



**UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO**

**FACULTAD DE INGENIERÍA**

**Programa Único de Especializaciones en Ingeniería**

Especialidad: Ahorro y Uso Eficiente de la Energía

**Ahorro de energía en sistemas activos por acondicionamiento de aire  
en el Edificio E. Nacional al instalar una segunda envolvente**

**TESINA**

Que para obtener el grado en especialista en  
Ahorro y Uso Eficiente de la Energía

**Presenta:**

María Eugenia López García

Director de tesina

Dr. Sergio Quezada García



**Ciudad Universitaria, Cd. Mx., 2021**



Universidad Nacional  
Autónoma de México



**UNAM – Dirección General de Bibliotecas**  
**Tesis Digitales**  
**Restricciones de uso**

**DERECHOS RESERVADOS ©**  
**PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL**

Todo el material contenido en esta tesis esta protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.

# Índice

Índice.....	2
1. Introducción .....	3
1.2. Reconversión Sustentable .....	3
1.3. Estándares Internacionales .....	5
1.4. Segunda Envolvente .....	5
2. Marco Contextual.....	6
2.1. Situación actual (estado del inmueble) .....	6
2.2. Planteamiento del problema .....	9
2.3 Justificación .....	11
2.4. Objetivos.....	12
3. Marco Teórico Conceptual .....	13
4. Metodología .....	15
4.1. Balance de energía .....	15
4.2. Pruebas de hermeticidad.....	24
4.3. Pruebas Termográficas .....	27
5. Resultados .....	29
5.2. Pruebas de hermeticidad.....	33
5.3. Pruebas termográficas.....	37
6. Conclusiones y recomendaciones .....	40
Bibliografía .....	41

# 1. Introducción

Las fachadas de los edificios son un elemento de protección del exterior, el material que se emplea para este fin pocas veces es considerado para proporcionar un confort térmico al interior, debido a que se contemplan grandes áreas de superficies vidriadas, sin considerar un control solar de este material; o bien, tomar en cuenta un porcentaje de áreas opacas como lo señala la Norma Oficial Mexicana NOM-008 ENER-2001, *Eficiencia Energética en Edificaciones, Envolvente de Edificios no Residenciales*. Esta Norma se enfoca en el comportamiento térmico de la envolvente, logrando beneficios de ahorro de energía por la disminución de la capacidad de los equipos de enfriamiento y confort de los usuarios.

Existen múltiples alternativas para proporcionar confort térmico al interior. Algunas de estas alternativas relacionadas con la eficiencia energética están basadas en el diseño de la envolvente del edificio por medio de elementos arquitectónicos, eligiendo materiales opacos con aislