térmica se puede conectar a otra zona térmica o al ambiente exterior. Este vínculo se realiza a través de elementos predefinidos en SIMEDIF. Los elementos de nexo pueden ser sólidos —paredes masivas, tabiques, vidriados, etc.— o conexiones aire-aire —aberturas y ventanillas—. Cada elemento de conexión tiene propiedades y características que deben definirse.

3.7.1 Paredes masivas y capas de paredes

Las paredes masivas son elementos de construcción opacos, de caras paralelas y con masa térmica, que conectan dos zonas térmicas. Están relacionadas con el almacenamiento térmico y permiten el cálculo de los efectos de acumulación transitorios.

Los elementos pesados de la construcción se consideran paredes masivas —el pavimento, los entrepisos, muros de contención, de mampostería y la losa de cubierta— una pared masiva puede tener una o varias capas sucesivas de diferentes materiales, para esto se deben definir el número de capas y las propiedades de los materiales. Para cada pared masiva se deben definir las siguientes propiedades: superficie total del elemento, pendiente (0° si corresponde al plano horizontal o 90° si corresponde al plano vertical), azimut para definir su orientación (al norte 180° , al este 90° , al sur 0° y al oeste 270°), áreas asoleadas exteriores e interiores (es decir, el área de la pared que recibe radiación solar, ya sea por estar expuesta al exterior o por recibir la radiación que ingresa a través de los elementos vidriados), la absorptancia solar (relacionada con el color de la superficie), y el valor del coeficiente global de convección/radiación.

La absorptancia solar, con valores entre 0 y 1, corresponde a la absorptividad de la superficie en el espectro solar, el cual está relacionado con el tipo de terminación y color de la superficie. Para el ingreso de datos se tomaron los siguientes valores predefinidos para cada color en el “software” SIMEDIF:

Porcelanato gris: 0.50

Cielorrasos blancos: 0.15

Muros interiores color claro: 0.25

Cara exterior de losas —carpeta arena y portland—: 0.50

Tierra: 0.88

Exterior —gris claro—: 0.40

Deck —símil madera “*Wood Plastic Composite*”—: 0.75

El coeficiente global de transferencia de calor convectivo/radiativo h ($W/m^2.K$) es el coeficiente de transferencia de calor que describe la convección y la radiación. Una forma usual de estimarla es mediante las expresiones (2) y (3) (Duffie & Beckman, 2006).

$$h = 5.7 + 3.8 \times V \quad \text{para superficies asoleadas} \quad (2)$$

$$h = 2.8 + 3.0 \times V \quad \text{para superficies no asoleadas} \quad (3)$$

Donde V es la velocidad promedio del viento en m/s .

Debido a que en el interior del edificio la velocidad del aire es baja, usualmente se utiliza un valor de $6W/m^2.K$ para superficies no asoleadas y $8W/m^2.K$ para superficies asoleadas ya que en estas últimas la velocidad del aire es ligeramente mayor. Estos valores son los sugeridos en el Manual de SIMEDIF.

Se definen 38 elementos de conexión masivos, que corresponden a los muros que conectan diferentes zonas térmicas, a los entrepisos, al cerramiento inferior de planta baja —muro de contención— y a las losas de la cubierta con las propiedades detalladas en la tabla 6.

CERRAMIENTOS MASIVOS												
Referencia	Cerramiento Masivo	Área (m ²)	Pend. (°)	Azimut (°)	Lado 1 -interior-				Lado 2 -exterior-			
					Zona	Absort. solar	Coef. convectivo-radiativo (W/m ² .K)	Á. asoleada (m ²)	Zona	Absort. solar	Coef. convectivo-radiativo (W/m ² .K)	Á. asoleada (m ²)
ZTNC pavimento planta baja	M1	118.00	0	-	ZTNC	0.50	8.00	8.80	Exterior	0.88	0.001	0.00
ZTNC cubierta -azotea-	M2	118.00	0	-	ZTNC	0.15	6.00	0.00	Exterior	0.50	24.700	118.00
ZTNC Muro norte, salida azotea	M3	25.51	90	180	ZTNC	0.25	6.00	0.00	Exterior	0.40	24.700	17.86
ZTNC Muro oeste, salida a azotea	M4	16.90	90	-90	ZTNC	0.25	6.00	0.00	Exterior	0.40	24.700	15.21
ZTNC Muro caja de ascensores hacia ZT0	M5	23.00	90	0	ZTNC	0.25	6.00	0.00	ZT0	0.25	6.000	0.00
ZTNC Muro caja de ascensores hacia ZT1	M6	23.00	90	0	ZTNC	0.25	6.00	0.00	ZT1	0.25	6.000	0.00
ZTNC Muro caja de ascensores hacia ZT2	M7	23.00	90	0	ZTNC	0.25	6.00	0.00	ZT2	0.25	6.000	0.00
ZTNC Muro caja de ascensores hacia ZT3	M8	23.00	90	0	ZTNC	0.25	6.00	0.00	ZT3	0.25	6.000	0.00
ZTNC Muro caja de ascensores hacia ZT3	M9	23.00	90	0	ZTNC	0.25	6.00	0.00	ZT4	0.25	6.000	0.00
ZTNC muro en planta baja hacia ZT0	M10	19.50	90	-90	ZTNC	0.25	6.00	0.00	ZT0	0.25	6.000	0.00
ZT0 pavimento hacia cuadrante Norte	M11	87.75	0	-	ZT0	0.50	8.00	0.00	Exterior	0.88	0.001	0.00
ZT0 pavimento hacia cuadrante Sur	M12	87.75	0	-	ZT0	0.50	8.00	88.70	Exterior	0.88	0.001	0.00
ZT0 pavimento hacia cuadrante Este	M13	87.75	0	-	ZT0	0.50	8.00	21.90	Exterior	0.88	0.001	0.00
ZT0 pavimento hacia cuadrante Oeste	M14	87.75	0	-	ZT0	0.50	8.00	21.90	Exterior	0.88	0.001	0.00
ZT0 muro de contención Norte	M15	85.80	90	180	ZT0	0.25	6.00	0.00	Exterior	0.88	0.001	0.00
ZT0 muro de contención Este	M16	63.10	90	90	ZT0	0.25	6.00	0.00	Exterior	0.88	0.001	0.00
ZT0 muro de contención Oeste	M17	63.10	90	-90	ZT0	0.25	6.00	0.00	Exterior	0.88	0.001	0.00
ZT1 pavimento hacia cuadrante Norte	M18	82.25	0	-	ZT1	0.50	8.00	21.20	ZT0	0.15	6.000	0.00
ZT1 pavimento hacia cuadrante Sur	M19	82.25	0	-	ZT1	0.50	8.00	21.60	ZT0	0.15	6.000	0.00
ZT1 pavimento hacia cuadrante Este	M20	82.25	0	-	ZT1	0.50	8.00	23.50	ZT0	0.15	6.000	0.00
ZT1 pavimento hacia cuadrante Oeste	M21	82.25	0	-	ZT1	0.50	8.00	22.30	ZT0	0.15	6.000	0.00
ZT1 muro de contención Norte	M22	23.60	90	180	ZT1	0.25	6.00	0.00	Exterior	0.88	0.001	0.00
ZT1 muro de contención Este	M23	9.10	90	90	ZT1	0.25	6.00	0.00	Exterior	0.88	0.001	0.00
ZT1 muro de contención Oeste	M24	14.50	90	-90	ZT1	0.25	6.00	0.00	Exterior	0.88	0.001	0.00
ZT2 pavimento hacia cuadrante Norte	M25	82.25	0	-	ZT2	0.50	8.00	25.60	ZT1	0.15	6.000	0.00
ZT2 pavimento hacia cuadrante Sur	M26	82.25	0	-	ZT2	0.50	8.00	21.60	ZT1	0.15	6.000	0.00
ZT2 pavimento hacia cuadrante Este	M27	82.25	0	-	ZT2	0.50	8.00	25.60	ZT1	0.15	6.000	0.00
ZT2 pavimento hacia cuadrante Oeste	M28	82.25	0	-	ZT2	0.50	8.00	25.60	ZT1	0.15	6.000	0.00
ZT3 pavimento hacia cuadrante Norte	M29	82.25	0	-	ZT3	0.50	8.00	25.60	ZT2	0.15	6.000	0.00
ZT3 pavimento hacia cuadrante Sur	M30	82.25	0	-	ZT3	0.50	8.00	21.60	ZT2	0.15	6.000	0.00
ZT3 pavimento hacia cuadrante Este	M31	82.25	0	-	ZT3	0.50	8.00	25.60	ZT2	0.15	6.000	0.00
ZT3 pavimento hacia cuadrante Oeste	M32	82.25	0	-	ZT3	0.50	8.00	25.60	ZT2	0.15	6.000	0.00
ZT3 cubierta transitable con Deck	M33	150.00	0	-	ZT3	0.15	6.00	0.00	Exterior	0.75	24.700	150.00
ZT4 pavimento hacia cuadrante Norte	M34	44.00	0	-	ZT4	0.50	8.00	19.40	ZT3	0.15	6.000	0.00
ZT4 pavimento hacia cuadrante Sur	M35	44.00	0	-	ZT4	0.50	8.00	21.60	ZT3	0.15	6.000	0.00
ZT4 pavimento hacia cuadrante Este	M36	44.00	0	-	ZT4	0.50	8.00	17.70	ZT3	0.15	6.000	0.00
ZT4 pavimento hacia cuadrante Oeste	M37	44.00	0	-	ZT4	0.50	8.00	4.00	ZT3	0.15	6.000	0.00
ZT4 cubierta -azotea-	M38	176.00	0	-	ZT4	0.15	6.00	0.00	Exterior	0.50	24.700	176.00

Tabla 6. Propiedades de los cerramientos masivos

Fuente: elaboración propia.

Además de las propiedades definidas en la tabla 6 para los cerramientos masivos se deben definir las propiedades de las capas que conforman los diferentes tipos de cerramientos masivos. Se contabilizaron siete tipos diferentes de cerramientos masivos que se detallan en la tabla 7.

En esta tabla se indica el número de capas que conforma cada cerramiento, y para cada una de las capas se especifica si el elemento es masivo, la conductividad térmica k , la densidad ρ —para capas con masa—, el calor específico c_p , el espesor de la capa y el número de puntos a utilizar en la discretización de la capa. Normalmente se utiliza un punto cada 5 cm —en revoques de menor espesor se utiliza un 1 punto— y en el caso de capas muy gruesas —como el terreno que usualmente es 1m o más— se utiliza una menor cantidad de puntos.

Los valores de las propiedades térmicas de las capas —conductividad térmica, densidad y calor específico a presión constante— fueron obtenidos de la lista de materiales precargada en el “software” SIMEDIF y que corresponden a los materiales definidos en la norma IRAM 11601.

CAPAS DE CERRAMIENTOS MASIVOS						
Tipo	Propiedades					
Muro contención: Terreno +HA + CA+ Placa yeso	Capa	1	2	3	4	
	¿masiva?	Si	Si	No	Si	
	k (W/m.K)	0.87	1.63	0.026	0.31	
	ρ (kg/m ³)	2000	2400	1.05	600	
	C _p (J/kg.K)	840.0	785	1007	1080	
	Espesor (m)	2	0.25	0.07	0.012	
	Número de ptos.	10	5	2	1	
Entrepisos: Losa HA+ Contrapiso + Cerámico	Capa	1	2	3		
	¿masiva?	Si	Si	Si		
	k (W/m.K)	1.63	2	0.37		
	ρ (kg/m ³)	2400	1950	1200		
	C _p (J/kg.K)	785	1.045	880		
	Espesor (m)	0.2	0.1	0.005		
	Número de ptos.	4	2	1		
Pantalla HA revocada por un lado	Capa	1	2			
	¿masiva?	Si	Si			
	k (W/m.K)	1.63	0.89			
	ρ (kg/m ³)	2400	1900			
	C _p (J/kg.K)	785	800.0			
	Espesor (m)	0.1	0.015			
	Número de ptos.	2	1			
Revoque+ticholo+CA + aislación+CA+Panel GRC	Capa	1	2	3	4	
	¿masiva?	Si	No	Si	Si	
	k (W/m.K)	0.14	0.026	1.33	0.89	
	ρ (kg/m ³)	400	—	2005	1900	
	C _p (J/kg.K)	840	—	919	800	
	Espesor (m)	0.01	0.19	0.12	0.015	
	Número de ptos.	1	—	2	1	
Losa de HA relleno+asilación+HA	Capa	1	2	3		
	¿masiva?	Si	No	Si		
	k (W/m.K)	2	0.033	1.63		
	ρ (kg/m ³)	1950	25	2400		
	C _p (J/kg.K)	1045	1420	785		
	Espesor (m)	0.2	0.02	0.2		
	Número de ptos.	4	1	4		
Azotea transitable (Deck WPC+CA+relleno+ aislación+HA)	Capa	1	2	3	4	5
	¿masiva?	Si	No	Si	No	Si
	k (W/m.K)	0.24	0.026	2	0.033	1.63
	ρ (kg/m ³)	650	1.05	1950	25	2400
	C _p (J/kg.K)	2383.45	1007	1.045	1420	785
	Espesor (m)	0.025	0.2	0.2	0.02	0.2
	Número de ptos.	1	4	4	1	4
Piso (terreno+HA+Contrapi so+Cerámico)	Capa	1	2	3	4	
	¿masiva?	Si	Si	Si	Si	
	k (W/m.K)	0.87	1.63	2	0.37	
	ρ (kg/m ³)	2000	2400	1950	1200	
	C _p (J/kg.K)	840.0	785	1045	880	
	Espesor (m)	2	0.1	0.1	0.01	
	Número de ptos.	10	2	2	1	

Tabla 7. Propiedades de las capas que conforman los cerramientos masivos

Fuente: elaboración propia.

3.7.2. Tabiques livianos

Son elementos de construcción opacos con caras paralelas y masa relativamente pequeña —tabiques de yeso o madera— que no acumulan calor significativamente, es decir, son materiales con poca masa térmica. Para estos elementos de conexión se definirán las siguientes propiedades: superficie total, pendiente, azimut, área asoleada, absorptancia solar, coeficiente convectivo-radiativo y conductancia térmica (inversa de resistencia térmica R).

Dado el criterio de zonificación del edificio en estudio, se considera un área única de tabiques de yeso, ya que todos los tramos separan la zona térmica del núcleo central de la zona circundante de oficinas de cada nivel y no presentan superficies asoleadas que las diferencien; la misma consideración se tomó para las puertas.

Los valores de conductividad (W/m.K) y resistencia térmica ($m^2.K/W$) para cada material fueron obtenidos del “Formulario de Transmitancia Térmica” de la Intendencia de Montevideo. (Intendencia de Montevideo, 2021)

Para el cálculo se tomaron las expresiones (4) y (5):

$$\text{Conductancia : } C = \frac{1}{Rt} = \frac{1}{R_1 + R_2 + \dots + R_n} \quad (4)$$

$$\text{Transmitancia : } U = \frac{1}{Rt} = \frac{1}{R_{Si} + R_1 + R_2 + \dots + R_n + R_{Se}} \quad (5)$$

Donde:

$$R \text{ total} = \text{Resistencia total} = R_{capa1} + R_{capa2} + R_{capa3} \quad (m^2.K/W)$$

$$\text{Transmitancia o conductancia} = 1/R_{total} \quad (W/m^2.K)$$

$$R_{capa i} = \text{espesor capa } i / \text{conductividad capa } i \quad (m^2.K/W)$$

R_{si} : Resistencia superficial interior

R_{se} : Resistencia superficial exterior

Los tabiques de yeso que separan la zona térmica del núcleo central de las zonas térmicas correspondientes a oficinas en cada nivel están conformados por placa de yeso 12.5 mm, estructura de perfilera galvanizada de 70 mm, capa aislante de lana de vidrio de 50 mm y placa de yeso de 12.5 mm. Dicha sumatoria de capas presenta una conductancia térmica de 0.67 W/($m^2.K$).

Todas las puertas que conectan las zonas térmicas de oficinas en los respectivos niveles con el núcleo central permanecen mayoritariamente cerradas por lo que serán consideradas como tabiques livianos. Dichos elementos de carpintería están conformados por tableros de MDF “Medium Density Fibreboard” de 5.5 mm de espesor, color gris aluminio montados en un bastidor de aluminio serie Gala de Aluminios del Uruguay. El conjunto presenta una conductancia térmica de 4.77 W/($m^2.K$).

Las puertas de los ascensores también se consideran como tabiques livianos, las mismas están conformadas por dos placas de acero inoxidable de 0.5 mm de espesor separadas por una cámara de aire de 2 cm. Este elemento presenta una conductancia térmica de 5.88 W/ $m^2.K$.

Para el caso de las puertas cortafuegos estas se componen de dos capas de acero galvanizado de 0,7mm tipo “skinpass”, rellenas de lana de roca densidad 180 Kg/m³. (Padilla Fire Doors, 2021) y de acuerdo a su conformación presentan una conductancia térmica de 0.72 W/ $m^2.K$.

La envolvente del edificio que conforma las fachadas del modelo de análisis “Caso Base” se considera como tabique liviano dada su conformación; este tabique liviano está conformado —de exterior a interior— por panel GRC de 0.01m sobre estructura galvanizada tipo “studframe”, cámara de aire de 0.11m, aislación de lana de vidrio hidropelente para fachadas de 0.050m, cámara de aire de 0.315m, y placa de yeso de 0.015m presentando un espesor total de 0.5m. El total del conjunto presenta una conductancia térmica de $0.54 \text{ W/m}^2\cdot\text{K}$. El detalle del cerramiento se detalla en la descripción del caso de estudio.

Los vidrios opacificados que conforman los paños superiores e inferiores de los vidriados transparentes coinciden en la parte inferior con las aletas de las vigas y en la parte superior con la cámara conformada entre cielorrasos de yeso y losas de entresijos o cubierta —ver figura 5— por lo tanto, estos sectores vidriados no dejan pasar radiación solar al interior, dada esta particularidad se los estudia como tabiques livianos.

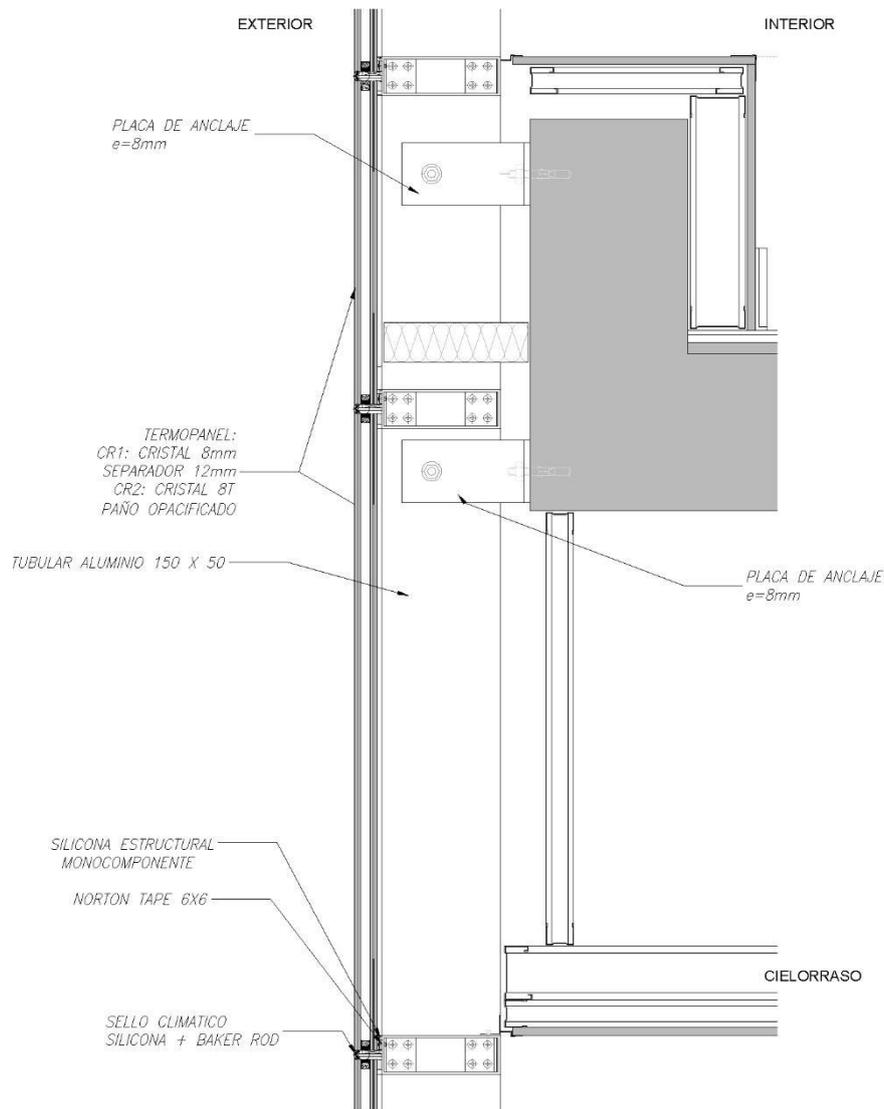


Fig. 5. Detalle de paños vidriados opacificados

Fuente: elaboración propia en base a recaudos proporcionados por UAM - CA

El cerramiento está conformado por cristal 8mm, cámara de aire 12mm y cristal 8mm. Para dicha composición de doble vidriado hermético, se utiliza una transmitancia térmica de $2.8 \text{ W}/(\text{m}^2\cdot\text{K})$, según las especificaciones técnicas consultadas (Ekoglass, 2021). Debido a que el valor provisto por el fabricante corresponde a la transmitancia térmica

(variable que incluye los coeficientes peliculares) y el “software” requiere como dato de ingreso la conductancia térmica ($C = 1/R$, sin considerar los coeficientes peliculares), se la calcula como:

$$\text{Transmitancia} = \frac{1}{R_{Total}} = 2.8 \frac{W}{m^2K}, \text{ en donde:}$$

$$R_{Total} = \frac{1}{R_{Si}} + R + \frac{1}{R_{Se}} = 0.17 + R$$

los valores internacionales de norma establecen que:

$$\frac{1}{R_{Si}} + \frac{1}{R_{Se}} = 0.03 + 0.14 = 0.17 \text{ W}(m^2K)$$

con lo que:

$$2.8 = \frac{1}{(0.17 + R)} \rightarrow R = 0.187 \left(\frac{m^2K}{W} \right)$$

entonces:

$$C = \frac{1}{R} = \frac{1}{0.187} = 5.3 \frac{W}{(m^2K)}$$

Por lo tanto para este cerramiento se utiliza un valor de conductancia de 5.3 W/(m².K) y un coeficiente de absorción solar de 0.8 al ser de color gris oscuro.

En la tabla 8 se organizan las características de los elementos estudiados como tabiques livianos que ofician de elementos de conexión entre diferentes zonas térmicas contiguas y con el exterior.

Tabiques livianos												
Tabique	Área (m ²)	Pendiente (°)	Azimut (°)	Conductancia térmica (W/m ² .K)	Lado 1 - exterior -				Lado 2 - interior -			
					Zona	Absortancia solar	Coef. convectivo-radiativo (W/m ² .K)	Área asoleada (m ²)	Zona	Absortancia solar	Coef. convectivo-radiativo (W/m ² .K)	Área asoleada (m ²)
T1 Tabique de yeso	98.90	90	-	0.67	ZTNC	0.25	6.00	0	ZT0	0.25	6.00	0
T2 Tabique de yeso	123.60	90	-	0.67	ZTNC	0.25	6.00	0	ZT1	0.25	6.00	0
T3 tabique de yeso	123.60	90	-	0.67	ZTNC	0.25	6.00	0	ZT2	0.25	6.00	0
T4 tabique de yeso	123.60	90	-	0.67	ZTNC	0.25	6.00	0	ZT3	0.25	6.00	0
T5 tabique de yeso	69.80	90	-	0.67	ZTNC	0.25	6.00	0	ZT4	0.25	6.00	0
T6 Puertas de MDF 5,5m	15.08	90	-	4.77	ZTNC	0.35	6.00	0	ZT0	0.35	6.00	0
T7 Puertas de MDF 5,5m	20.25	90	-	4.77	ZTNC	0.35	6.00	0	ZT1	0.35	6.00	0
T8 Puertas de MDF 5,5m	20.25	90	-	4.77	ZTNC	0.35	6.00	0	ZT2	0.35	6.00	0
T9 Puertas de MDF 5,5m	20.25	90	-	4.77	ZTNC	0.35	6.00	0	ZT3	0.35	6.00	0
T10 Puertas de MDF 5.5m	12.80	90	-	4.77	ZTNC	0.35	6.00	0	ZT4	0.35	6.00	0
T11 Puertas ascensor	4.40	90	-	5.88	ZTNC	0.35	6.00	0	ZT0	0.35	6.00	0
T12 Puertas ascensor	4.40	90	-	5.88	ZTNC	0.35	6.00	0	ZT1	0.35	6.00	0
T13 Puertas ascensor	4.40	90	-	5.88	ZTNC	0.35	6.00	0	ZT2	0.35	6.00	0
T14 Puertas ascensor	4.40	90	-	5.88	ZTNC	0.35	6.00	0	ZT3	0.35	6.00	0
T15 Puertas ascensor	4.40	90	-	5.88	ZTNC	0.35	6.00	0	ZT4	0.35	6.00	0
T16 Puerta cortafuego	2.10	90	-	0.72	ZTNC	0.35	6.00	0	ZT1	0.35	6.00	0
T17 Puerta cortafuego	2.10	90	-	0.72	ZTNC	0.35	6.00	0	ZT2	0.35	6.00	0
T18 Puerta cortafuego	2.10	90	-	0.72	ZTNC	0.35	6.00	0	ZT3	0.35	6.00	0
T19 Puerta cortafuego	2.10	90	-	0.72	ZTNC	0.35	6.00	0	ZT4	0.35	6.00	0
T20 Envolverte N.	35.60	90	180	0.54	Ext.	0.40	24.70	35.6	ZT1	0.25	8.00	0
T21 Envolverte S.	63.90	90	0	0.54	Ext.	0.40	24.70	63.9	ZT1	0.25	8.00	0
T22 Envolverte E.	51.30	90	90	0.54	Ext.	0.40	24.70	51.3	ZT1	0.25	8.00	0
T23 Envolverte O.	49.20	90	-90	0.54	Ext.	0.40	24.70	49.2	ZT1	0.25	8.00	0
T24 Envolverte N.	58.20	90	180	0.54	Ext.	0.40	24.70	58.2	ZT2	0.25	8.00	0
T25 Envolverte S.	63.90	90	0	0.54	Ext.	0.40	24.70	63.9	ZT2	0.25	8.00	0
T26 Envolverte E.	58.20	90	90	0.54	Ext.	0.40	24.70	58.2	ZT2	0.25	8.00	0
T27 Envolverte O.	58.20	90	-90	0.54	Ext.	0.40	24.70	58.2	ZT2	0.25	8.00	0
T28 Envolverte N.	58.20	90	180	0.54	Ext.	0.40	24.70	58.2	ZT3	0.25	8.00	0
T29 Envolverte S.	63.90	90	0	0.54	Ext.	0.40	24.70	63.9	ZT3	0.25	8.00	0
T30 Envolverte E.	58.20	90	90	0.54	Ext.	0.40	24.70	58.2	ZT3	0.25	8.00	0
T31 Envolverte O.	58.20	90	-90	0.54	Ext.	0.40	24.70	58.2	ZT3	0.25	8.00	0
T32 Envolverte S.	63.90	90	0	0.54	Ext.	0.40	24.70	63.9	ZT4	0.25	8.00	0
T33 Envolverte E.	44.40	90	90	0.54	Ext.	0.40	24.70	44.4	ZT4	0.25	8.00	0
T34 Envolverte O.	42.30	90	-90	0.54	Ext.	0.40	24.70	42.3	ZT4	0.25	8.00	0
T35 Vidrio opacificado N.	11.20	90	180	5.30	Ext.	0.80	24.70	11.2	ZT1	0.80	8.00	0
T36 Vidrio opacificado S.	9.50	90	0	5.30	Ext.	0.80	24.70	9.5	ZT1	0.80	8.00	0
T37 Vidrio opacificado E.	11.20	90	90	5.30	Ext.	0.80	24.70	11.2	ZT1	0.80	8.00	0
T38 Vidrio opacificado O.	10.50	90	-90	5.30	Ext.	0.80	24.70	10.5	ZT1	0.80	8.00	0
T39 Vidrio opacificado N.	11.20	90	180	5.30	Ext.	0.80	24.70	11.2	ZT2	0.80	8.00	0
T40 Vidrio opacificado S.	9.50	90	0	5.30	Ext.	0.80	24.70	9.5	ZT2	0.80	8.00	0
T41 Vidrio opacificado E.	11.20	90	90	5.30	Ext.	0.80	24.70	11.2	ZT2	0.80	8.00	0
T42 Vidrio opacificado O.	11.20	90	-90	5.30	Ext.	0.80	24.70	11.2	ZT2	0.80	8.00	0
T43 Vidrio opacificado N.	11.20	90	180	5.30	Ext.	0.80	24.70	11.2	ZT3	0.80	8.00	0
T44 Vidrio opacificado S.	9.50	90	0	5.30	Ext.	0.80	24.70	9.5	ZT3	0.80	8.00	0
T45 Vidrio opacificado E.	11.20	90	90	5.30	Ext.	0.80	24.70	11.2	ZT3	0.80	8.00	0
T46 Vidrio opacificado O.	11.20	90	-90	5.30	Ext.	0.80	24.70	11.2	ZT3	0.80	8.00	0
T47 Vidrio opacificado S.	9.50	90	0	5.30	Ext.	0.80	24.70	9.5	ZT4	0.80	8.00	0
T48 Vidrio opacificado E.	7.70	90	90	5.30	Ext.	0.80	24.70	7.7	ZT4	0.80	8.00	0
T49 Vidrio opacificado O.	1.70	90	-90	5.30	Ext.	0.80	24.70	1.7	ZT4	0.80	8.00	0

Tabla 8. Propiedades de los elementos estudiados como tabiques livianos

Fuente: elaboración propia.

3.7.3. Vidriados

Los vidriados conectan dos zonas térmicas mediante coeficientes de transmisión térmica que pueden variar del día a la noche (por ejemplo, para incluir postigones, cortinas, etc.). Para los vidriados se deben ingresar las siguientes propiedades: área de vidrio, pendiente, azimut, número de vidrios —colocados en forma paralela—, coeficiente de pérdida U del vidriado —valor provisto por el fabricante—, y superficie que recibe la radiación solar que atraviesa el vidriado.

Para el caso de estudio se contemplan todas las áreas vidriadas transparentes que conectan las diferentes zonas térmicas con el exterior. Para dichas superficies se tabularon los valores correspondientes a su área, su pendiente —90° para todos ya que se encuentran en el plano vertical—, su orientación, y el valor de transmitancia térmica; además se debe especificar la superficie que recibirá la radiación solar que deja pasar el área vidriada en cada zona térmica.

Los cerramientos vidriados están conformados por cristal de 8mm, cámara de aire de 12mm y cristal de 8mm. Estos cerramientos son transparentes y dejan pasar la radiación solar. De acuerdo a los datos provistos por el fabricante el valor de la transmitancia térmica para esta conformación de doble vidriado hermético corresponde a 2.8 W/(m².K) y su conductancia 5.3 W/(m².K). Estos cerramientos de fachada no presentan elementos de protección exterior, por lo que su valor de transmitancia térmica se mantiene igual tanto en el día como en la noche.

En la tabla 9 se muestran los valores que se cargaron en el “software” para la simulación del caso de estudio.

Vidriado transparente - 8mm + cámara de aire 12mm + cristal 8mm							
Vidrio	Conecta	Área (m2)	Pendiente (°)	Azimut (°)	Nro de vidrio/cubiertas	Superficie que recibe radiación solar	Tipo de vidrio
V1	ZTNC / Ext (N)	8.8	90	180	2	M1	DVH 8+12+8
V2	ZT0 / Ext (S)	88.7	90	0	2	M12	DVH 8+12+8
V3	ZT0 / Ext (E)	21.90	90	90	2	M13	DVH 8+12+8
V4	ZT0 / Ext (O)	21.9	90	-90	2	M14	DVH 8+12+8
V5	ZT1 (N)	21.2	90	180	2	M18	DVH 8+12+8
V6	ZT1 (S)	21.6	90	0	2	M19	DVH 8+12+8
V7	ZT1 (E)	23.5	90	90	2	M20	DVH 8+12+8
V8	ZT1 (O)	22.3	90	-90	2	M21	DVH 8+12+8
V9	ZT2 (N)	25.6	90	180	2	M25	DVH 8+12+8
V10	ZT2 (S)	21.6	90	0	2	M26	DVH 8+12+8
V11	ZT2 (E)	25.6	90	90	2	M27	DVH 8+12+8
V12	ZT2 (O)	25.6	90	-90	2	M28	DVH 8+12+8
V13	ZT3 (N)	25.6	90	180	2	M29	DVH 8+12+8
V14	ZT3 (S)	21.6	90	0	2	M30	DVH 8+12+8
V15	ZT3 (E)	25.6	90	90	2	M31	DVH 8+12+8
V16	ZT3 (O)	25.6	90	-90	2	M32	DVH 8+12+8
V17	ZT4 (N)	19.4	90	180	2	M34	DVH 8+12+8
V18	ZT4 (S)	21.6	90	0	2	M35	DVH 8+12+8
V19	ZT4 (E)	17.7	90	90	2	M36	DVH 8+12+8
V20	ZT4 (O)	4.0	90	-90	2	M37	DVH 8+12+8

Tabla 9. Propiedades de los cerramientos vidriados transparentes

Fuente: elaboración propia.

3.7.4. Aberturas y vanos

Son aberturas entre dos zonas térmicas interiores que están a la misma altura y que permiten un intercambio de aire bidireccional por convección natural entre las zonas, debido a la diferencia de densidad del aire entre dos zonas térmicas. Sus dimensiones corresponden a las dimensiones del vano. El coeficiente de transferencia de calor es

función de la diferencia de temperatura entre las zonas conectadas por la abertura considerada.

Todos los vanos contabilizados en la tabla 10 no cuentan con elementos de cerramiento, son completamente abiertos, por lo tanto, se considera un coeficiente de descarga de 0.6 tal como sugiere el manual de SIMEDIF. El coeficiente de descarga es el valor que explica el aumento o disminución del flujo de aire a través de la abertura debido a factores geométricos, como la forma del vano o la posición de la hoja en caso de una puerta entreabierta.

Aberturas y vanos				
Abertura	Conecta	Ancho (m)	Alto (m)	Coeficiente de descarga
A1 Hall PB	ZTNC / ZT0	1.47	2.25	0.6
A2 Hall primer piso	ZTNC / ZT1	1.47	3.97	0.6
A3 Hall primer piso	ZTNC / ZT1	1.47	3.97	0.6
A4 Hall segundo piso	ZTNC / ZT2	1.47	3.97	0.6
A5 Hall segundo piso	ZTNC / ZT2	1.47	3.97	0.6
A6 Hall tercer piso	ZTNC / ZT3	1.47	3.97	0.6
A7 Hall tercer piso	ZTNC / ZT3	1.47	3.97	0.6
A8 Hall cuarto piso	ZTNC / ZT4	1.47	3.97	0.6

Tabla 10. Tabla de aberturas y vanos

Fuente: elaboración propia.

Luego de que se ha definido la localización temporal, datos meteorológicos, zonificación, ganancias internas de energía, ganancias y pérdidas de energía por ventilación e infiltraciones y habiendo definido y caracterizado los elementos de conexión entre las zonas térmicas contiguas —cerramientos masivos, cerramientos livianos, vidriados, aberturas y vanos— para el objeto de estudio se está en condiciones de cargar estos parámetros en el “software” para realizar el cálculo y evaluar su desempeño energético en las condiciones actuales.

3.8 CRITERIOS DE EVALUACIÓN DE DESEMPEÑO

Para la evaluación energética se tomó como referencia el mes de Julio como representativo del período frío y el mes de Enero como representativo del período caluroso.

Para el cálculo de energía adicional en invierno se configura en SIMEDIF la temperatura del termostato entre las 08:00 y 20:00 h en 21°C, que es lo que se usa normalmente en invierno, que además para Montevideo coincide con el valor de temperatura de confort —modelo adaptativo— (De Dear & Brager, 1998), la temperatura de confort se calcula de acuerdo a la expresión (6):

$$T_{conf.} = 0.31 \times T_{mediamensual} + 17.8^{\circ}C \quad (6)$$

$$T_{conf.} = 0.31 + 10.35^{\circ}C + 17.8^{\circ}C = 21^{\circ}C$$

Para el cálculo de energía adicional en verano se configura en SIMEDIF la temperatura del termostato entre las 08:00 y 20:00 h en 24.6°C, la temperatura de confort se calcula como:

$$T_{conf.} = 0.31 + 10.35^{\circ}C + 17.8^{\circ}C = 21^{\circ}C$$

Se utiliza el modelo de confort adaptativo debido a que se considera que el edificio podrá utilizar ventilación natural como una de sus estrategias de refrescamiento. El rango de confort depende del nivel de aceptabilidad: temperatura de confort $\pm 2.5^{\circ}C$ (aceptabilidad del 90%) o temperatura de confort $\pm 3.5^{\circ}C$ (aceptabilidad del 80%). En este caso, consideramos un nivel de aceptabilidad del 80%.

Para el análisis de las condiciones de confort al interior de los espacios, el “software” SIMEDIF utiliza el modelo matemático del Voto Medio Previsto –“VMP”. El índice de Voto Medio Previsto “PMV, Predicted Mean Vote” expresa el valor medio de la sensación subjetiva de confort de un grupo de personas en un ambiente determinado, emplea para ello la escala de sensación térmica de siete puntos. (ASHRAE, 2010).

A partir de los resultados simulados de temperatura y humedad relativa, el software estima el nivel de confort térmico interior durante el periodo utilizando la norma ANSI/ASHRAE 55 para estimar la sensación de confort horaria mediante el PMV (Voto Medio Predicho) y el PPD (Porcentaje de Personas Insatisfechas). El método analítico calcula ambas variables de manera horaria, en base al índice de arropamiento, la tasa metabólica, la velocidad de aire, la temperatura operativa y la humedad.

El método predice el PMV en una escala con 7 rangos: muy frío ($PMV < -2.5$), frío ($-2.5 < PMV < -1.5$), fresco ($-1.5 < PMV < -0.5$), neutral de confort ($-0.5 < PMV < +0.5$), cálido ($+0.5 < PMV < +1.5$), caluroso ($+1.5 < PMV < +2.5$), muy caluroso ($PMV > +2.5$). La zona de confort establece las condiciones en las que el 80% de las personas, en actividad sedentaria o de actividad ligera, encuentran el ambiente térmicamente aceptable. (ASHRAE, 2010). El software entrega los resultados de manera gráfica y en archivos de texto plano.

CAPÍTULO IV: DESCRIPCIÓN DEL CASO DE ESTUDIO

Para estudiar el desempeño energético de las fachadas ventiladas opacas se analizará un edificio existente puesto en funcionamiento a principios del pasado año —2021— en el marco de un proyecto de gran escala que es la Unidad Agroalimentaria Metropolitana.

El edificio en estudio es concretamente el Centro Administrativo de la Unidad Agroalimentaria Metropolitana (UAM) (Fig. 5a. 5b.). La UAM está ubicada en un predio delimitado por la Ruta Nacional N.º 5, Camino Luis Eduardo Pérez, Camino La Higuera y el Arroyo Pantanoso. Se ubica en un área de interfase urbano-rural, al oeste del departamento de Montevideo. El complejo está rodeado al norte por un área rural productiva; al oeste y suroeste por una serie de barrios urbanos periféricos; al sur por el arroyo Pantanoso; y al este por la Ruta 5, vía que pertenece al sistema vial nacional. (Fig. 6)



Fig. 5a. Proceso de obra edificio Centro Administrativo. Vista desde suroeste.
Fuente: Recaudos proporcionados por UAM - CA



Fig. 5b. Proceso de obra edificio Centro Administrativo. Vista desde noreste.
Fuente: Recaudos proporcionados por UAM - CA

El predio cuenta con una superficie de 95 hectáreas, en la que se han construido infraestructuras y servicios para potenciar el desarrollo y la competitividad de las empresas del sector mayorista de distribución alimentaria y el desarrollo de actividades complementarias y conexas, en su sentido más amplio. El complejo de la UAM es la primera plataforma logística de comercialización mayorista de alimentos del país. (Unidad Agroalimentaria Metropolitana, 2021)

Dentro del complejo de la Unidad Agroalimentaria (Fig. 7) conformado por una nave de actividades logísticas, ocho naves que atienden la zona de actividades complementarias, cuatro grandes naves de mercado de frutas y hortalizas, una nave de mercado polivalente, plazas, terminal de ómnibus, estacionamientos, plazas de comidas y demás, se encuentra el edificio del Centro Administrativo (CA) —en el límite del predio— como un volumen aislado en el punto más alto de la topografía. Los bordes del predio constituyen un espacio de articulación entre las actividades de la UAM y el entorno, por lo que se conformarán como una banda de áreas parquizadas, donde las construcciones ocuparán un reducido porcentaje del suelo.

El edificio del Centro Administrativo (CA) está conformado por oficinas de administración, salas de reuniones y eventos, centro de información, centro de seguridad, vigilancia y de comunicaciones, el centro de capacitación, entre otros.

El objeto de estudio sobre el cual se realizará la simulación es un volumen exento con sus cuatro fachadas expuestas. Según el mapa solar del Uruguay su ubicación dentro del departamento de Montevideo es latitud -34.819 sur y longitud 56.267 oeste. Se encuentra a 33m de elevación sobre el nivel del mar y a 9 Km de la costa del Río de la Plata. Las fachadas se encuentran orientadas hacia los cuadrantes norte, sur, este y oeste.

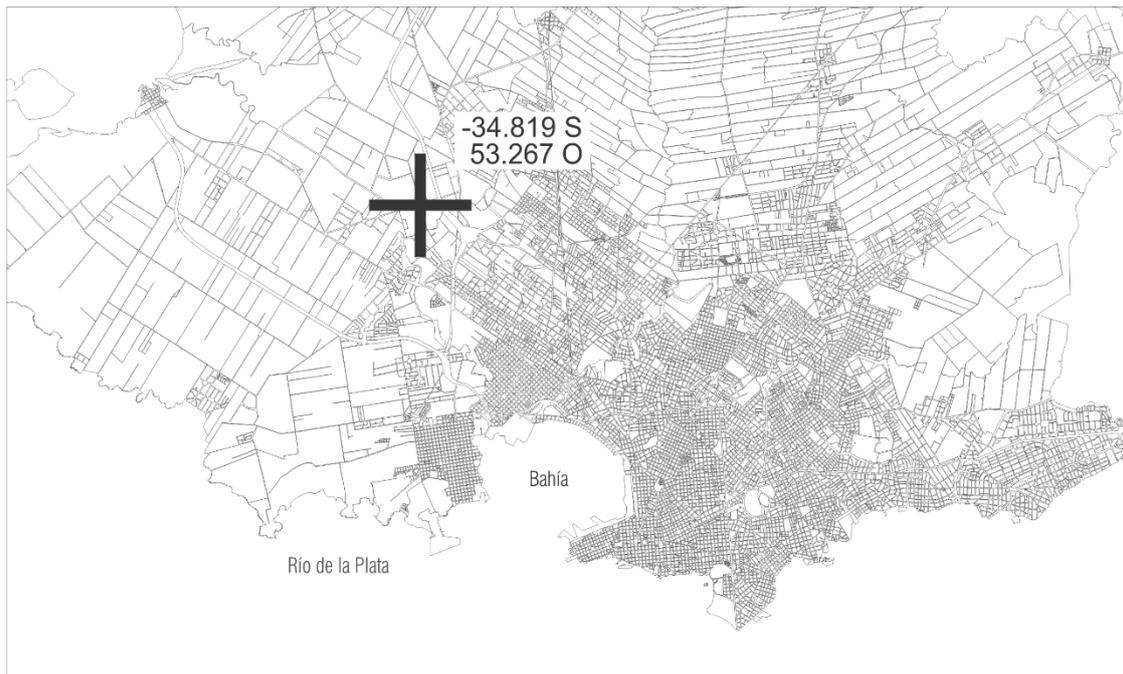


Fig. 6. Plano de ubicación de UAM en el departamento de Montevideo
Fuente: elaboración propia.

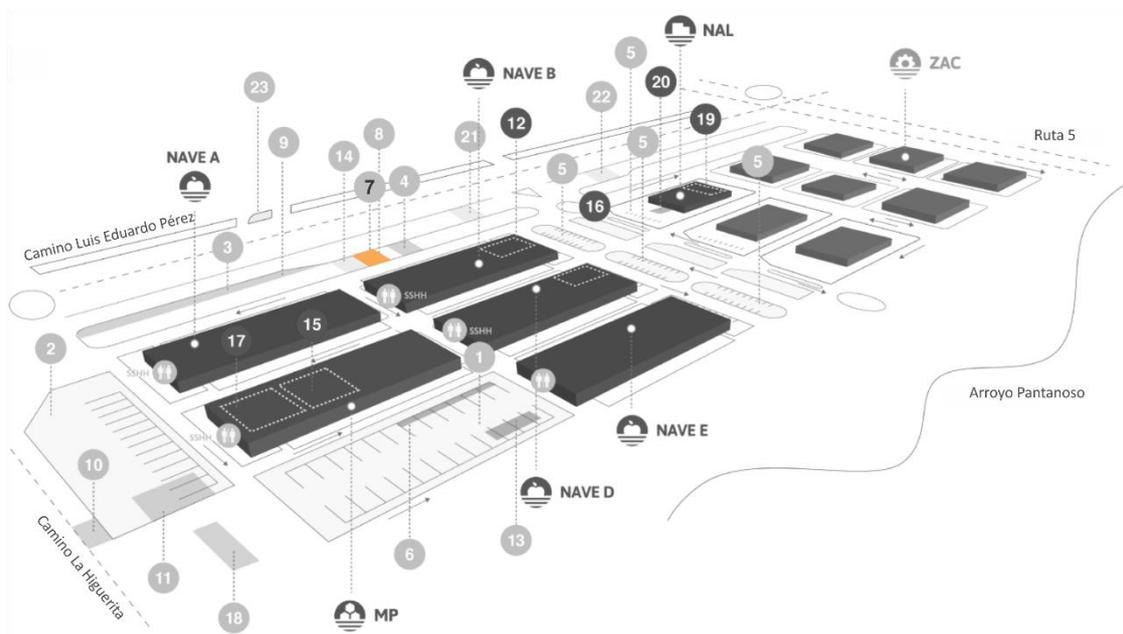


Fig. 7. Plano general de UAM.

Referencias: NAL (Nave de Actividades Logísticas), ZAC (Zona de Actividades Complementarias), MFH (Mercado de Frutas y Hortalizas), MP (Mercado Polivalente). 1- Estacionamiento sur. 2- Estacionamiento oeste. 3- Estacionamiento motos. 4- Estacionamiento de personal. 5- Estacionamiento. 6- Plaza de sandías. 7- Edificio Administrativo. 8- Caja principal. 9- Terminal de ómnibus. 10- Gomería y taller mecánico. 11- Baños y vestuarios transportistas. 12- Atención al cliente. 13- Estacionamiento autoelevadores y carros. 14- Acceso peatonal. 15- Zona de servicios. 16- Oficina de gestión social. 17- Plaza de comidas. 18- Galpón de infraestructuras y mantenimiento. 19- Boxes NAL. 20- Sala de capacitación. 21- Acceso vehicular. 22- Salida vehicular. 23- Darsena de acceso.

Recuperado de: <http://www.uam.com.uy/presentacion/acerca-de-la-uam.html>

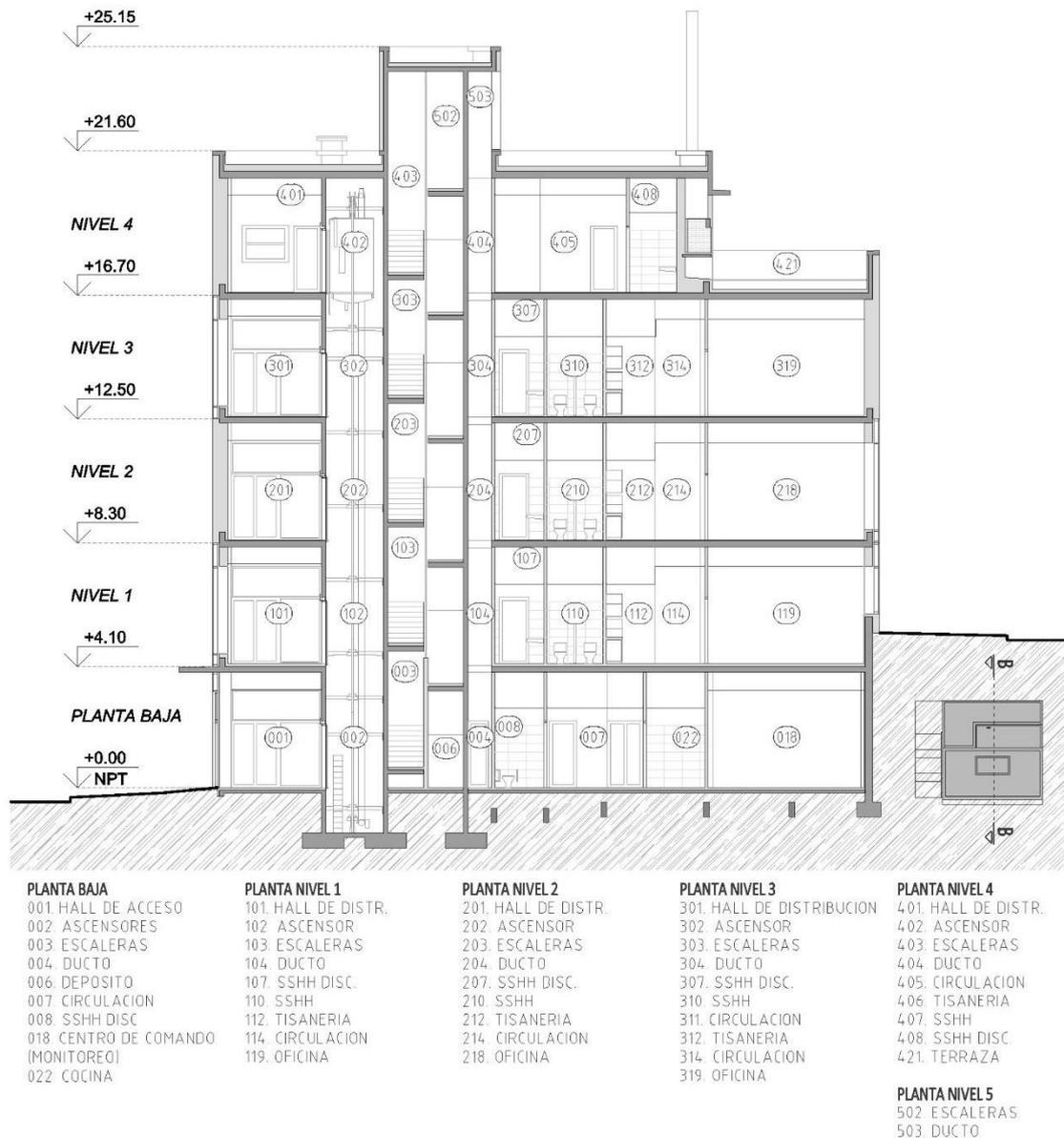


Fig. 8. Corte B-B

Fuente: elaboración propia en base a recaudos proporcionados por UAM - CA

La planta del edificio es un cuadrado de 22.00m de lado, se compone por planta baja y cuatro niveles superiores siendo su máxima altura 21.60m sin contar el sobre recorrido del ascensor. El acceso principal es por el cuadrante sur.

La planta baja se encuentra en su mayoría soterrada bajo nivel de suelo, quedando al descubierto su fachada sur (acceso) y partes de la fachada este y oeste en su encuentro con la anterior; la fachada norte en este nivel se encuentra totalmente bajo tierra debido al desnivel del terreno —casi cinco metros entre el cuadrante norte (más elevado) y el sur—. (Fig. 8)

Respecto a las envolventes de este nivel, más del 50% corresponden a muros de contención de hormigón armado de 0.25m de espesor y el resto de las superficies expuestas corresponden a termo paneles de doble vidrio hermético.

En el interior de este nivel se encuentra un núcleo central de ascensores y escaleras que se replica en los niveles sucesivos conformado por estructura de hormigón armado

de 0.15m de espesor. Tras el núcleo de escaleras y como parte del sector central se encuentra una zona de servicios más compartimentada donde se ubican los servicios higiénicos, sala de lactancia, cocina, y circulaciones. Las subdivisiones de este sector están conformadas por tabiquería de yeso de 0.10m de espesor con aislación entre placas; los cielorrasos son de placa de yeso y se encuentran a 2.70m sobre el nivel de piso interior.

En el sector perimetral de este nivel y hacia las fachadas bajo el nivel de suelo se localizan depósitos, salas de monitoreo, servidores, tableros y salas de reuniones y hacia el sector sur —vidriado— se ubica el hall de acceso, la recepción y el salón de actos. Las subdivisiones de estos recintos perimetrales están conformadas por tabiquería de yeso con aislación de 0.10m de espesor, los cielorrasos son de placa de yeso y se sitúan a 3.30m sobre el nivel de piso interior.

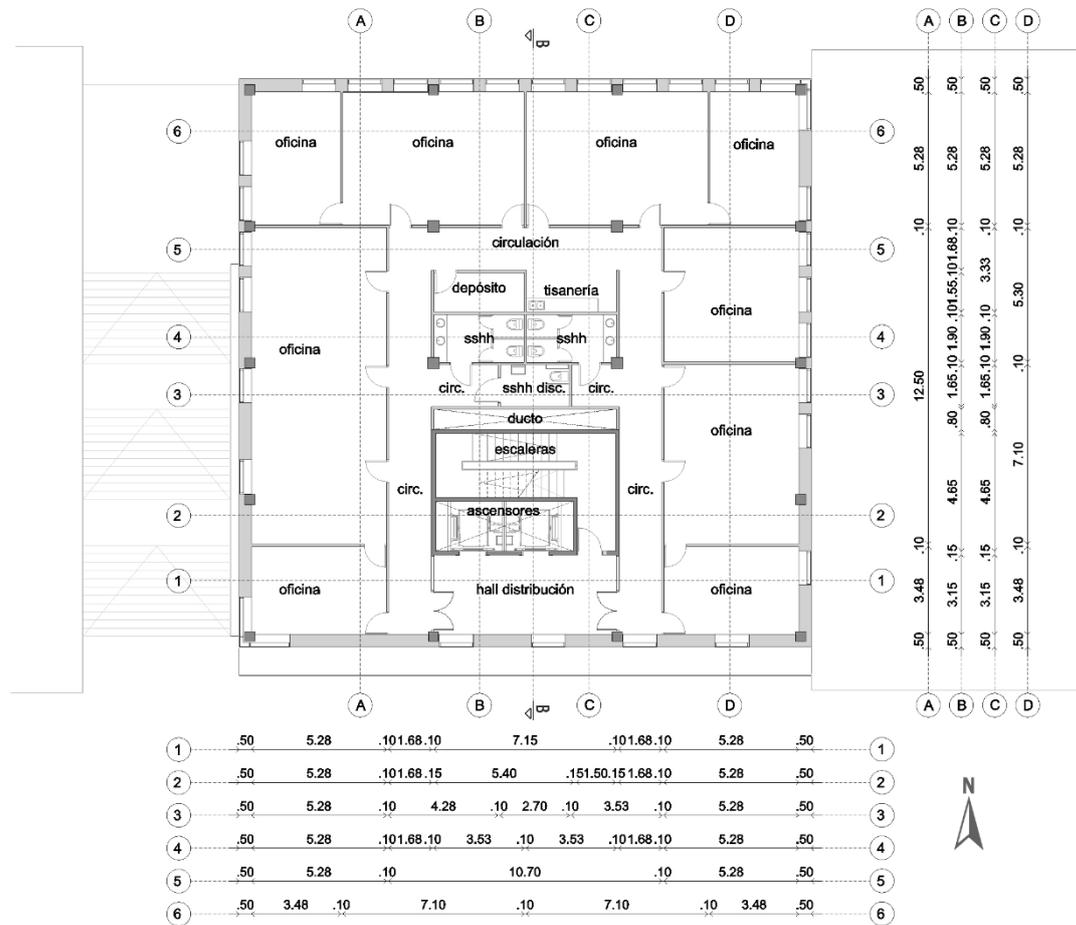


Fig. 9. Planta nivel 1.

Fuente: elaboración propia en base a recaudos proporcionados por UAM - CA

Los niveles 1, 2 y 3 tienen una distribución similar entre ellos, donde se repite al igual que en el nivel anterior el núcleo central estructural de hormigón que alberga los ascensores y la caja de escaleras y tras este un sector central compartimentado con tabiques de yeso de 0.10m de espesor con aislación y cielorrasos de placa de yeso a 2.70m sobre el nivel de piso donde se alojan los servicios higiénicos, depósito, tisanería y circulaciones que envuelven este núcleo central y permiten acceso a las oficinas situadas en el sector perimetral de dichos niveles. Las oficinas y hall de acceso dispuestos hacia las fachadas exteriores están conformados por tabiques livianos de

yeso con aislación de 0.10m de espesor y cielorrasos de yeso situados a 3.30m sobre el nivel de piso terminado. (Fig. 9)

En el nivel 4 se repite el núcleo central —tanto el bloque estructural como el de servicios— con las mismas características que en los niveles anteriores; se mantiene hacia el sur el hall de acceso y oficinas, hacia el este y el oeste sector de oficinas; ambos con iguales características que las mencionadas para los niveles anteriores. Hacia el sector norte —en este nivel— no se cuenta con el sector de oficinas y se da lugar a una terraza abierta exterior con parrilleros. El nivel 4 tiene una superficie interior de 324m² en lugar de los 480m² de los niveles anteriores.

Envoltentes

Las cuatro fachadas del edificio —salvo los muros de contención en planta baja— están resueltas prácticamente de la misma forma, sectores opacos compuestos por paneles de hormigón reforzado con fibras de vidrio —paneles GRC (*Glassfiber Reinforced Concrete*)— y paños vidriados transparentes y opacificados (Fig. 10 a 13).

La mayoría de las superficies opacas corresponden al tipo de muro codificado en los planos de albañilería como “M9” de 50.00cm de espesor. Este muro se compone —de interior a exterior— por placa de yeso de 0.12cm sobre estructura de perfilería autoportante de chapa galvanizada plegada: soleras horizontales 7.00x2.80cm (superior e inferior); montantes verticales 6.90x3.50cm (cada 40cm), un espacio hueco de 24.50cm, aislación de lana de vidrio hidrorrepelente para fachada de 5.00cm de espesor y como terminación exterior paneles GRC (Fig. 14).

Según el manual del proveedor de los paneles empleados (Astori, 2021) el GRC (*Glassfiber Reinforced Concrete*) es un material compuesto por una matriz de cemento portland, arena de sílice, agua y aditivos, reforzado con fibra de vidrio álcali resistente que permiten generar con gran flexibilidad pieles de hormigón. El sistema se encuentra en el grupo de los prefabricados de cerramientos de fachadas no portantes, soportan su peso propio y las cargas horizontales del viento.



Fig. 10. Fachada Este.

Fuente: elaboración propia en base a recaudos proporcionados por UAM - CA

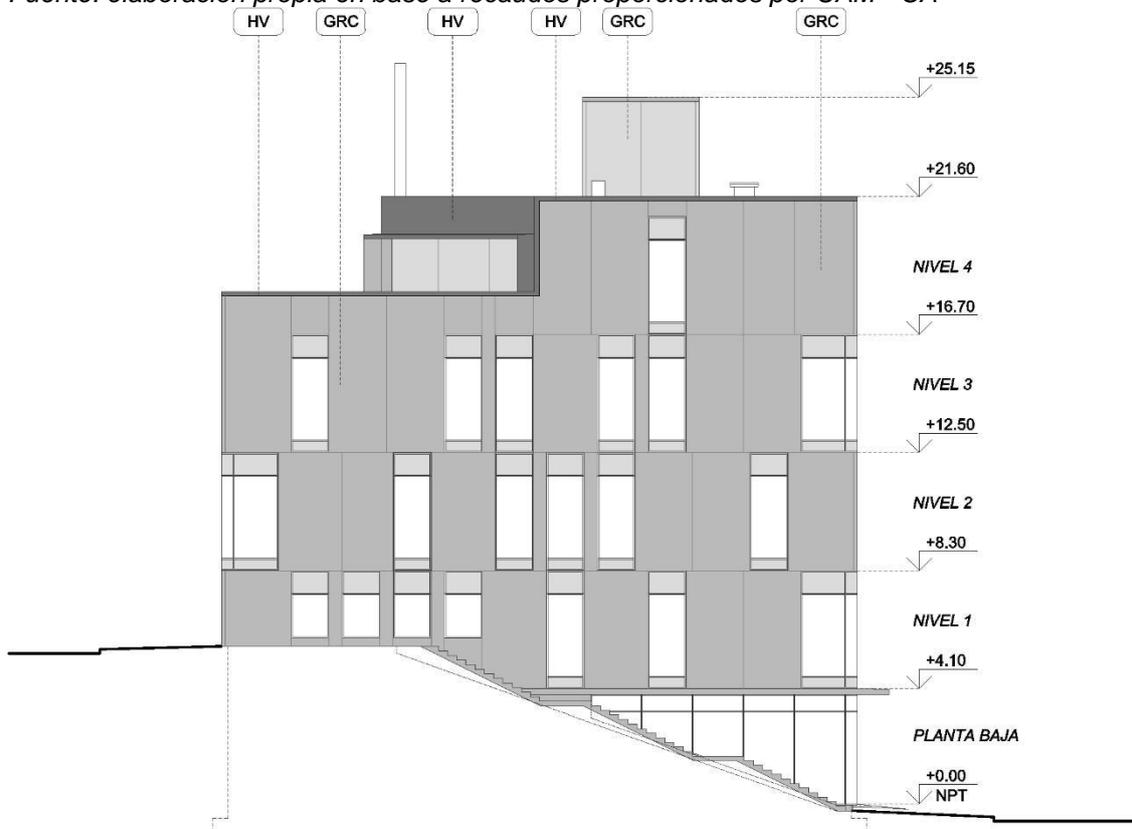


Fig. 11. Fachada Oeste.

Fuente: elaboración propia en base a recaudos proporcionados por UAM - CA

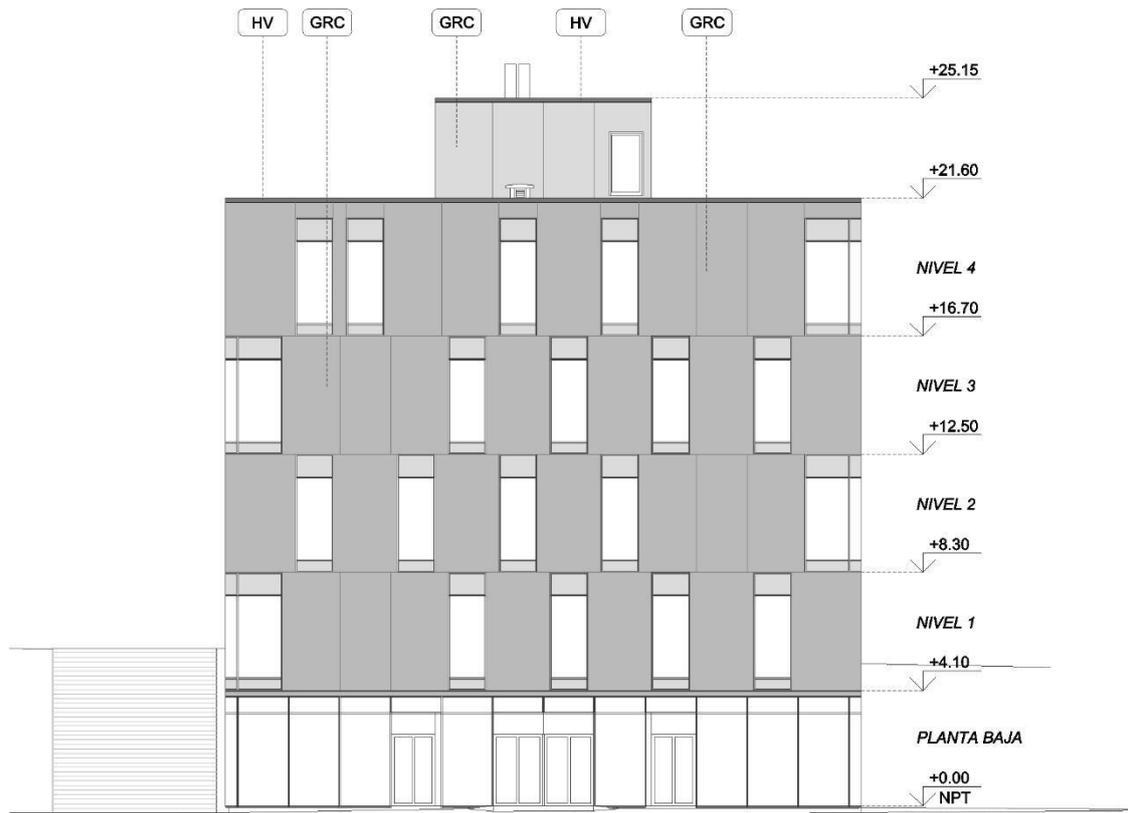


Fig. 12. Fachada Sur.

Fuente: elaboración propia en base a recaudos proporcionados por UAM - CA

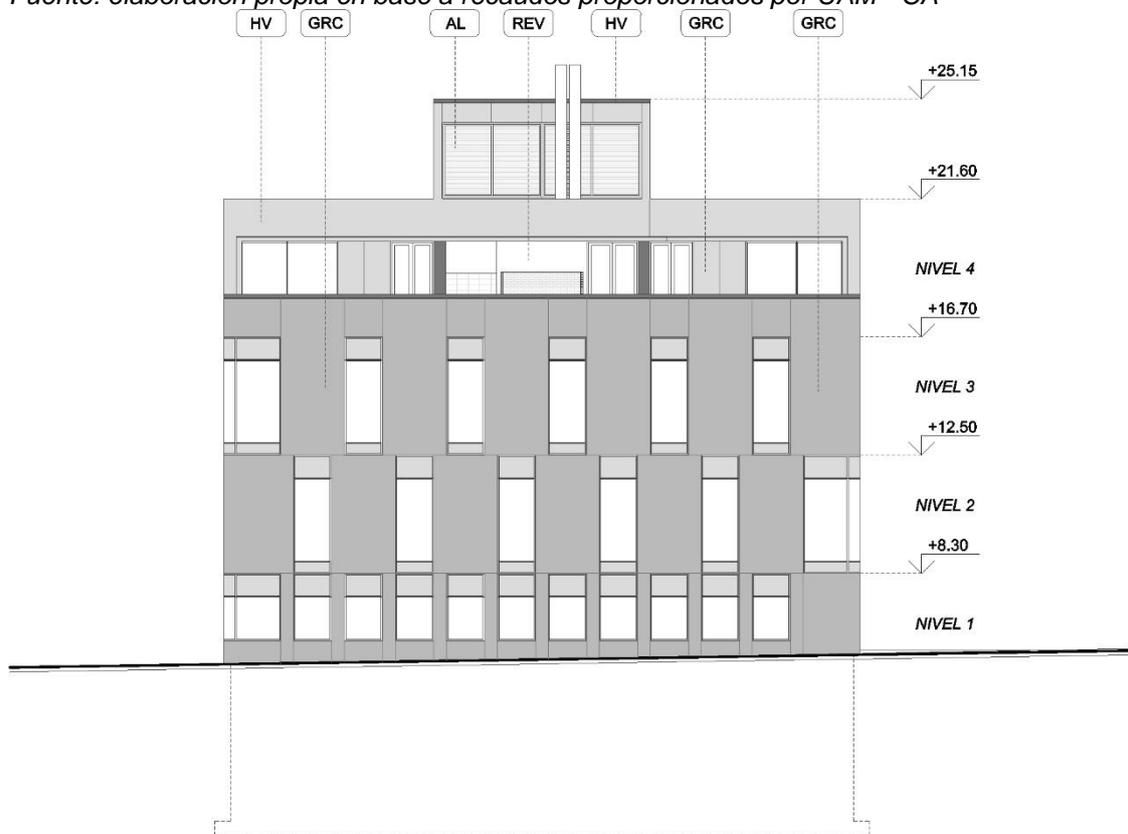


Fig. 13. Fachada Norte.

Fuente: elaboración propia en base a recaudos proporcionados por UAM - CA

En este edificio se emplearon paneles combinados con un bastidor de acero galvanizado que permite cubrir superficies mayores. Se trata de paneles autoportantes fabricados a medida, formados por una piel de GRC combinada con un bastidor de acero galvanizado. La piel de GRC tiene un espesor de 1.00cm; el bastidor se compone de tubos rectangulares de acero galvanizado dispuestos en un marco perimetral y montantes verticales, los paneles resultantes tendrán un espesor estándar de 12.00cm.

Según el proveedor (Astori, 2021) los tipos de junta usuales en los paneles de GRC pueden ser:

a) Juntas rellenas con material sellante, estancas. Los cantos del panel de GRC presentarán la forma adecuada para que las juntas resultantes de la unión entre paneles y de estos con elementos de la fachada, una vez selladas y acabadas, sean estancas al aire y al agua. Las siliconas adecuadas poseen capacidad a la extensión y compresión. Se coloca sobre un cordón de respaldo de espuma de polietileno de célula cerrada no adherente a la masilla para limitar la profundidad del sellado.

b) Juntas secas, no estancas. Consiste en separar las placas una distancia dada a modo de generar las juntas. Esta solución permite mayor movilidad para el dimensionado de la junta ya que no responde a soluciones de impermeabilidad.

En este proyecto y dada la conformación del muro se han sellado las juntas.

Respecto a los planos vidriados estos están conformados por termo paneles de doble vidriado hermético conformados por cristal exterior de 8mm, separador de 12mm y cristal interior de 4+4mm, hay sectores de los vidriados que están conformados por vidrio opacificado.

La cubierta está resuelta por losa tradicional de hormigón armado de 22.00cm de espesor, aislación de 5.00cm y relleno con pendientes para evacuación de pluviales de espesor variable.

Las superficies de fachadas expuestas están conformadas por paneles opacos GRC, vidriados transparentes, vidriados opacificados, y zonas de hormigón visto en el cuarto nivel donde se conforma la terraza.

En conclusión, se ha optado por el análisis de este edificio al considerarlo un elemento clave dentro de un programa arquitectónico de vanguardia que permite —por sus características— realizar un análisis y estudio del desempeño de las FVO en este edificio de oficinas.

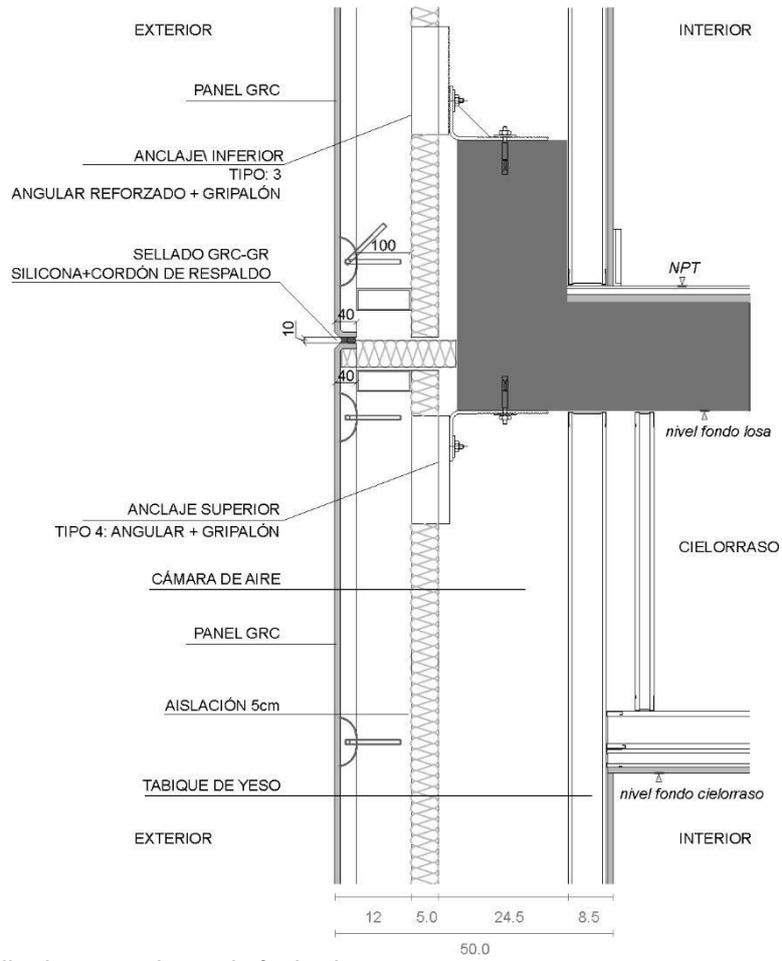


Fig. 14. Detalle de cerramiento de fachada

Fuente: elaboración propia en base a recaudos proporcionados por UAM - CA

CAPÍTULO V: ANÁLISIS BIOCLIMÁTICO DEL CLIMA DE MONTEVIDEO

La ciudad de Montevideo se ubica en la latitud 34°50' S, longitud 56° 12' O. De acuerdo a la clasificación climática de Koppen "Cfa": tipo "C" por ser un clima Templado, moderado y lluvioso; tipo "f" por tener una temperie húmeda; y tipo "a" por presentar temperatura del mes más cálido superior a 22°C; Para la norma de zonificación climática nacional UNIT 1026:99 (UNIT, 1999), Montevideo pertenece a la zona IVb templada fría.

RESUMEN DE DATOS METEOROLÓGICOS	UBICACIÓN												
	Montevideo, URY 34.83° Sur, 56.01° Oeste, Hora media de Greenwich -3 Datos de TMY de -WMO Station Number, Elev. 33m												
MEDIAS MENSUALES	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SET	OCT	NOV	DIC	
Radiación global Horiz. (promedio por hora)	534	486	404	345	242	219	218	288	346	436	459	541	Wh/m ²
Radiación directa normal (promedio por hora)	540	503	409	437	284	314	294	347	376	446	468	547	Wh/m ²
Radiación difusa (promedio por hora)	160	149	150	117	114	97	96	109	128	143	140	155	Wh/m ²
Radiación global Horiz. (máx. por hora)	1079	1033	942	761	600	500	568	720	875	982	1056	1081	Wh/m ²
Radiación directa normal (máx. por hora)	963	941	906	846	788	751	801	851	893	920	944	962	Wh/m ²
Radiación difusa (máx. por hora)	486	471	433	357	281	240	261	314	362	447	478	495	Wh/m ²
Radiación global Horiz. (prom. diario total)	7519	6488	4943	3835	2469	2129	2176	3101	4095	5657	6365	7740	Wh/m ²
Radiación directa normal (prom. diario total)	7602	6716	5003	4839	2906	3051	2927	3736	4449	5788	6491	7826	Wh/m ²
Radiación difusa (prom. diario total)	2256	1988	1839	1312	1165	942	964	1179	1516	1855	1946	2222	Wh/m ²
Temperatura bulbo seco (promedio mensual)	22	21	20	17	14	10	10	11	13	15	19	21	°C
Temperatura punto de rocío (promedio mensual)	16	16	16	13	10	7	6	6	10	10	13	14	°C
Humedad relativa (promedio mensual)	73	73	78	78	79	84	79	76	80	73	70	69	%
Dirección del viento (modo mensual)	120	120	110	120	20	300	20	20	150	110	30	120	grados
Velocidad del viento (promedio mensual)	4	4	4	4	5	4	5	5	5	4	4	5	m/s
Temperatura del suelo (prom. mensual 3 prof.)	20	19	18	17	14	12	12	12	14	15	17	19	°C

Tabla 11. Resumen de carta bioclimática del Climate Consultant para Montevideo
Fuente: elaboración propia en base a resultados obtenidos con el "software" "Climate Consultant 6.0".

En la Tabla 11 se presentan los parámetros climáticos para la localidad de estudio, donde se puede observar que los meses representativos de los períodos de invierno y verano son enero y julio por ser en dichos meses donde se alcanzan las temperaturas máximas y mínimas respectivamente. Por tanto, las simulaciones térmicas del desempeño de la FVO se realizarán también en condiciones de verano y de invierno para poder evaluar su incidencia en ambas estaciones. Debido a que el diagrama psicrométrico no brinda información sobre los niveles de radiación solar o de velocidad de viento, a continuación, se realiza un análisis de los valores horarios de dichas variables, sumadas a la temperatura de bulbo seco como referencia. Los gráficos se obtienen con el mismo "software" "Climate Consultant 6.0", para lo cual se promedian todos los días del mes y se determina un "día típico" por cada uno de los doce meses del año. Es importante destacar que estos días típicos no reflejan condiciones extremas sino el comportamiento de un día promedio del mes considerado. De los gráficos de la figura 16 se puede apreciar que enero es el mes donde se presentan las mayores temperaturas de bulbo seco alcanzando los 26°C al medio día; la temperatura más baja del mes se encuentra en el entorno de los 18.5°C sobre las 04:30am. En enero, se registra una diferencia entre la temperatura máxima y mínima del día de 7.5°C. Este es también el mes donde se registran los mayores niveles de radiación global en el plano horizontal alcanzando los 900Wh/m² en horas del mediodía.

En cambio, en el mes de julio observamos las temperaturas de bulbo seco más bajas: la mínima en el entorno de 0°C sobre las 07:00 am y la máxima de 14°C alrededor de las 02:00 pm. En este mes se observan los menores niveles de radiación solar global en el plano horizontal para el año con un valor máximo de -380 Wh/m^2 sobre el mediodía—. En julio, se registra una diferencia entre la temperatura máxima y mínima del día de 14°C según figura 15.

Dadas las características climáticas existe una amplitud térmica significativa tanto en el periodo estacional como amplitud térmica diaria. Por esta razón, es importante que las edificaciones puedan responder a estas condiciones variables.

En los gráficos de la figura 16 se observa el comportamiento horario promedio de la velocidad y dirección del viento para cada mes. La dirección del viento se mide en grados en el sentido de las agujas del reloj desde el norte, por lo que el viento que viene del norte tiene una dirección de 0°; desde el este tiene 90°; si viene desde el sur tiene una dirección de 180° y desde el oeste 270° (Climate.OneBuilding.Org, 2021).

En el mes de enero la velocidad del viento oscila entre 3.7 y 6.5 m/s, con valores más altos entre las 11:00 y las 17:00hs; en este periodo, la dirección predominante es entre 150° y 170°, correspondiente a dirección SSE.

Para el mes de julio la velocidad del viento oscila entre 4.2 y 6.2 m/s, dándose los valores más altos entre las 10:00 y las 15:00hs; en este período la dirección predominante es también entre 150° y 170°, correspondiente a la dirección SSE. Es importante analizar la velocidad de viento por dos razones: en verano, puede favorecer el uso de ventilación natural, estrategia que fue sugerida por el análisis bioclimático previo), mientras que en invierno puede producir pérdidas de calor no deseadas a través de la envolvente, que deberán ser contrarrestadas con un incremento de la resistencia térmica de la misma mediante la inclusión de materiales aislantes.

Como conclusiones preliminares se puede establecer que los valores de velocidad y dirección predominante del viento permitirían hacer uso de la ventilación natural en el edificio. El contexto actual de pandemia generado por el SARS-CoV-2 ha modificado también los requerimientos de ventilación en espacios cerrados, y poder abrir ventanas sería una propuesta interesante no solo desde el punto de vista térmico sino también sanitario. De acuerdo a las direcciones del viento predominantes se podría pensar en reacondicionar las aberturas de las fachadas Sur y Este para que permitan su apertura. Se debe considerar que para que se produzca una ventilación óptima deben haber puntos de entrada y de salida de aire y tener en cuenta, además, que la ventilación cruzada siempre es más efectiva, aunque muchas veces no sea posible debido a la distancia entre dichos puntos de entrada y salida.

Por otro lado, tal como ha sido analizado en el marco teórico, el viento influye en la eficiencia de las FVO y dada la orientación del edificio y la dirección del viento preponderante las fachadas que se ventilarían más son las ubicadas en los cuadrantes sur y este.

Respecto a las áreas vidriadas, es importante tener en consideración cuál es la cantidad de radiación solar directa incide en cada orientación. Los gráficos de la figura 17 permiten definir a priori que las ventanas situadas en la fachada norte son importantes en invierno para captar radiación solar y complementar los sistemas de calefacción.

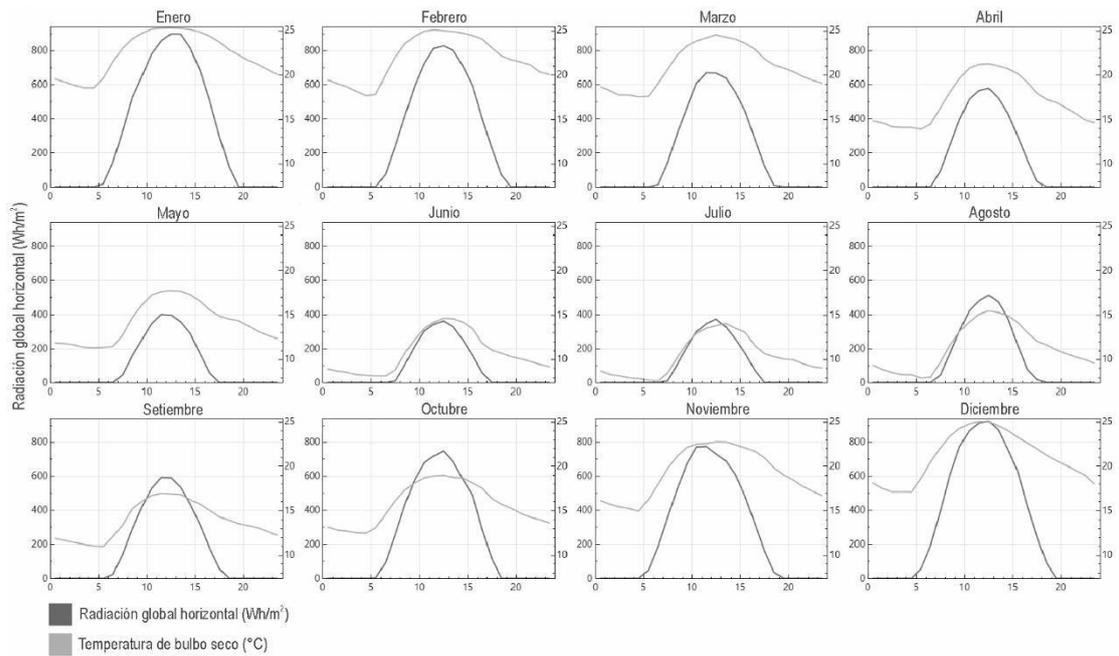


Fig. 15. Gráfico de radiación global en plano horizontal y temperatura de bulbo seco anual
Fuente: elaboración propia en base a "DataViewer - Simedif" con datos de AMT Montevideo

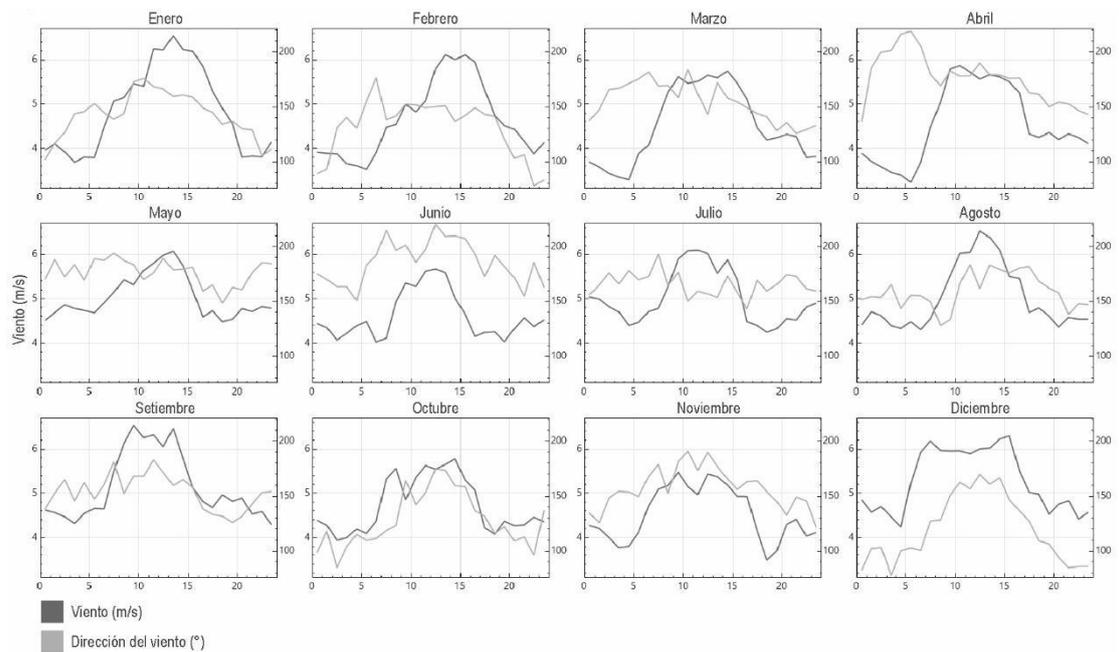


Fig. 16. Gráfico de velocidad de viento y dirección de viento anual
Fuente: elaboración propia en base a "DataViewer - Simedif" con datos de AMT Montevideo

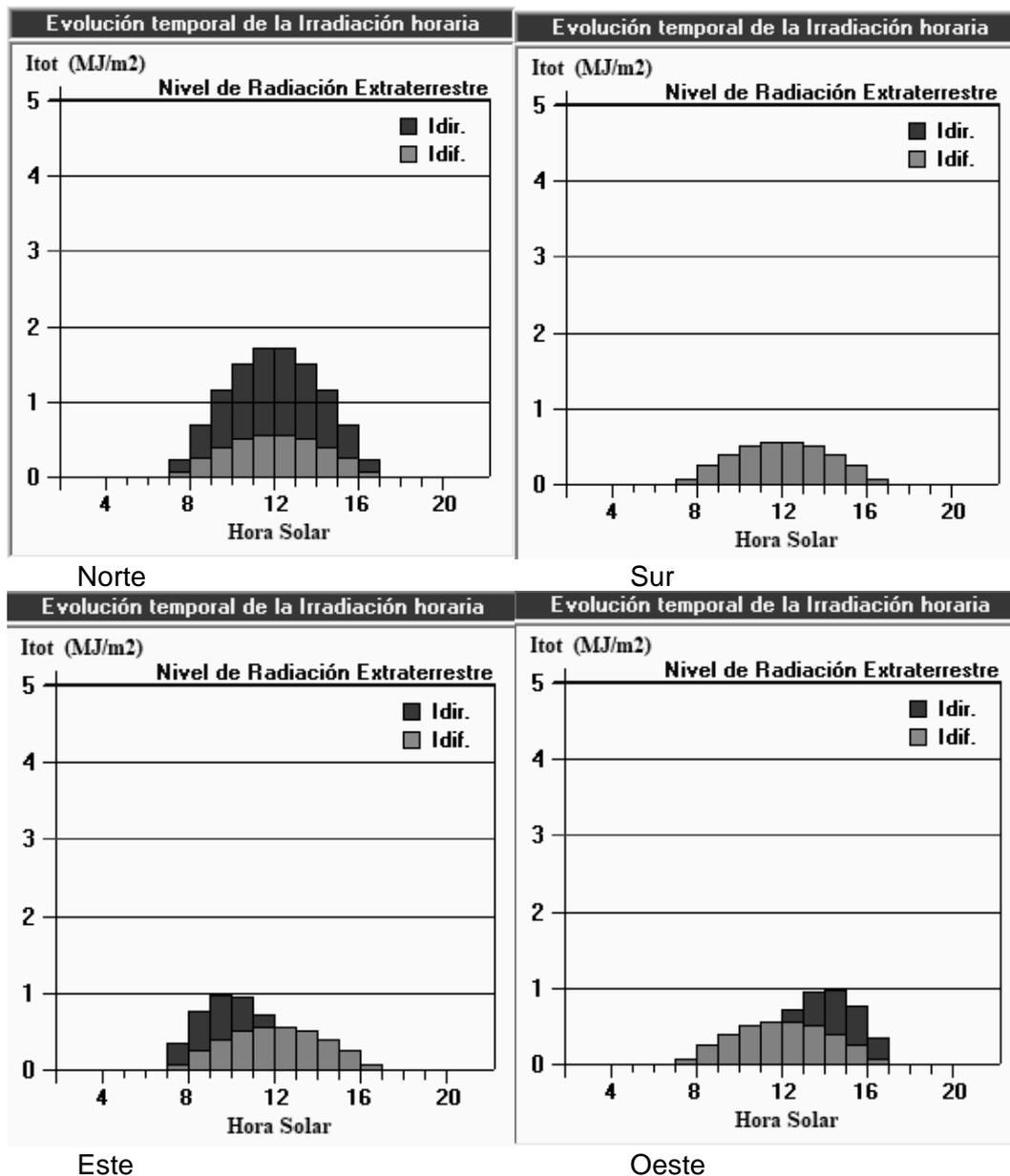


Fig. 17. Radiación solar directa (en negro) y difusa (en gris) sobre planos verticales con orientación norte, sur, este y oeste, para distintas horas de un día de Julio en Montevideo. Gráficos obtenidos con el "software" Geosol. (Hernández, 2021)

En las figuras 18a y 18b, se presenta el diagrama psicrométrico de los meses estudiados, y la incidencia de las estrategias adecuadas.

En el mes de enero, se puede observar un 19.9% de horas en confort, 148 horas en el mes, y donde las estrategias planteadas de mayor incidencia son: enfriamiento por ventilación natural —41.8%—, enfriamiento por ventilación mecánica —40.2%— y sombreado de áreas vidriadas —40.1%—. Esto significa que, para el clima de verano de Montevideo, es importante considerar en el diseño el sombreado de áreas vidriadas (con parasoles, aleros, pérgolas o cualquier otro elemento de sombreado y la incorporación de ventilación (ya sea natural o mecánica). Como primera estrategia en el período caluroso se buscan evitar las ganancias de calor y en segundo lugar disipar el calor del interior mediante ventilación. La ventilación tiene dos efectos en términos

energéticos: disipar el calor si la temperatura exterior es al menos 2°C menor que la interior, y además el efecto de confort sobre los usuarios, en el caso de la ventilación mecánica sin renovación de aire, solamente tiene efecto sobre el confort de los usuarios sin afectar la temperatura del aire. Las condiciones favorables de temperatura exterior no demasiado altas, permiten que, con un adecuado sistema de ventilación, se pueda utilizar el mismo aire exterior para refrescar los edificios.

Por otra parte, el edificio en estudio no incluye ventilación natural, puesto que su envolvente no contiene ventanas que puedan abrirse. Sin embargo, bajo las condiciones sanitarias actuales debido a la pandemia, es una estrategia que debiera considerarse en vistas de su doble beneficio, térmico y sanitario, en un plan de reacondicionamiento futuro del edificio.

En el mes de Julio, se tienen en confort un total de 15 horas en el mes, lo que equivale al 2.0%, y las estrategias principales que podrían incluirse en el diseño del edificio son: calentamiento con deshumidificación si necesita —49.9%—, ganancias internas de calor —29.3%— y ganancia solar directa con baja masa térmica —15.6%—. El análisis de invierno muestra que las condiciones climáticas son frías y que es necesario incluir en el diseño tanto ganancia solar directa (áreas vidriadas al Norte para colección de la radiación solar) como mantener el calor generado al interior ganancias internas de calor. Aún incluyendo estas ganancias, el edificio requerirá de calefacción auxiliar (con deshumidificación) para alcanzar las condiciones de confort.

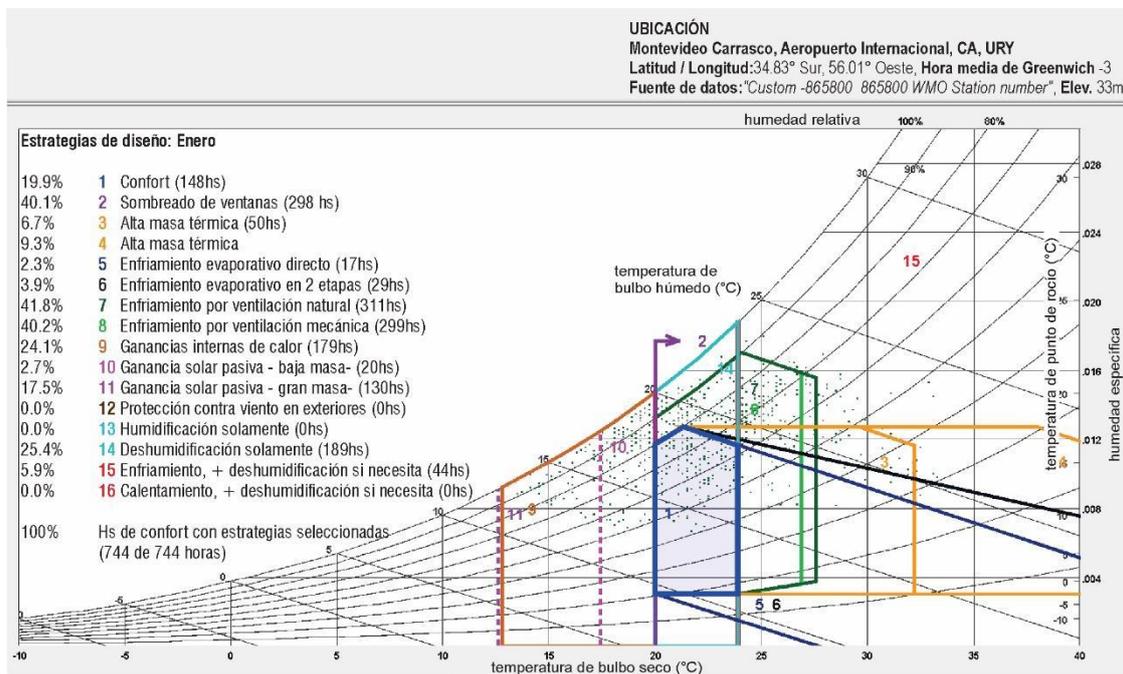


Fig. 18 a. Diagrama psicrométrico del mes de enero, Montevideo, Uruguay
 Fuente: elaboración propia en base a "Climate Consultant6.0"

UBICACIÓN
 Montevideo Carrasco, Aeropuerto Internacional, CA, URY
 Latitud / Longitud: 34.83° Sur, 56.01° Oeste, Hora media de Greenwich -3
 Fuente de datos: "Custom -865800 865800 WMO Station number", Elev. 33m

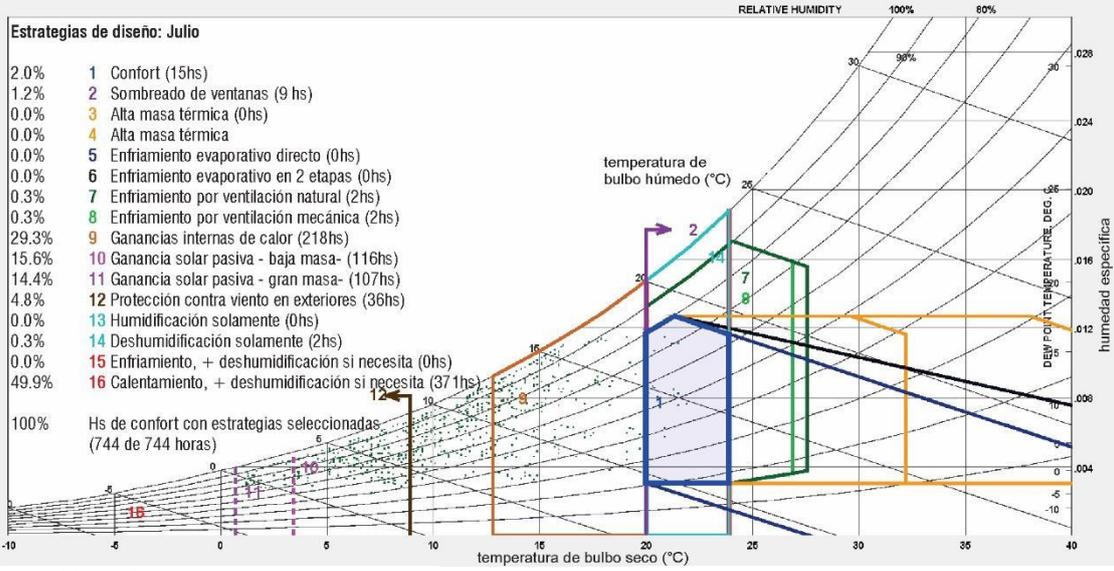


Fig. 18 b. Diagrama psicrométrico del mes de julio, Montevideo, Uruguay
 Fuente: elaboración propia en base a "Climate Consultant6.0"

CAPÍTULO VI: SIMULACIÓN DEL CASO BASE

En una primera instancia no se consideró la envolvente como una FVO, sino que se simuló el edificio en sus condiciones actuales, con su envolvente tal cual ha sido ejecutada con el fin de conocer y situar al edificio en un rango de consumo energético tanto para condiciones de verano y de invierno; a estas simulaciones se las ha denominado “Caso Base Invierno” y “Caso Base Verano”.

6.1 ANÁLISIS DE RESULTADOS CASO BASE INVIERNO

En la figura 19 se encuentran graficados los datos obtenidos mediante SIMEDIF V2.0, de las temperaturas interiores de las distintas zonas térmicas del edificio analizado y la temperatura exterior, para el caso de invierno –mes de julio–, los valores analizados corresponden al edificio sin calefacción ni refrigeración. Los mismos se encuentran resumidos y analizados en la tabla 12.

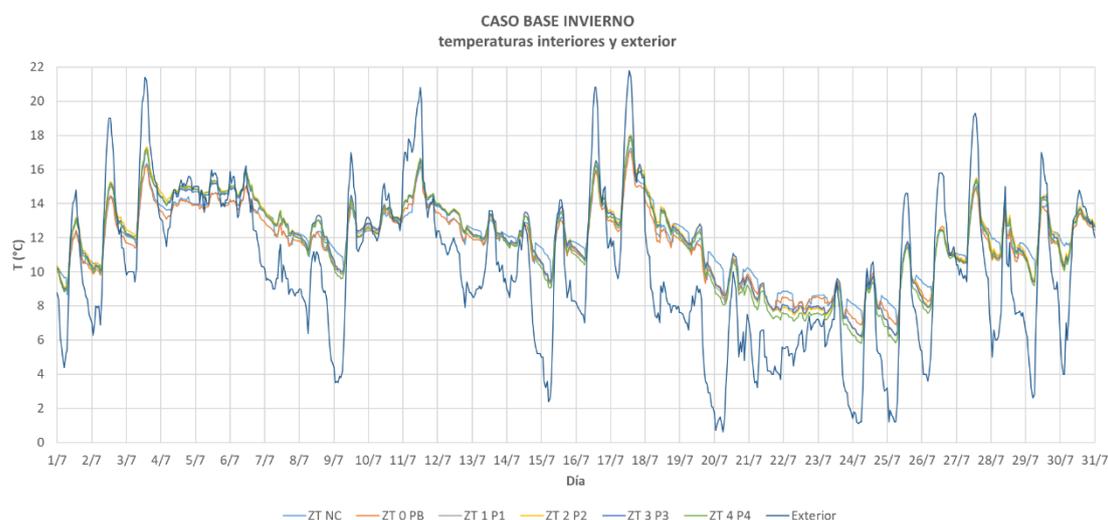


Fig. 19. Resultados de simulación SIMEDIF para Julio

Fuente: elaboración propia en base a resultados obtenidos de simulación.

CASO BASE INVIERNO -JULIO-							
	EXT	ZTNC	ZT 0 PB	ZT 1 P1	ZT 2 P2	ZT 3 P3	ZT 4 P4
Temperatura mín. absoluta (°C)	0.60	6.66	6.87	6.18	6.15	6.20	5.79
Temperatura máx. absoluta (°C)	21.80	17.25	17.02	17.76	18.07	17.96	17.86
Temperatura promedio (°C)	10.33	11.97	11.71	11.96	12.10	12.03	11.86
Temperatura mín. diaria promedio (°C)	6.32	10.48	10.35	10.50	10.62	10.54	10.31
Temperatura máx. diaria promedio (°C)	14.90	13.46	13.35	13.70	13.88	13.82	13.68
Amplitud Termica diaria (°C)	8.58	2.98	3.00	3.20	3.26	3.28	3.37
Diferencia entre las medias interior y exterior (°C)		1.64	1.38	1.63	1.77	1.70	1.53
Atenuación de amplitud		0.35	0.35	0.37	0.38	0.38	0.39
Atenuación de amplitud (%)		65	65	63	62	62	61

Tabla 12. Caso Base - resultados de simulación SIMEDIF para Julio

Fuente: elaboración propia en base a resultados obtenidos de simulación.

La simulación del caso base de invierno evidenció que las temperaturas interiores de las zonas térmicas se encuentran por debajo del rango de confort térmico en invierno, situándose las temperaturas medias en valores que van de los 11.9°C a los 12.1°C, estos valores junto con los demás tabulados y las curvas de la gráfica nos muestran que

todas las zonas térmicas tienen un comportamiento térmico muy similar en el período analizado.

Para el mes de julio la temperatura exterior promedio es de 10.3°C, la temperatura diaria mínima promedio es de 6.3°C y la máxima diaria promedio es de 14.9°C.

Los valores de temperaturas medias interiores y exterior son cercanos, en el rango de 10.3°C y 12.1°C, lo que puede ser un indicio de que hay poca ganancia solar a través de las áreas vidriadas ya que la diferencia entre las temperaturas medias interior y exterior es aproximadamente de 1.5°C.

La amplitud térmica diaria –diferencia entre temperatura máxima diaria promedio y mínima diaria promedio– para el exterior es de 8.6°C y para las zonas térmicas interiores se obtienen valores que oscilan entre 3.0°C y 3.4°C. La zona térmica donde se evidencia menor amplitud es la correspondiente al núcleo central, la cual tiene la particularidad de estar en el centro del edificio rodeada prácticamente por todos sus lados por las demás zonas térmicas. En contraposición, la zona térmica con mayor amplitud térmica corresponde a la zona térmica 4, la cual es la que cuenta con menores áreas vidriadas, sobre todo en la fachada oeste –4m² de vidriado–.

Respecto a la amplitud se puede decir que los valores no son demasiado elevados, ya que generalmente se diseña para obtener valores de amplitud no mayores a 3.0°C, por lo que no estaríamos en el caso de carencia de masa térmica en el edificio.

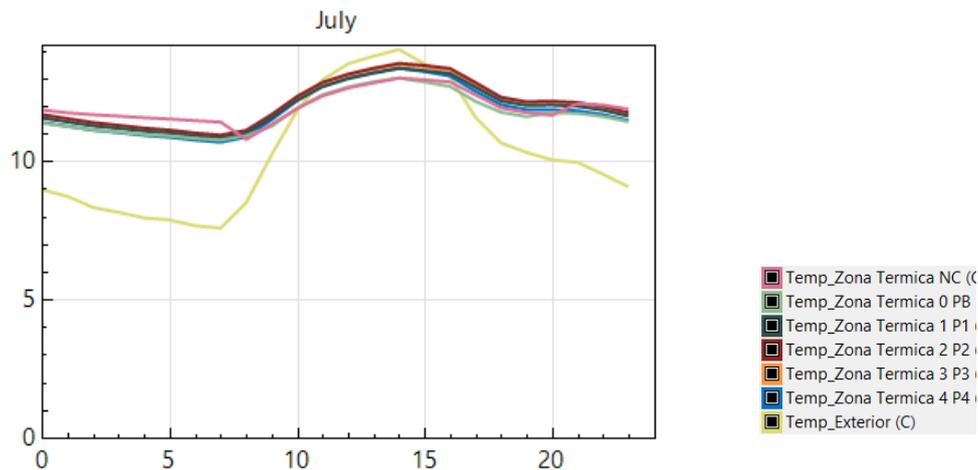


Fig. 20. Perfil de temperaturas del mes de Julio
Fuente: SIMEDIF V2.0

En la figura 20, correspondiente al perfil de temperaturas del mes de julio se observa graficado el perfil promediado de cada una de las horas del período de todas las temperaturas interiores y exteriores; en el eje de las ordenadas se grafican las temperaturas en °C y en las abscisas las horas. Las temperaturas mínimas exteriores se dan sobre las 07:00 h y las máximas sobre las 14:00 h; las temperaturas mínimas y máximas de las diferentes zonas térmicas se dan a iguales horas. En las zonas interiores los valores máximos de temperatura en el perfil del mes se encuentran en el rango horario en que el edificio está en funcionamiento.

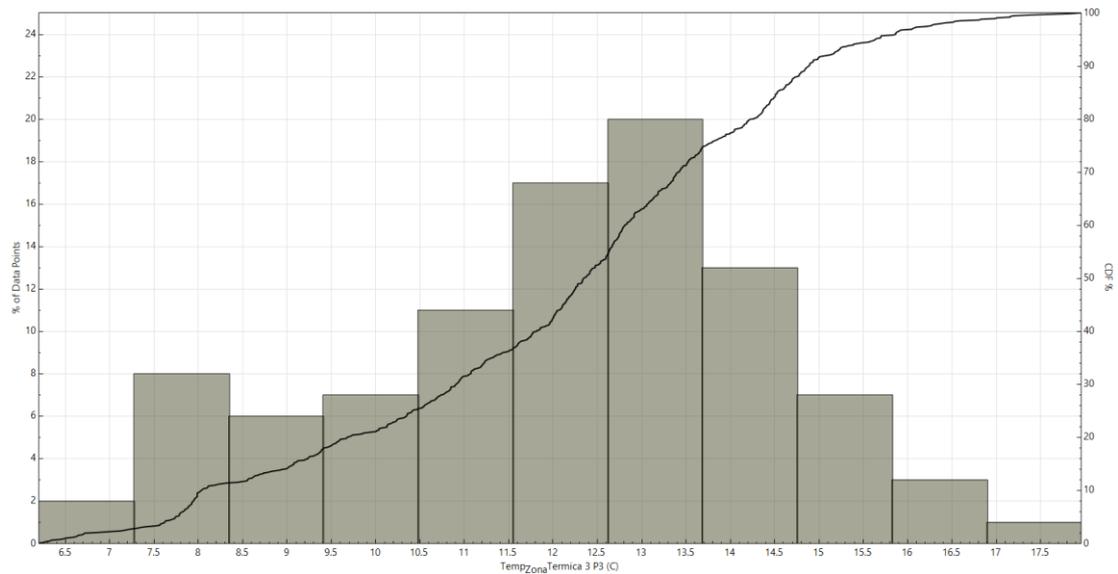


Fig. 21. Histograma de frecuencia de temperaturas de la zona térmica 2
Fuente: SIMEDIF V2.0

El histograma de frecuencia de temperaturas de la zona térmica 2 –piso de oficinas intermedio–(Fig. 21) indica que en el 20% del período las temperaturas de esa zona se sitúan entre los 12.6°C y 13.7°C, hay muchas horas por debajo del rango de confort, lo que implica que habrá que mejorar el diseño.

La conclusión de la simulación para el caso base de invierno sin es que la ganancia solar no es suficiente para alcanzar el confort térmico, por lo que se va a requerir calefacción auxiliar en invierno.

6.1.1 Cálculo de energía auxiliar

Dado que el análisis del punto anterior evidenció que para el caso base de invierno es necesario incorporar energía auxiliar, en este apartado se buscará cuantificar cuánta energía auxiliar será necesaria incorporar –con estas condiciones de envolvente– para las zonas térmicas correspondientes a las oficinas.

En los gráficos de las figuras 22 a 26 se muestran los resultados de cuánta energía auxiliar es necesaria incorporar en las zonas térmicas de oficinas para alcanzar los 21°C de temperatura de confort en el rango horario que el edificio está en funcionamiento.

Los gráficos evidencian que la carga térmica que es necesaria agregar en el momento más comprometido de invierno para la zona térmica 0 PB es de 44.2 kW, para la ZT 1 P1 55.3 kW, para ZT 2 P2 54.8 kW, para ZT 3 P3 55.0 kW y para ZT 4 P4 son necesarios 31.4 kW.

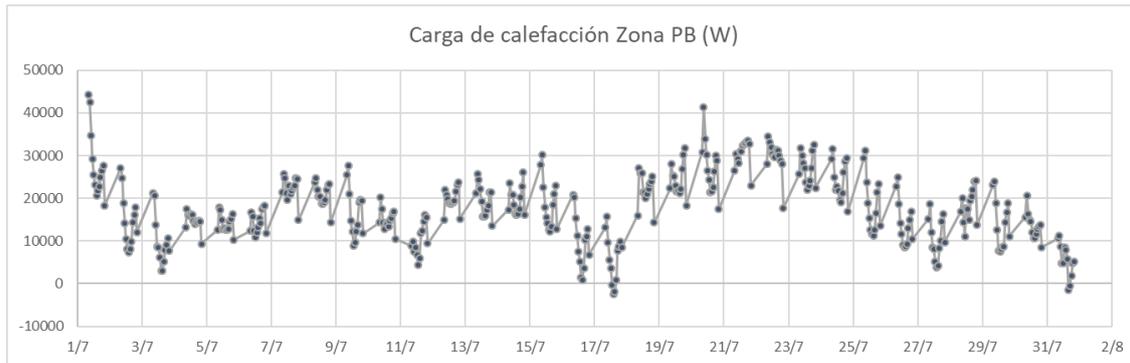


Fig. 22. Gráfico de energía auxiliar para calefaccionar ZT 0 PB.
Fuente: Elaboración propia en base a resultados de SIMEDIF V2.0

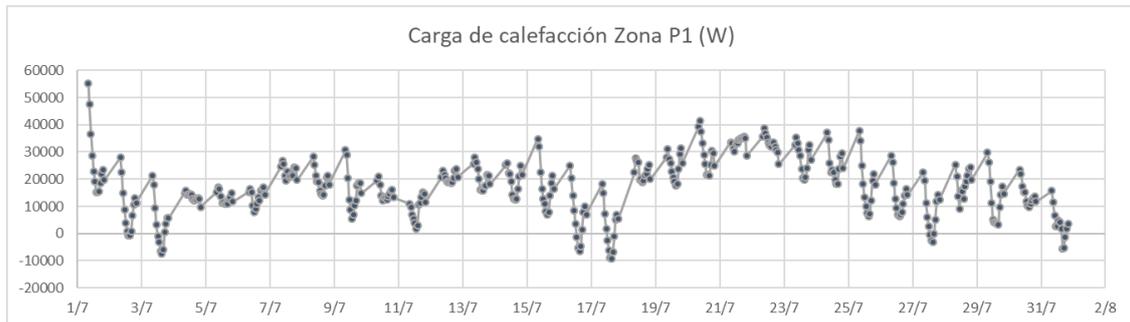


Fig. 23. Gráfico de energía auxiliar para calefaccionar ZT 1 P1.
Fuente: Elaboración propia en base a resultados de SIMEDIF V2.0

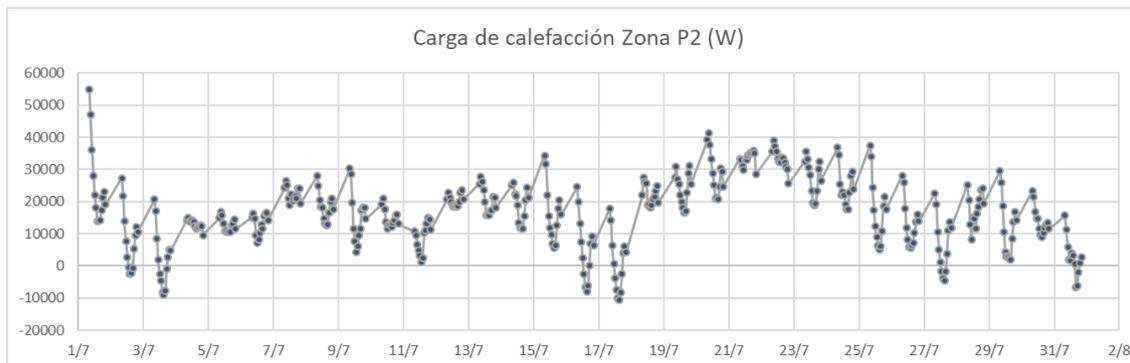


Fig. 24. Gráfico de energía auxiliar para calefaccionar ZT 2 P2.
Fuente: Elaboración propia en base a resultados de SIMEDIF V2.0

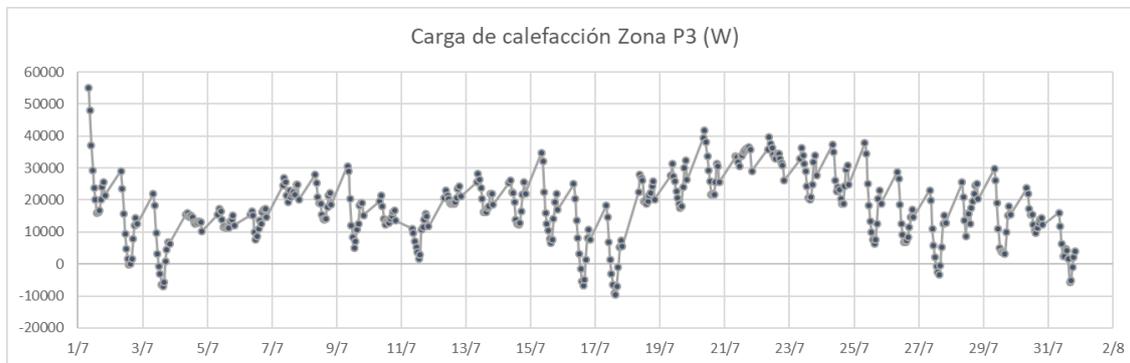


Fig. 25. Gráfico de energía auxiliar para calefaccionar ZT 3 P3.
Fuente: Elaboración propia en base a resultados de SIMEDIF V2.0

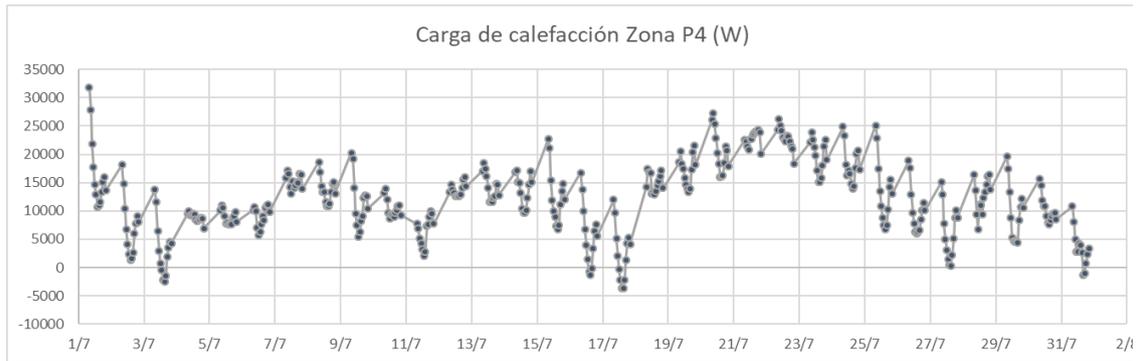


Fig. 26. Gráfico de energía auxiliar para calefaccionar ZT 4 P4.
Fuente: Elaboración propia en base a resultados de SIMEDIF V2.0

Análisis de carga de calefacción			
	datos de simulación		
	carga de calefacción kW	superficie considerada m ²	carga calefacción kW/m ²
ZT 0 PB	17,8	351,0	0,05
ZT 1 P1	17,1	329,0	0,05
ZT 2 P2	16,5	329,0	0,05
ZT 3 P3	17,4	329,0	0,05
ZT 4 P4	17,8	176,0	0,10

Tabla 13. Análisis de las cargas de calefacción según la simulación en SIMEDIF –valores medios–.

Fuente: elaboración propia en base a resultados obtenidos de simulación

En la tabla 13 se muestran los resultados obtenidos en la simulación para las diferentes zonas térmicas evidencian cargas de calefacción de entre 0.05 kW/m² a 0.10kW/m², siendo la zona térmica 4 la que más energía auxiliar requiere para lograr las condiciones de confort; lo cual es esperable ya que es la que cuenta con mayor superficie expuesta al exterior.

6.1.2 Cálculo de confort

En este apartado se toma para el análisis una planta de oficinas intermedia –ZT 2 P2– para calcular el nivel de confort de los usuarios en este espacio.

Para el análisis se muestran en las figuras 27 y 28 los resultados de los cálculos de confort para la zona térmica sin termostatar y para la zona térmica termostata en 21°C.

Como condiciones de cálculo se tomó un índice de arropamiento de 1 y una tasa metabólica de 1.6. Es importante destacar que ASHRAE considera para invierno este índice de arropamiento Clo=1, que puede distar de las costumbres habituales en viviendas de nuestro país, en las que es costumbre utilizar más de una prenda de abrigo en el invierno, aún en los espacios interiores.

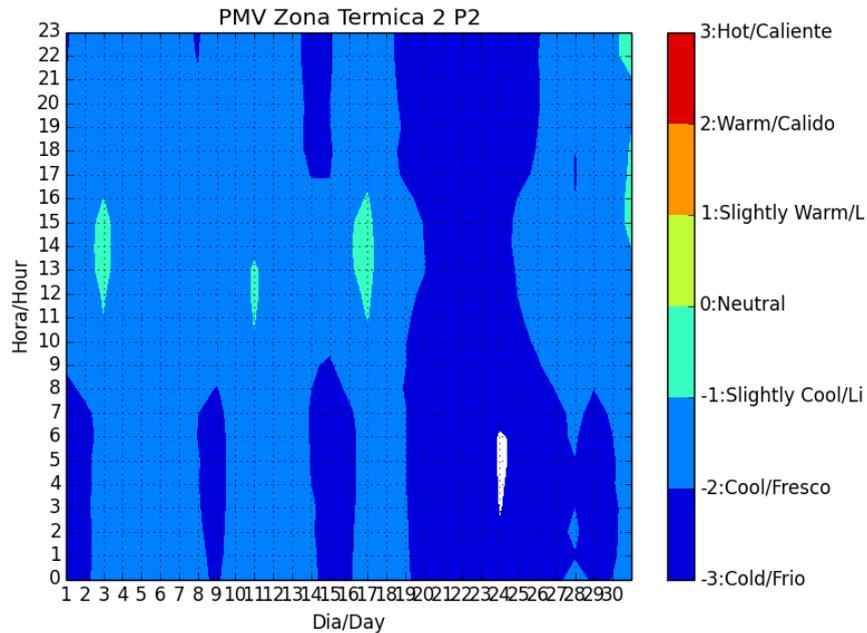


Fig. 27. Gráfico de sensación subjetiva de confort en ZT 2 P2 sin termostatar
Fuente: SIEMEDIF V2.0

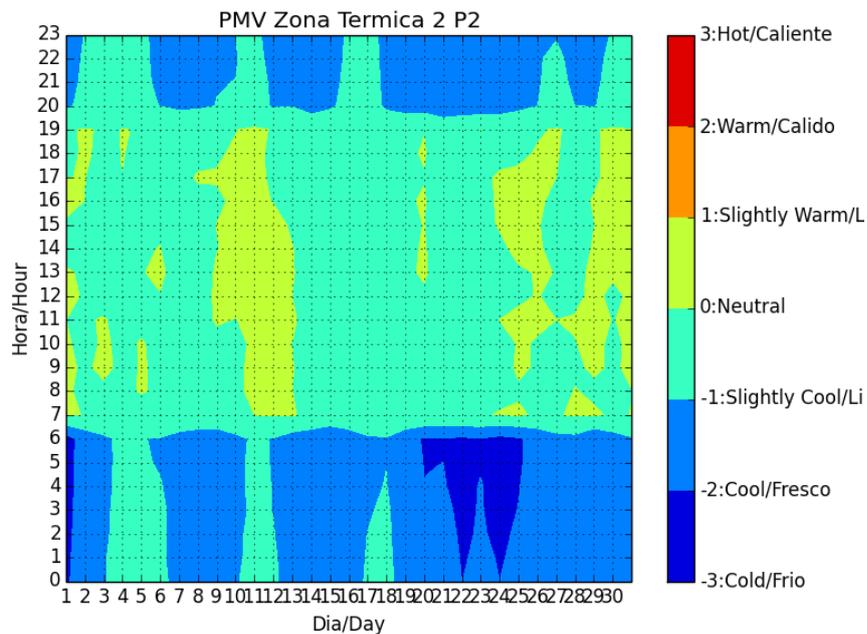


Fig. 28. Gráfico de sensación subjetiva de confort en ZT 2 P2 termostaizada
Fuente: SIEMEDIF V2.0

Las figuras muestran que para la zona térmica 2 en el período de funcionamiento del edificio los usuarios perciben el espacio mayormente fresco, en algunos días –del 20 a 28 de julio– que son los días más fríos del período la sensación es de frío. Luego se visualizan algunos períodos aislados en horas cercanas posteriores al medio día donde la percepción es que el entorno está ligeramente fresco. En términos generales, como era de esperar, tras los resultados arrojados en la simulación los usuarios dentro del espacio lo perciben como frío.

En la figura 28 se percibe que la zona ya termostatazada se vuelve más cálida y en el período de funcionamiento del edificio, el cuál coincide con el horario de funcionamiento de la calefacción, la sensación predominante es de ligeramente fresco, considerándose esta dentro del rango de confort. Se observan también algunos días correspondientes a los más cálidos del período donde la sensación por parte de los usuarios es neutral. En este gráfico se puede visualizar además que en los horarios en que no funciona la calefacción no se llega a valores tan bajos de sensación de frío como en la figura 27, lo que da la pauta de que el edificio es capaz de almacenar parte de la energía agregada para calefaccionar.

6.2 ANÁLISIS DE RESULTADOS CASO BASE VERANO

En la figura 29 se encuentran graficados los datos obtenidos mediante SIMEDIF V2.0, de las temperaturas interiores de las distintas zonas térmicas del edificio analizado y la temperatura exterior, para el caso de verano –mes de enero– los valores analizados corresponden al edificio sin calefacción ni refrigeración. Los mismos se encuentran resumidos y analizados en la tabla 14.

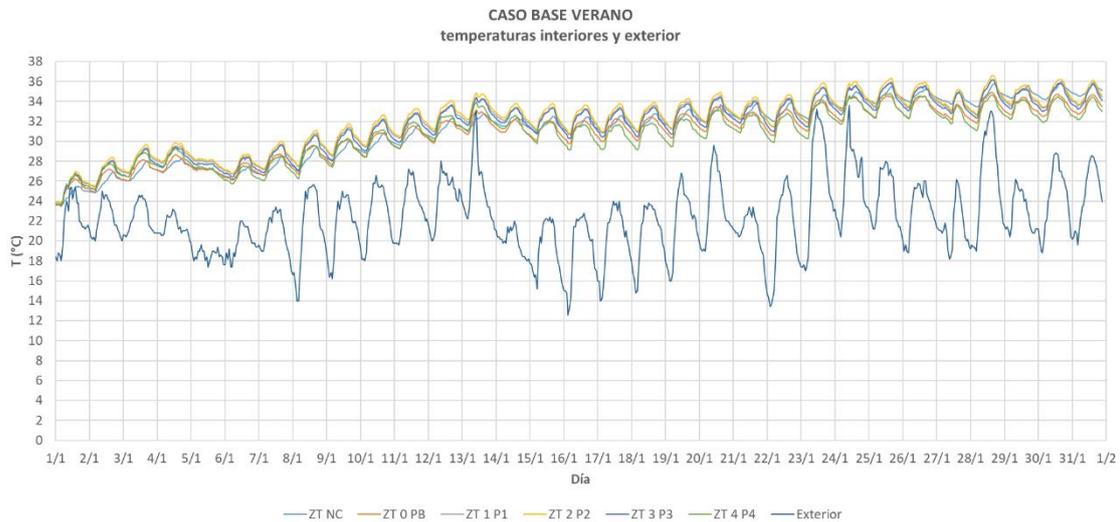


Fig. 29. Resultados de simulación SIMEDIF para Enero

Fuente: elaboración propia en base a resultados obtenidos de simulación.

CASO BASE VERANO -ENERO-							
	EXT	ZTNC	ZT 0 PB	ZT 1 P1	ZT 2 P2	ZT 3 P3	ZT 4 P4
Temperatura mín. absoluta (°C)	12.60	23.59	23.47	23.72	23.73	23.53	23.57
Temperatura máx. absoluta (°C)	33.60	35.99	34.92	36.18	36.60	36.19	34.80
Temperatura promedio (°C)	22.28	31.16	30.80	31.76	31.98	31.52	30.66
Temperatura mín. diaria promedio (°C)	17.89	30.38	29.57	30.42	30.54	30.08	29.26
Temperatura máx. diaria promedio (°C)	26.26	32.10	31.80	32.93	33.26	32.81	31.79
Amplitud Termica diaria (°C)	8.37	1.72	2.23	2.51	2.72	2.73	2.53
Diferencia entre las medias interior y exterior (°C)		8.88	8.51	9.47	9.70	9.23	8.38
Atenuación de amplitud		0.21	0.27	0.30	0.32	0.33	0.30
Atenuación de amplitud (%)		79	73	70	68	67	70

Tabla 14. Caso base - resultados de simulación SIMEDIF para Enero

Fuente: elaboración propia en base a resultados obtenidos de simulación.

La simulación del caso base de verano evidenció que las temperaturas interiores de las zonas térmicas se encuentran por encima del rango de confort térmico en verano,

situándose las temperaturas medias en valores que van de los 30.7°C a los 32.0°C, estos valores junto con los demás tabulados y las curvas de la gráfica nos muestran que todas las zonas térmicas tienen un comportamiento térmico muy similar en el período analizado. La zona térmica que se presenta como la menos cálida es la ZT4 P4, esto se puede atribuir a que es la zona térmica de oficinas con menores ganancias internas de calor y con menores áreas de vidriado, sobre todo al oeste. Respecto a la ZT 0 PB, se puede notar que a pesar de que es la que más ganancias internas de calor posee presenta menores temperaturas que los demás niveles de oficinas, esto se puede atribuir que todas sus fachadas excepto la sur –totalmente vidriada– se encuentran soterradas, por lo tanto, la incidencia de las ganancias de calor a través de la envolvente se reduce.

Para el mes de enero la temperatura exterior promedio es de 22.3°C, la temperatura diaria mínima promedio es de 17.9°C y la máxima diaria promedio es de 26.3°C, registrándose una temperatura máxima absoluta de 33.6°C en el período.

Los valores de temperaturas medias interiores y exterior están muy alejados, las diferencias entre las medias interiores y exteriores está en el rango de 8.5°C y 9.7°C, lo que puede ser un indicio de que hay demasiada ganancia solar a través de las áreas vidriadas y demasiadas ganancias internas pudiendo incidir, además, la baja transmitancia de la envolvente y la ausencia de masa térmica.

La amplitud térmica diaria –diferencia entre temperatura máxima diaria promedio y mínima diaria promedio– para el exterior es de 8.4°C y para las zonas térmicas interiores se obtienen valores que oscilan entre 1.7°C y 2.7°C. La zona térmica donde se evidencia menor amplitud es la correspondiente al núcleo central al igual que en el caso base de invierno ya que se encuentra totalmente rodeada de zonas térmicas con temperaturas similares.

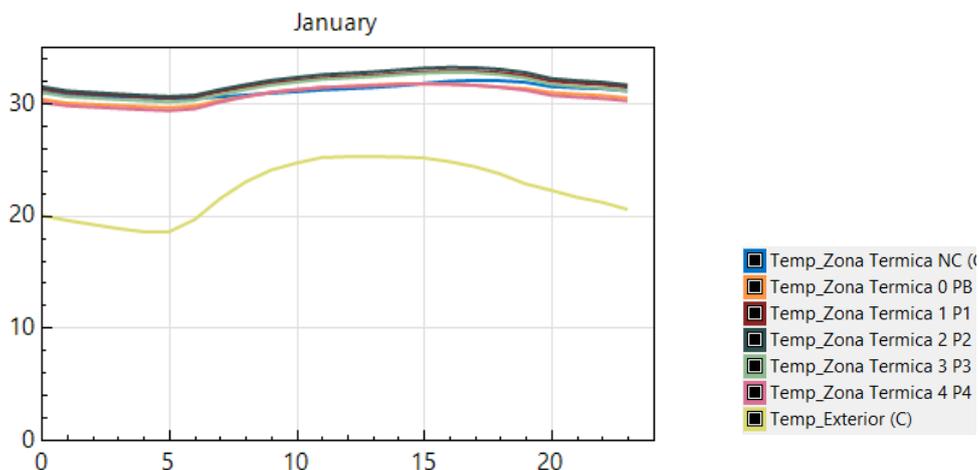


Fig. 30. Perfil de temperaturas del mes de enero
Fuente: SIEMEDIF V2.0

En la figura 30, correspondiente al perfil de temperaturas del mes de enero se observa graficado el perfil promediado de cada una de las horas del período de todas las temperaturas interiores y exteriores; en el eje de las ordenadas se grafican las temperaturas en °C y en las abscisas las horas. Las temperaturas mínimas exteriores se dan sobre las 05:00 h y las máximas sobre el medio día, las temperaturas mínimas de las zonas térmicas se dan a las 05:00 h y las máximas en el entorno de las 17:00 h.

En las zonas interiores los valores máximos de temperatura en el perfil del mes se encuentran en el rango horario en que el edificio está en funcionamiento lo cual repercute directamente en el confort de los ocupantes. En estas curvas se puede

observar, además, que las diferentes zonas térmicas mantienen temperaturas elevadas con poca diferencia entre máximas y mínimas durante todo el período denotando condiciones de desconfort casi constantes.

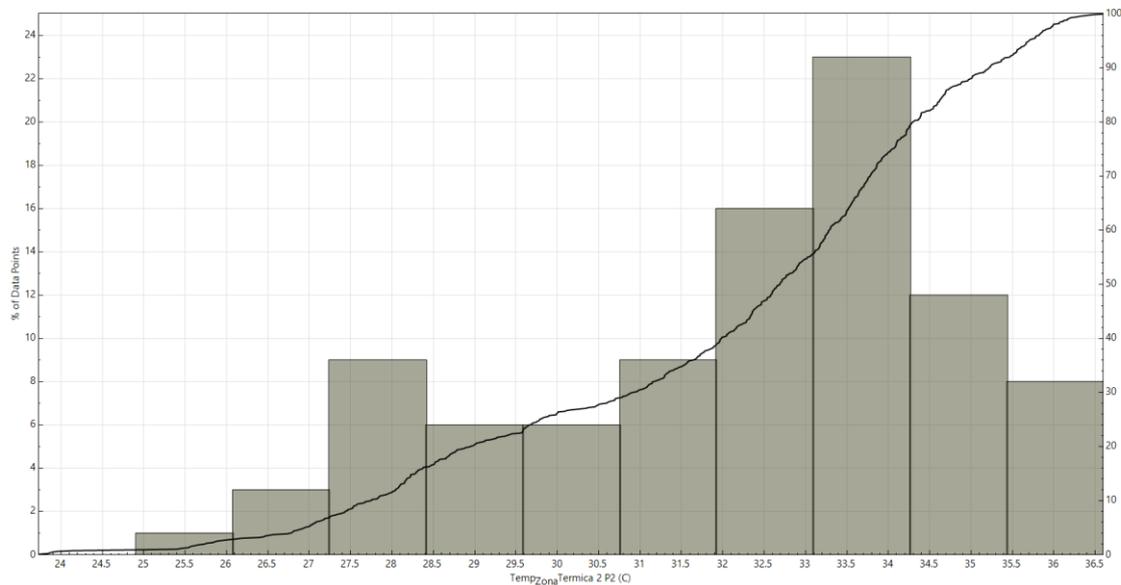


Fig. 31. Histograma de frecuencia de temperaturas de la zona térmica 2
Fuente: SIEMEDIF V2.0

El histograma de frecuencia de temperaturas de la zona térmica 2 –piso de oficinas intermedio– indica que en el 23% del período las temperaturas de esa zona se sitúan entre los 33.1°C y 34.3°C, hay muchas horas por encima del rango de confort, lo que implica que hay que mejorar el diseño (Fig. 31).

La conclusión de la simulación para el caso base de verano sin refrigeración es que la ganancia solar a través de las áreas vidriadas y de la envolvente en conjunto con la ausencia de ventilación generan condiciones que no permiten alcanzar el confort térmico, por lo que se va a requerir energía auxiliar para refrigerar el edificio en verano.

6.2.1 Cálculo de energía auxiliar

Dado que el análisis del punto anterior evidenció que para el caso base de verano es necesario incorporar energía auxiliar, en este apartado se buscará cuantificar la energía auxiliar necesaria –con estas condiciones de envolvente– para las zonas térmicas correspondientes a las oficinas.

Para el cálculo de energía adicional para refrigerar en verano se configura en SIMEDIF la temperatura del termostato entre las 08:00 y 20:00 h en 24.6°C.

En los gráficos de las figuras 32 a 36 se muestran los resultados de la cantidad de energía auxiliar necesaria de incorporar en las zonas térmicas de oficinas para alcanzar los 24.6°C de temperatura de confort en el rango horario que el edificio está en funcionamiento.

Los gráficos evidencian que la carga térmica que es necesaria agregar en el momento más comprometido de verano para la zona térmica 0 PB es de 18.2 kW, para la ZT 1 P1 21.0 kW, para ZT 2 P2 22.7 kW, para ZT 3 P3 21.9 kW y para ZT 4 P4 son necesarios 13.7 kW.



Fig. 32. Gráfico de energía auxiliar para refrigerar ZT 0 PB.
Fuente: Elaboración propia en base a resultados de SIMEDIF V2.0

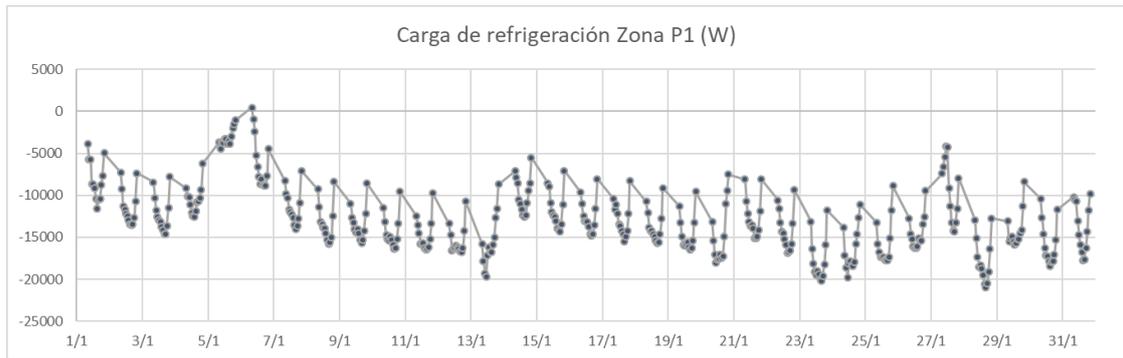


Fig. 33. Gráfico de energía auxiliar para refrigerar ZT 1 P1.
Fuente: Elaboración propia en base a resultados de SIMEDIF V2.0

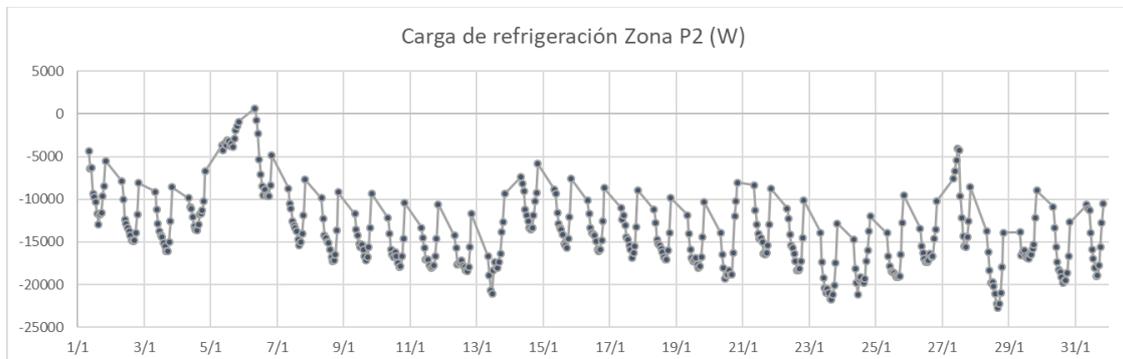


Fig. 34. Gráfico de energía auxiliar para refrigerar ZT 2 P2.
Fuente: Elaboración propia en base a resultados de SIMEDIF V2.0

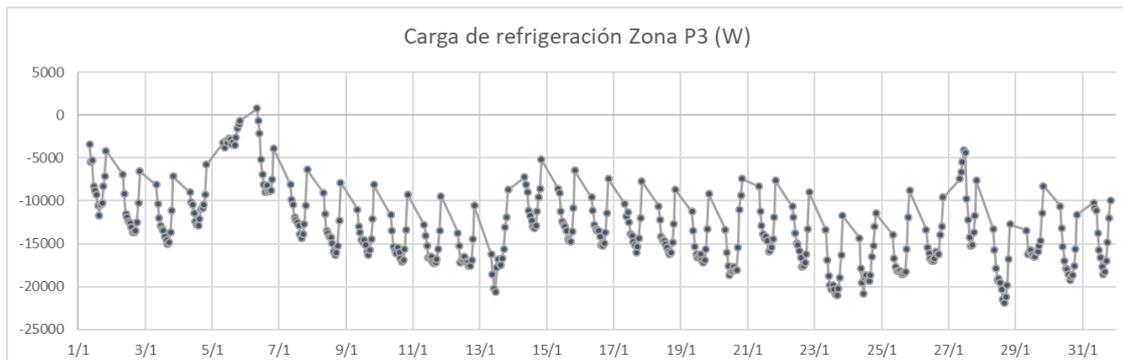


Fig. 35. Gráfico de energía auxiliar para refrigerar ZT 3 P3.
Fuente: Elaboración propia en base a resultados de SIMEDIF V2.0

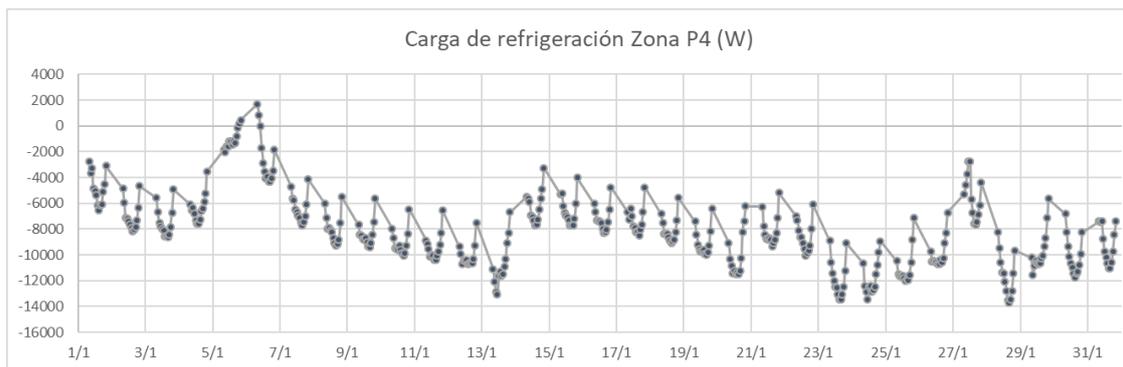


Fig. 36. Gráfico de energía auxiliar para refrigerar ZT 4 P4.
Fuente: Elaboración propia en base a resultados de SIMEDIF V2.0

Análisis de carga de refrigeración			
	datos de simulación		
	carga de refrigeración kW	superficie considerada m ²	carga refrigeración kW/m ²
ZT 0 PB	9,7	351,0	0,03
ZT 1 P1	13,0	329,0	0,04
ZT 2 P2	14,0	329,0	0,04
ZT 3 P3	13,3	329,0	0,04
ZT 4 P4	9,7	176,0	0,06

Tabla 15. Caso base - análisis de las cargas de refrigeración según la simulación en SIMEDIF –valores medios–.

Fuente: elaboración propia en base a resultados obtenidos de simulación.

La simulación arroja resultados que van de 0.03 Kw/m² a 0.06 kW/m² para los datos obtenidos de SIMEDIF, siendo la zona térmica 4 la que más energía auxiliar requiere para lograr las condiciones de confort establecidas; contrariamente a la zona térmica 0 que es la que menos energía auxiliar requiere al tener un bajo porcentaje de superficie expuesta al exterior -las fachadas N, E y O se encuentran soterradas y también por la incidencia la masa térmica que aportan dichos cerramientos soterrados (Tabla 15).

6.2.2 Cálculo de confort

En este apartado se toma para el análisis la misma planta de oficinas intermedia –ZT 2 P2– que para el período de invierno para calcular el nivel de confort en que van a estar los usuarios en este espacio.

Para el análisis se muestran en las figuras 37 y 38 los resultados de los cálculos de confort mediante el modelo del Voto Medio Predicho para la zona térmica sin termostatar y para la zona térmica termostatizada en 24.6°C.

Como condiciones de cálculo se tomó un índice de arropamiento de 0.5 clo que corresponde a camisa de manga corta y pantalón y una tasa metabólica de 1.6 met correspondiente a actividad sedentaria.

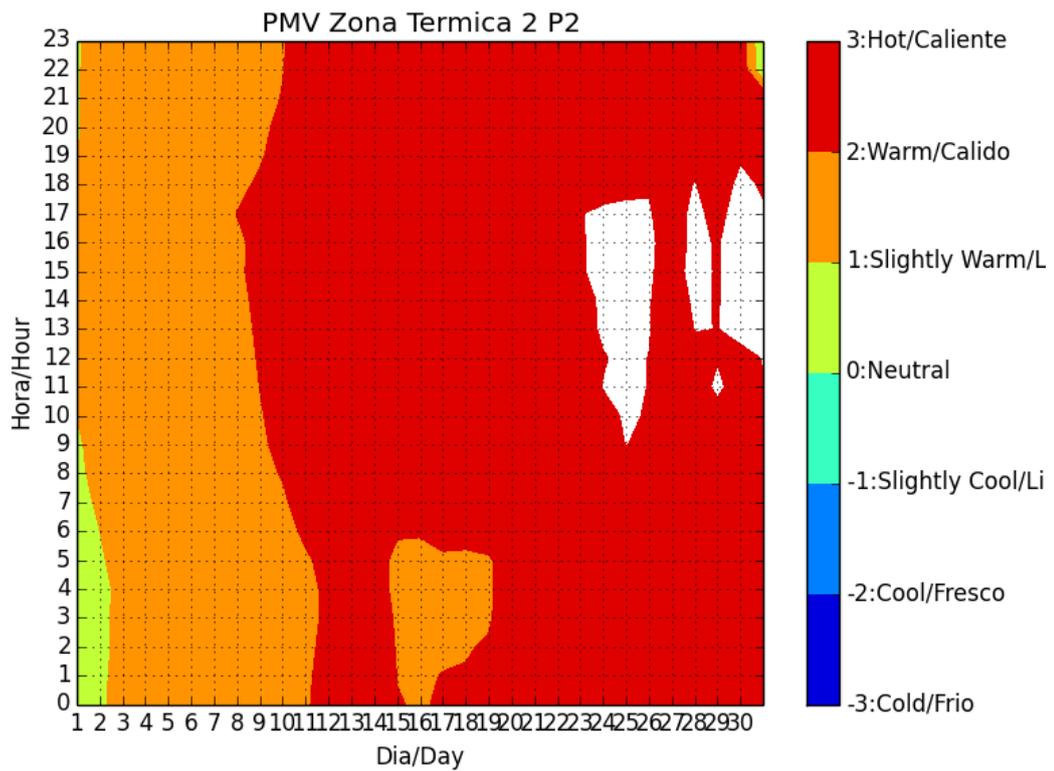


Fig. 37. Gráfico de sensación subjetiva de confort en ZT 2 P2 sin termostatar, para el caso de verano (diciembre). Fuente: SIMEDIF V2.0

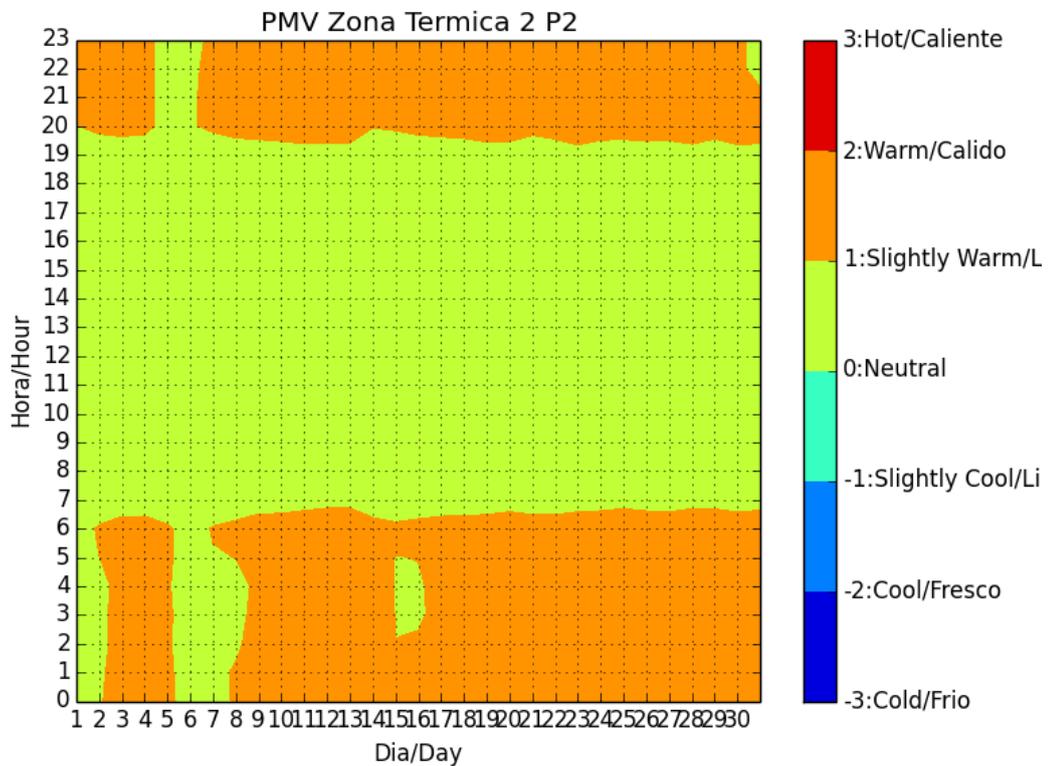


Fig. 38. Gráfico de sensación subjetiva de confort en ZT 2 P2 termostatzada, para el caso de verano (diciembre). Fuente: SIMEDIF V2.0

Las figuras muestran que para la zona térmica 2 en el período de funcionamiento del edificio los usuarios perciben el espacio en los primeros 10 días del mes como ligeramente caluroso y en el resto del período como cálido a caliente. En la figura 39 se percibe que la zona ya termostata se vuelve más fresca en el período de funcionamiento del edificio, el cuál coincide con el horario de funcionamiento de la refrigeración, la sensación predominante es neutral a ligeramente cálida. En el gráfico se puede visualizar además que en los horarios en que no funciona la refrigeración no se llega a sensaciones de calor tan elevadas como en el gráfico en que no se termostata la zona térmica. Una de las razones para que no se incremente la temperatura puede ser que luego de apagada la refrigeración no hay aporte de calor por ganancias internas, ya que no es el horario de uso de la oficina, ni hay ganancias por radiación solar porque es de noche.

6.3 CONCLUSIONES PRELIMINARES

Del análisis realizado en los apartados 6.1.1 y 6.2.1 se puede concluir que el edificio del Centro Administrativo de la UAM presenta mayor consumo de energía adicional para lograr condiciones de confort en el período frío (0.05 a 0.10 kWh/m²), con un promedio de 0.057 kWh/m² que surge de sumar las cargas de calefacción en kW y dividir las por la suma de las áreas de las mismas. En el período cálido los valores oscilan entre 0.03 a 0.06 kWh/m², con un promedio de 0.039 kWh/m², siendo en ambos casos el último piso el que presenta las peores condiciones al ser el que tiene mayor superficie expuesta. Es interesante notar que las condiciones climáticas en Montevideo son más rigurosas en invierno que en verano, por lo tanto, es esperable que las cargas de calefacción sean superiores a las de refrigeración.

Extrapolando estos valores a un año completo, se supone que el período frío se extiende de abril a noviembre, según la tabla 01 surgida de “*Climate Consultant*”, meses en los cuales las temperaturas medias mensuales son menores a 20°C. Este período corresponde a 244 días de requerimientos energéticos para calefacción (Abr-Nov) y 121 días con requerimientos energéticos para refrigeración (Dic-Mar). Con lo que la carga anual será: $244 \times 0.057 + 121 \times 0.039 = 99.7 = 100 \text{ kWh/m}^2$. Para pasar este valor a consumo eléctrico, suponemos un COP⁶ “*Coefficient of Performance*” de los equipos de aire acondicionado de 2.5, con lo que el consumo eléctrico anual de calefacción refrigeración sería $100 \div 2.5 = 40 \text{ kWh/m}^2$. Hanif *et al.* (2022) sugieren valores de entre 50 y 60Kw/m² para calefacción/refrigeración en edificios de bajo consumo “*low energy buildings*”, mientras que Sartori y Hestnes (2007) sugieren valores de 70Kw/m²año, por lo que puede considerarse que este edificio se clasificaría como “de bajo consumo”.

Una vez conocido el desempeño del caso base, es decir el edificio existente tal cual está funcionando en la actualidad, se analiza si se obtendría algún beneficio desde el punto de vista térmico ventilando la fachada en un clima como el de Montevideo. Además, se comparará con la hipótesis de que el edificio hubiera sido resuelto con una envolvente convencional que cumpla con los requisitos normativos de Montevideo. De esta forma se podrán comparar los consumos energéticos en invierno y verano para los tres casos y concluir si para este tipo de edificios y clima es adecuado o no incorporar una FVO desde el punto de vista energético.

⁶ COP: “*Coefficient of Performance*”, es el coeficiente que mide la eficiencia de los equipos de climatización. Para los equipos de AA un COP=2.5 es un valor usual. Disponible en: “<https://certific.es/que-es-el-cop-y-el-scop-de-un-aire-acondicionado.html>”

CAPÍTULO VII: ANÁLISIS DE CASO DE FACHADA CONVENCIONAL Y CASO DE FACHADA VENTILADA OPACA

7.1 DESCRIPCIÓN DEL MODELO TÉRMICO PARA SIMULAR FACHADA CONVENCIONAL Y FACHADA VENTILADA.

Para el análisis del caso en que el edificio analizado hubiese sido resuelto con una envolvente convencional se sustituyen todos los muros de la envolvente exterior que están conformados por un panel exterior de GRC, cámara de aire, aislación térmica, cámara de aire y emplacado de yeso al interior por un muro convencional de mampostería que cumple con los requerimientos de la normativa de Montevideo, espesor mayor a 20cm y transmitancia térmica total (U) inferior a 0.85 W/(m².K). Se consideró que el nuevo cerramiento no aporta masa térmica al interior del edificio, de forma de eliminar las variables que este parámetro puede introducir.

En el “software”, para realizar la nueva simulación, se sustituyen los valores de conductancia de los tabiques 20 al 34 identificados en el caso base como los cerramientos que conforman la envolvente. La conductancia de 0.54 W/(m².K) correspondiente al tabique de la envolvente del caso base ha sido sustituida por el valor de 0.78 W/(m².K), correspondiente a un muro convencional con una transmitancia térmica de 0.69 W/(m².K). Este valor surge de del formulario de Transmitancia Térmica proporcionado en el sitio web de la Intendencia de Montevideo⁷ –tabla 16– donde se ingresaron los parámetros de un muro compuesto en su cara exterior por ticholo cerámico revocado de 12.0 cm de espesor, aislación térmica de 3.0cm, cámara de aire de 5.0cm y emplacado de yeso interior (Fig. 39).

Para la simulación se mantienen las condiciones de color del cerramiento y el coeficiente convectivo radiativo.

Capas					
✓ La primera fila de la tabla representa la Capa más interior.					
Espesor (m)	Material	Densidad (K/m3)	Conductividad (W/m.K)	Res. Térmica (m2.K/W)	
0.012	Placa de yeso	900.0	0.25	0.05	<input type="checkbox"/>
0.05	Cámara de aire vertical			0.18	<input type="checkbox"/> ↓
0.03	Poliestireno (EPS)	15.0	0.04	0.75	<input type="checkbox"/> ↑
0.12	Ticholo 12cm x 25cm x 25cm (10 huecos)			0.31	<input type="checkbox"/>
0.03	Revoque exterior	2100.0	1.4	0.02	<input type="checkbox"/>

Transmitancia Térmica Total (U): 0.6859 W/(m2.K) (valor máximo admitido: 0.85 W/(m2.K))

Tabla 16. Formulario de transmitancia térmica.

Obtenido de: <https://montevideo.gub.uy/aplicacion/formulario-de-transmitancia-termica>

⁷ Disponible en: <https://montevideo.gub.uy/aplicacion/formulario-de-transmitancia-termica>

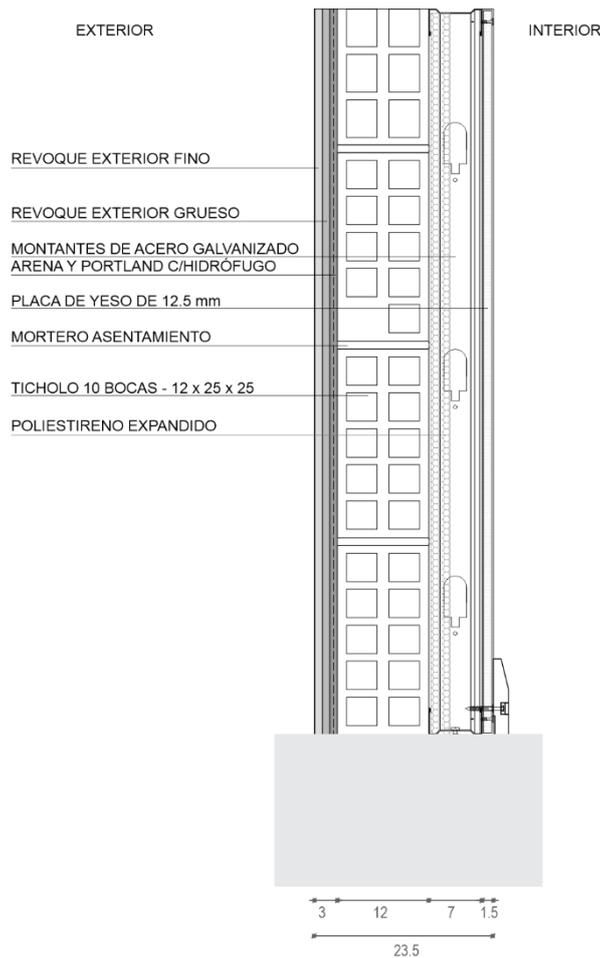


Fig. 39. Corte de muro “Caso Fachada Convencional”.
Fuente: elaboración propia

Para el análisis del caso en que la envolvente del edificio hubiese estado resuelta con una FVO, se considera que la temperatura del aire en la cámara ventilada es igual a la temperatura del aire exterior. Para que esta consideración sea válida se asume una cámara muy ventilada lo que implicaría unas condiciones de diseño que garantice el área adecuada de entrada y salida de aire, a la vez que se considera el aporte de las condiciones de viento del lugar dado que en Montevideo hay velocidades de viento altas que producen una renovación de aire importante en la cavidad, tanto en invierno como en verano.

Para realizar el cálculo se considera que la placa exterior de GRC solo cumple la función de sombreado de la fachada al tomar la hipótesis de una cámara con ventilación óptima. En los parámetros ingresados en el software se modificaron los valores de conductancia del cerramiento de la envolvente, pasando de $0.54 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$ a $0.60 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$ por haber eliminado del cálculo la placa exterior del cerramiento y la cámara de aire más exterior (Fig. 40), además, en el “software” se eliminó el área asoleada de todo cerramiento, suponiendo que la parte del cerramiento por detrás de la placa de GRC no recibe radiación.

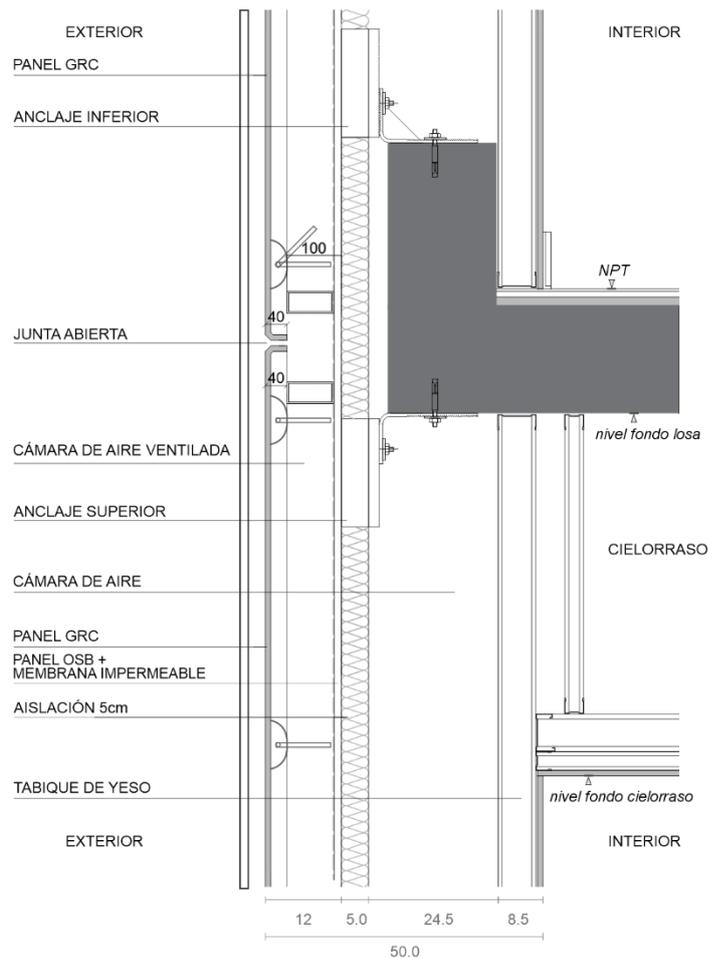


Fig. 40. Corte de muro FVO “Caso Modificado”.
Fuente: elaboración propia

7.2 ANÁLISIS DE RESULTADOS

En este apartado se busca cuantificar la energía auxiliar que demandaría el edificio del CA de la UAM para alcanzar las condiciones de confort en invierno y en verano para los casos hipotéticos en que la envolvente hubiese sido resuelta con una fachada convencional y para el caso de que la fachada actual fuera ventilada.

Para obtener estos valores se han realizado las simulaciones de ambos casos con los cambios indicados en el apartado anterior. Se han simulado para ambos casos las condiciones de invierno y de verano en iguales períodos, con iguales ganancias energéticas internas, iguales ganancias por asoleamiento, y con iguales condiciones de termostatación para obtener resultados comparables donde la única variación han sido las condiciones de la envolvente.

El propósito es determinar a través de la simulación las variaciones en las cargas de calefacción y refrigeración de las diferentes zonas térmicas en cada uno de los tres escenarios y poder concluir si desde el punto vista de la eficiencia energética es conveniente o no aplicar una FVO en un edificio de oficinas en la ciudad de Montevideo.

En las tablas siguientes –17 y 18– se presentan los resultados obtenidos y se comparan para las diferentes zonas térmicas las cargas de calefacción y refrigeración en kW y kW/m² para el caso base, el caso con fachada convencional y el caso con fachada

ventilada. Respecto a las cargas de calefacción se observa que para los tres casos la demanda es muy similar, siendo la ZT4 –la más expuesta– la que presenta un peor desempeño y más aún cuando la envolvente es la correspondiente al caso base con un consumo de 0.10 kW/m² –el doble que las demás zonas térmicas–.

Respecto a las cargas de refrigeración, se puede notar que la demanda es sensiblemente menor a las cargas de calefacción y con valores similares entre los tres casos. En el caso donde la envolvente se plantea como FVO se obtienen valores más parejos y algo más bajos que en los demás casos para la ZT4.

COMPARACIÓN CARGAS DE CALEFACCIÓN							
Zona Térmica	superficie considerada m ²	Caso Base		Caso fachada convencional		Caso fachada ventilada	
		carga de calefacción kW	carga calefacción kW/m ²	carga de calefacción kW	carga calefacción kW/m ²	carga de calefacción kW	carga calefacción kW/m ²
ZT 0 PB	351.0	17.8	0.05	17.8	0.05	17.8	0.05
ZT 1 P1	329.0	17.1	0.05	17.4	0.05	17.5	0.05
ZT 2 P2	329.0	16.5	0.05	16.9	0.05	17.0	0.05
ZT 3 P3	329.0	17.4	0.05	17.8	0.05	17.9	0.05
ZT 4 P4	176.0	17.8	0.10	12.4	0.07	12.3	0.07

Tabla 17. Comparación de las cargas de calefacción según las simulaciones en SIMEDIF –valores medios–.

Fuente: elaboración propia en base a resultados obtenidos de las simulaciones.

COMPARACIÓN CARGAS DE REFRIGERACIÓN							
Zona Térmica	superficie considerada m ²	Caso Base		Caso fachada convencional		Caso fachada ventilada	
		carga de refrigeración kW	carga refrigeración kW/m ²	carga de refrigeración kW	carga refrigeración kW/m ²	carga de refrigeración kW	carga refrigeración kW/m ²
ZT 0 PB	351.0	9.7	0.03	9.7	0.03	9.7	0.03
ZT 1 P1	329.0	13.0	0.04	13.1	0.04	12.3	0.04
ZT 2 P2	329.0	14.0	0.04	14.2	0.04	13.2	0.04
ZT 3 P3	329.0	13.3	0.04	13.5	0.04	12.5	0.04
ZT 4 P4	176.0	9.7	0.06	8.3	0.05	7.7	0.04

Tabla 18. Comparación de las cargas de refrigeración según las simulaciones en SIMEDIF –valores medios–.

Fuente: elaboración propia en base a resultados obtenidos de las simulaciones.

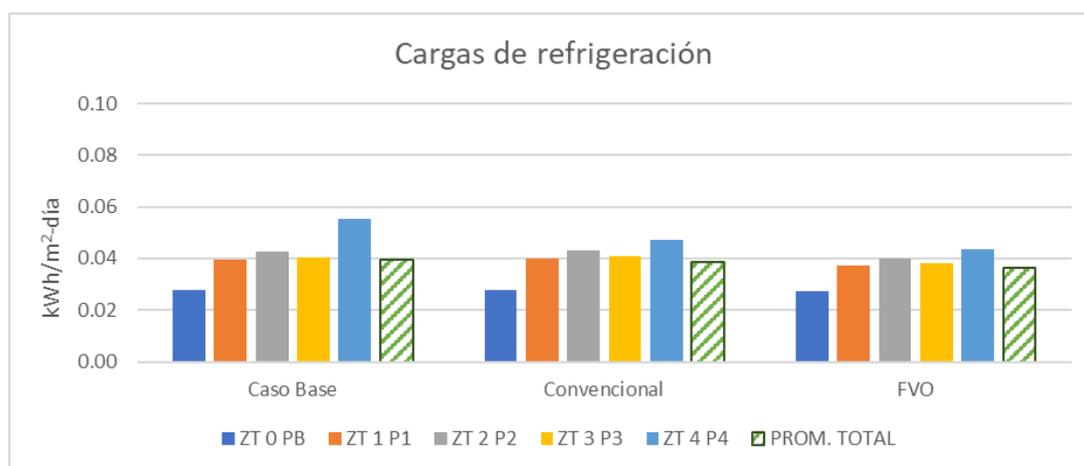


Figura 41. Gráfico comparativo de las cargas de refrigeración según las simulaciones en SIMEDIF –valores medios–.

Fuente: elaboración propia en base a resultados obtenidos de las simulaciones.

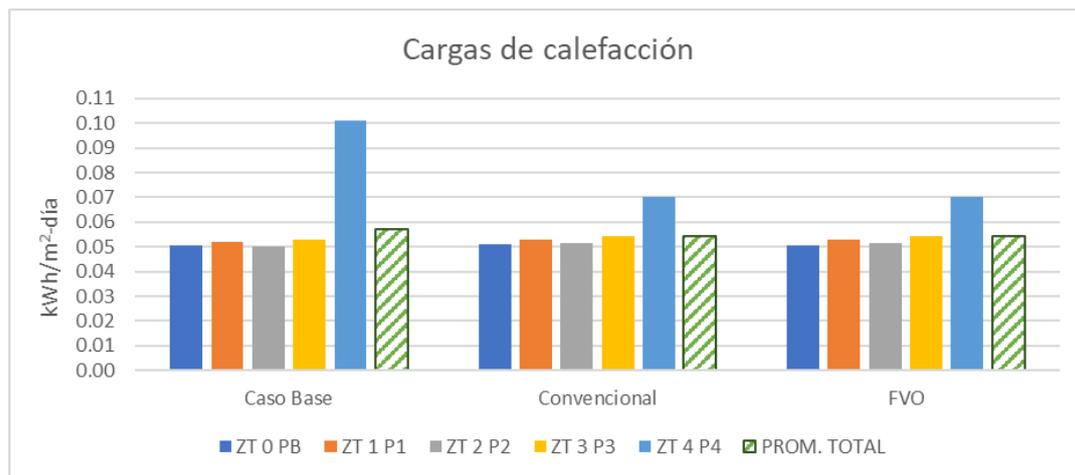


Figura 42. Gráfico comparativo de las cargas de calefacción según las simulaciones en SIMEDIF –valores medios–.

Fuente: elaboración propia en base a resultados obtenidos de las simulaciones.

En los gráficos de las figuras 41 y 42 se observa con mayor claridad que los requerimientos energéticos para refrigeración son menores que los necesarios para calefaccionar en los tres casos de estudio. En ambos gráficos se puede ver un mayor consumo energético de la ZT4, por ser esta la más expuesta y con mayor superficie de intercambio con el exterior. Se puede observar en estos gráficos, que para el caso de envolvente resuelta con FVO, los consumos energéticos tanto para calefacción como para refrigeración son menores que en los demás casos y que las demandas de las diferentes zonas térmicas son más parejas; no se evidencia un consumo tan diferente en la ZT4 como en los demás casos.

En la tabla 19 se cuantifica en porcentaje el ahorro energético de una fachada del tipo convencional y de una FVO para este edificio de oficinas en Montevideo respecto a la envolvente del caso base. Para calcular estos porcentajes se han sumado los consumos energéticos, tanto para refrigeración como para calefacción, de las diferentes zonas térmicas en cada uno de los casos. Aquí se puede ver nuevamente como el consumo total de calefacción en el caso base es el que tiene mayor demanda: 86.6 kW.

En este análisis se puede observar que respecto al consumo total de energía para refrigeración la envolvente con FVO presenta un 7.4% de ahorro energético y la fachada convencional un 1.6% de ahorro; y respecto al consumo de energía para calefaccionar se observa que tanto la fachada convencional como la FVO implican ahorros energéticos similares –4.8%–

Se puede notar que el empleo de una FVO en el clima de Montevideo para este tipo de edificios es más eficiente en el período cálido, donde si bien los consumos energéticos son menores que para el período frío, el porcentaje de ahorro es mayor.

	Caso Base	Caso fachada convencional	Caso fachada ventilada	Fachada Convencional	Fachada Ventilada (%)
Consumo Total Refr. (kW)	59.7	58.8	55.3	-1.64%	-7.36%
Consumo Total Calef. (kW)	86.6	82.4	82.5	-4.81%	-4.75%

Tabla 19. Porcentajes de ahorro energético –fachada convencional y FVO– respecto al caso Base

Fuente: elaboración propia en base a resultados obtenidos de las simulaciones.

Dadas las características propias del programa del edificio y su diseño hay pocas ganancias energéticas internas –lo cual es una desventaja en el período frío–, existen ganancias energéticas a través de las superficies vidriadas, las cuales carecen de protección solar y se presenta la imposibilidad de ventilar naturalmente dada la conformación de las aberturas, lo cual dificulta el desempeño energético del edificio independientemente de cuál sea la envolvente. Del análisis bioclimático se desprendió la necesidad que durante el período caluroso se cuente con protecciones solares, y luego se constató el aporte que realiza la FVO como sombreamiento de la envolvente opaca, sin embargo el diseño de la envolvente debe ser integral considerando también la protección solar de los cerramientos transparentes y la ventilación durante el período caluroso . Para el periodo frío se pudo observar que el edificio no responde a fomentar las ganancias solares, puesto que presenta similar porcentaje de aberturas independiente de la orientación de la fachada.

A partir del análisis de los datos obtenidos, se puede concluir que para este tipo de edificios de oficinas el empleo de una FVO en estas condiciones climáticas no responde a cuestiones relacionadas a la eficiencia energética, ya que los resultados obtenidos en cuanto a las cargas de calefacción y refrigeración –si bien son menores– no presentan diferencias sustantivas que justifiquen su uso desde el punto de vista energético y más teniendo en cuenta que en estudios realizados en Europa se han llegado ahorros del 40% en el consumo al implementar una envolvente del tipo FVO respecto a otras envolventes “convencionales” (Ciampi M. et al., 2003; Sanjuan et al, 2011; Balocco C., 2002).

Los motivos para emplear este tipo de fachadas en edificios de estas características responden a cuestiones de otra índole.

CAPÍTULO VIII: CONCLUSIONES

En este trabajo se estudió la viabilidad del uso de las dobles fachadas ventiladas opacas como estrategia pasiva para lograr mejores condiciones de confort térmico y disminución de la demanda energética en edificios de oficinas para el clima de Montevideo. Para ello se seleccionó y caracterizó el clima de Montevideo desde el punto de vista bioclimático. Mediante el uso del “software” SIMEDIF se simuló el comportamiento térmico de un edificio de oficinas correspondiente al centro administrativo de la UAM, un edificio exento situado en la periferia de la ciudad, con fachadas orientadas al N, S, E y O.

En una primera instancia no se consideró la envolvente como una FVO, sino que se simuló el edificio en sus condiciones actuales, con su envolvente tal cual ha sido ejecutado con el fin de conocer y situar al edificio en un rango de consumo energético tanto para condiciones de verano y de invierno; a estas simulaciones se las ha denominado “Caso Base Invierno” y “Caso Base Verano”.

Posteriormente, surgió la incógnita de qué hubiese sucedido si el edificio hubiese sido resuelto con una fachada tradicional de mampostería que cumpliera con los requerimientos térmicos fijados por la normativa de Montevideo –U “Transmitancia térmica” $\leq 0.85 \text{ W/(m}^2\cdot\text{K)}$ y para lo cual se conformó un muro en el formulario de transmitancia térmica proporcionado por la Intendencia de Montevideo que tuviera las características que se entiende por fachada tradicional –mampostería– y que el valor de su transmitancia térmica fuese menor al valor máximo admitido, llegando a un cerramiento cuyo valor $U=0.69 \text{ W/(m}^2\cdot\text{K)}$, las simulaciones realizadas para esta hipótesis fueron identificadas como “Caso Fachada Convencional Invierno” y “Caso Fachada Convencional Verano”.

Por último, y con las últimas simulaciones, se buscó posicionar el desempeño energético de la FVO en este tipo de edificios respecto a las dos configuraciones de fachadas ya simuladas; para esto se ha supuesto que la actual envolvente del edificio funcione como una fachada ventilada opaca, es decir que la cara exterior realizada con paneles GRC –actualmente estanca y sellada en todas sus juntas y encuentros– fuese ventilada; en este contexto la cara exterior se supone como un elemento de sombreado de toda la envolvente y la cámara de aire como un elemento de disipación de energía.

En las simulaciones se estudió el efecto sobre las temperaturas interiores, las temperaturas superficiales de muros, el consumo energético para refrigeración y calefacción y el confort interior.

Del análisis de los tres casos estudiados se puede concluir que para el clima de Montevideo la demanda energética del edificio analizado es mayor en el período frío que en el caluroso.

El empleo de una FVO ofrece mejor desempeño en el período caluroso, logrando un ahorro del 7.4% respecto al caso base, mientras que la fachada convencional presenta una disminución de consumo de energía para refrigerar de 1.7%; es en este período donde se observan las mayores diferencias y donde la FVO ofrece su mejor desempeño.

Mientras que en el período frío el porcentaje de ahorro energético que ofrece una FVO y una fachada convencional respecto a la fachada del caso base son equivalentes – 4.8%–.

Se puede concluir que en climatologías dominadas solo por la demanda de calefacción el sistema de FVO proporciona una reducción de la demanda energética en relación al sistema de fachada convencional o al del caso base, pero es imperceptible en un clima moderado con demandas energéticas en el período frío y en el cálido. Por otra parte, en

climatologías dominadas solo por la demanda de refrigeración el sistema FVO proporcione una reducción de la demanda en relación a una envolvente convencional o a la del caso base, pero también es imperceptible en estas condiciones climáticas.

Teniendo en cuenta que el mejor desempeño de las FVO en nuestro contexto se da en el período caluroso y ante la tendencia de aumento de las temperaturas en el marco del Cambio Climático se podría suponer que el empleo del sistema de FVO podría tener mayores aportes en cuanto al desempeño energético de los edificios en las proyecciones climáticas futuras. Si bien para afirmar este desempeño futuro debería evaluarse este escenario, se puede plantear como una hipótesis.

Para la tipología de edificio estudiada y para la climatología de Montevideo podemos concluir que los tres sistemas son energéticamente equivalentes y que la decisión de usar un sistema u otro no se basa en criterios de eficiencia energética sino en otros criterios que pudieran ser relevantes tales como: aspecto final, rapidez de construcción, costos, acciones de mantenimiento o factores estéticos.

En el presente trabajo se han encontrado limitaciones que se corresponden con la carencia de elementos de medición de las condiciones interiores en cada uno de los períodos y configuraciones de fachada mediante de sensores térmicos, por un lado al no contar con dicha tecnología y por otro al no contar con tres edificios de similares características resueltos con las tres configuraciones de envolventes analizadas, lo cual hubiese sido un dato relevante para comparar con los resultados de las simulaciones experimentales. De todos modos, tal como ha surgido de la bibliografía consultada, los datos experimentales obtenidos a través de “*software*” de simulación arrojan resultados que se aproximan muy fielmente a los datos recabados en la medición de prototipos montados según las configuraciones que se desean analizar. De todos modos, la validación experimental de los datos obtenidos a través de las simulaciones hubiese sido un dato interesante de conocer.

Como una posibilidad de trabajo futuro sería interesante validar estos resultados obtenidos con datos experimentales, pudiéndose realizar tres prototipos representativos de los casos simulados y enfrentar ambos resultados.

En el presente trabajo han surgido limitaciones en cuanto a la bibliografía existente referida al desempeño de las FVO en climas templados, ya que los estudios disponibles se basan principalmente en el análisis de estas envolventes en climas marcados por inviernos con muy bajas temperaturas y veranos extremadamente cálidos. Al no poseer demasiada bibliografía que haya analizado el desempeño en climas más moderados se ha dificultado un poco más validar los resultados y compararlos con otros trabajos de investigación similares.

Como contribución de este estudio se puede decir que el empleo de FVO en obras nuevas desde el punto de vista energético ofrece un desempeño similar a la solución de una fachada tradicional de mampostería que cumpla con los requerimientos de la normativa municipal o el de una fachada liviana como la que conforma actualmente el edificio del centro administrativo de la UAM, pero la adopción de este tipo de fachadas en edificios de oficinas permite fachadas con nuevos valores estéticos, con menos acciones de mantenimiento, menor degradación por inclemencias climáticas, si bien la inversión inicial puede ser algo mayor a otros sistemas su uso sería más que adecuado para edificios de oficinas, estatales por ejemplo, donde a veces las acciones de mantenimiento no son las deseadas y la falta del mismo puede repercutir en las condiciones de confort interior. En criterios basados en la durabilidad, en el casi nulo mantenimiento y flexibilidad de diseño las FVO son un sistema a tener en cuenta a la hora de elegir la envolvente de los edificios.

Por otro lado, como aporte de este trabajo de investigación, es la consideración del uso de las FVO en la rehabilitación de edificios existentes, en edificios deteriorados o con una envolvente de deficiente desempeño a fin de mejorar la eficiencia energética del mismo. En rehabilitación, los sistemas de fachada ventilada pueden instalarse incluso sobre superficies que estén relativamente en “mal estado” sin requerir costosos trabajos previos de preparación del soporte o incluso sin requerir que la superficie sea perfectamente plana, lo que hace de este sistema un método de rehabilitación considerable. El escaso peso que suponen las fachadas ventiladas permite no provocar sobrecargas en la estructura por lo que se adaptan perfectamente a los trabajos de rehabilitación. La instalación seca de todo el sistema de fachadas ventiladas no provoca molestias a los usuarios, no requiere tiempos de secado y puede realizarse bajo cualquier condición climática por lo que resulta ser idóneo para las obras de rehabilitación.

La enorme cantidad de revestimientos exteriores permiten adaptarse a cualquier requerimiento estético que pueda precisarse. Los trabajos se realizan enteramente por la parte exterior pudiendo realizarse sin interferir con el uso del edificio haciendo innecesario el desalojo de los ocupantes.

Si bien el presente trabajo de investigación está basado en un caso de estudio específico permite obtener conclusiones importantes respecto de las FVO en un clima templado como el de Montevideo.

BIBLIOGRAFÍA

- Alonso-Suarez, R., Abal, G., Siri, R., & Muse, P. (2014). Satellite-derived solar irradiation map for Uruguay. *Energy Procedia* 57, 1237 – 1246.
- Aparicio-Fernández, C., Vivancos, J., Ferrer-Gisbert, P., & Royo-Pastor, R. (2014). Energy performance of a ventilated façade by simulation with experimental validation. *Applied Thermal Engineering* 66, 563-570.
- Arce, J., Giménez, M., Guzmán, J., Heras, M., Alvarez, G., & Xamán, J. (2009). Experimental study for natural ventilation on a solar chimney. *Renewable Energy* 34, 2928-2934.
- Architecture & Sustainability Research Barcelona. (27 de Agosto de 2021). *Módulo Online: Meteororm y Climate Consultant*. Obtenido de <http://arquitecturaysostenibilidad.com/curso/meteororm-climate-consultant/>
- Ascione, F. (2017). Energy conservation and renewable technologies for buildings to face. *Solar Energy* 154, 34-100.
- ASHRAE. (2010). *Standard 55-81 Thermal environmental conditions for human occupancy*. Atlanta, EUA.: American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers, INC.
- Astori. (28 de 03 de 2021). *GRC-Manual*-. Obtenido de <https://www.astori.com.uy/productos/grc.html>
- Badarnah Kadri, L. (2012). *Towards the Living envelope. Biomimetics for building envelope adaptation*. Delft: Faculty of Architecture, Delft University of Technology.
- Balocco, C. (2002). A simple model to study ventilated façades energy performance. *Energy Buildings* 34, 469-475.
- California Energy Commission. (2020). *2022 Energy Code Update Rulemaking*. California: California Energy Commission.
- Ciampi, M., Leccese, F., & Tuoni, G. (2003). Ventilated façades energy performance in summer cooling of buildings. *Solar Energy* 75, 491-502.
- Climate.OneBuilding.Org. (12 de mayo de 2021). *EnergyPlus Weather File (EPW) Data Dictionary*. Obtenido de http://climate.onebuilding.org/papers/EnergyPlus_Weather_File_Format.pdf
- De Boeck, L., Verbeke, S., Audenaert, A., & De Mesmaeker, L. (2015). Improving the energy performance of residential buildings: A literature review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews, Volume 52*, 960-975.
- De Dear, R., & Brager, G. (1998). Developing an adaptive model of thermal comfort and preference. *ASHRAE Transactions* 104 (March), 145-167. Disponible en: <https://escholarship.org/content/qt4qq2p9c6/qt4qq2p9c6.pdf>.
- Dirección Nacional de Energía. (10 de Mayo de 2021). *Años Meteorológicos Típicos*. Obtenido de http://www.eficienciaenergetica.gub.uy/informes/-/asset_publisher/hJhvph6TjO1U/content/anos-meteorologicos-tipicos

- DOE. (2015). *A Common Definition for Zero Energy Buildings*. Obtenido de <https://www.energy.gov/sites/prod/files/2015/09/f26/A%20Common%20Definition%20for%20Zero%20Energy%20Buildings.pdf>
- Duffie, J. A., & Beckman, W. A. (2006). *Solar engineering of thermal processes*. Wiley.
- Ekoglass. (30 de Junio de 2021). *Especificación según la aislación térmica*. Obtenido de <https://www.ekoglass.com.ar/notes/vidrios-seguros/>
- European Commission. (2021). *Energy use in buildings*. Recuperado el 2021 de Octubre de 2021, de https://ec.europa.eu/energy/eu-buildings-factsheets-topics-tree/energy-use-buildings_en
- European Environment Agency. (2014). *Annual European Union greenhouse gas inventory*. Luxembourg : Publications Office of the European Union.
- Falk, J., & Sandin, K. (2013). Ventilated rainscreen cladding: measurements of cavity air velocities, estimation of air change rates and evaluation of driving forces. *Build Environ* 59, 164-176.
- Falk, J., Molnár, M., & Larsson, O. (2014). Investigation of a simple approach to predict rainscreen wall ventilation rates for hygrothermal simulation purposes. *Build Environ* 73, 88-96.
- Fernades Maciel, A. C., & Carvalho, M. T. (2019). Operational energy of opaque ventilated façades in Brazil. *Journal of Building Engineering*, 10.
- Flores Larsen, S., & Lesino, G. (2001). Modelo térmico del programa SIMEDIF de simulación de edificios. *Energías Renovables y Medio Ambiente*, vol. 9, pp. 15 – 24, 2001., 15-24.
- Gagliano, A., & Aneli, S. (2020). Analysis of the energy performance of an Opaque Ventilated Façade under winter and summer weather conditions. *Solar Energy* 205, 531-544.
- Gagliano, A., Nocera, F., & Aneli, S. (2016). Thermodynamic analysis of ventilated façades under different wind conditions in summer period. *Energy Build* 122, 131-139.
- Giancola, E., Sanjuan , C., Blanco, E., & Heras, M. (2012). Experimental assessment and modelling of the performance of an open joint ventilated facade during actual operating conditions in Mediterranean climate. *Energy and Buildings* 54 , 363–375.
- Gratia, E., & De Herde, A. (2004). Natural ventilation in a double-skin facade. *Energy and Buildings* 36, 137–146.
- Guillén , I., Gómez-Lozano, V., Fran, J., & López-Jiménez, P. (2014). Thermal behavior analysis of different multilayer façade: numerical model versus experimental prototype. *Energy Building* 79, 184-190.
- Hernández, A. (2021). *Software GEOSOL*. Obtenido de Disponible en: <http://www.unsa.edu.ar/alejo/geosol/autor.htm>
- Ibáñez-Puy, M., Vidaurre-Arbizu, M., Sacristán-Fernández, J. A., & Martín-Gómez, C. (2017). Opaque Ventilated Façades: Thermal and energy performance review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 180-191.

- IM. (17 de 05 de 2021). *IM*. Obtenido de <https://montevideo.gub.uy/aplicacion/formulario-de-transmitancia-termica>
- INENCO - LEB. (2021). *YouTube*. Obtenido de <https://www.youtube.com/watch?v=iYRxXCxGdaQ>
- Intendencia de Montevideo. (13 de Junio de 2021). *Formulario de Transmitancia Térmica*. Obtenido de <https://montevideo.gub.uy/aplicacion/formulario-de-transmitancia-termica>
- Intergovernmental Panel on Climate Change. (2014). *Summary for Policymakers. In Climate Change 2013 – The Physical Science Basis: Working Group I Contribution to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Cambridge: Cambridge University Press.
- IRAM. (2001). *Norma Argentina 11604:2001. Aislamiento térmico en edificios*.
- Iribar-Solaberrieta, E., Escudero Revilla, C., Odriozola-Maritorea, M., Campos Celedor, A., & Garcia-Cafaro, C. (2015). Energy performance of the opaque ventilated façade. *Energy Procedia* 78, 55-60.
- Laboratorio de Energía Solar -UdelaR-. (10 de Mayo de 2021). *DNE-Eficiencia Energética-Años Meteorológicos Típicos*. Obtenido de http://www.eficienciaenergetica.gub.uy/informes/-/asset_publisher/hJhvph6TjO1U/content/anos-meteorologicos-tipicos
- Marinosci, C., Semprini, G., & Morin, G. (2014). Experimental analysis of the summer thermal performances of a naturally ventilated rainscreen façade building. *Energy and Buildings* 72, 280-287.
- Mata, É., Wanemark, J., Nik, V. M., & Sasic Kalagasidis, A. (2019). Economic feasibility of building retrofitting mitigation potentials: Climate change uncertainties for Swedish cities. *Applied Energy, Volume 242*, 1022-1035.
- Ministerio de Industria Energía y Minería del Uruguay . (2016). *Benchmarking de Energía para Edificios Públicos*. Montevideo: Ministerio de Industria y Minería.
- Ministerio de Industria Energía y Minería del Uruguay. (2020). *Balance Energético 2019*. Balance Energético Nacional.
- Morris, F. A. (2013). Definition and Types of Curtain Walls. *Curtain Wall Systems*, 3-7.
- Naboni, E., & Tarantino, S. (2014). *The climate based design of opaque ventilated façade*. Conferencia, Bressanone.
- Padilla Fire Doors. (11 de Junio de 2021). *Técnico 2018 Línea Cortafuegos*. Obtenido de <https://www.abelenda.com.uy/wp-content/uploads/2020/04/Puertas-Cortafuego.pdf>
- Patania, F., Gagliano, A., Nocera, F., & Galesi, A. (2010). Thermofluid-dynamic analysis of ventilated façades. *Energy Buildings* 42, 1148-1155.
- Peci López, F., Jensen, R., Heiselberg, P., & Ruiz de Adana Santiago, M. (2012). Experimental analysis and model validation of an opaque ventilated facade. *Building and Environment* 56, 265-275.

- Sanjuan, C., Sánchez, M. N., Heras, M., & Blanco, E. (2011). Experimental analysis of natural convection in open joint ventilated façades with 2D PIV. *Building and Environment* 46, 2314-2325.
- Sanjuan, C., Suárez, M. J., Blanco, E., & Heras, M. (2011). Development and experimental validation of a simulation model for open joint ventilated facades. *Energy and Buildings* 43, 3446–3456.
- Sanjuan, C., Suárez, M., González, M., Pistono, J., & Blanco, E. (2011). Energy performance of an open-joint ventilated facade compared with a conventional sealed cavity facade. *Solar Energy* 85, 1851–1863.
- Sartori, I., & Hestnes, A. G. (2007). Energy Use in the Life Cycle of Conventional and Low-Energy Buildings: A Review Article. *Energy and Buildings* N°39, 249-257.
- Seferis, P., Strachan, P., Dimoudi, A., & Androutsopoulos, A. (2011). Investigation of the performance of a ventilated wall. *Energy and Buildings* 43, 2167–2178.
- Statzi, F., Vegliò, A., & Di Perna, C. (2014). Experimental assessment of a zinc-titanium ventilated façade in a Mediterranean climate. *Energy and Buildings* 69, 525-534.
- Statzi, F., Vegliò, A., Di Perna, C., & Tomassoni, F. (2011). Experimental evaluation of ventilated walls with an external clay cladding. *Renewable Energy* 36, 3373-3385.
- Suárez, M., Sanjuan, C., Gutiérrez, A. J., Pistono, J., & Blanco, E. (2012). Energy evaluation of an horizontal open joint ventilated façade. *Applied Thermal Engineering* 37, 302-313.
- Suárez, M., Sanjuan, C., Gutiérrez, A., Pistono, J., & Blanco, E. (2012). Energy Evaluation of an horizontal open joint ventilated façade. *Applied Thermal Engineering* 37, 302-313.
- Trespa . (26 de 01 de 2020). *Trespa Meteon: Fachadas Ventiladas y detalles generales*. Obtenido de www.trespa.info:
<https://www.trespa.info/es/documents/Meteon/Ventilated-fa%C3%A7ade-%26-general-details>
- Unidad Agroalimentaria Metropolitana. (27 de 03 de 2021). *Acerca de la UAM*. Obtenido de <http://www.uam.com.uy/presentacion/acerca-de-la-uam.html>
- Volantino, V., Cornejo, J., Pizzorno, D., & Bernacchia, J. (2012). La ganancia solar y las infiltraciones de aire indeseadas en el comportamiento energético de viviendas de interés social. *Energías Renovables y Medio Ambiente* vol. 30, 45-51.
- Won-Duck, S., & Kang-Guk, L. (2013). Application Plan for an Intelligent Façade and Interactive Design of Environment-Friendly Buildings. *Advanced Materials Research* Vol 689, 18-21.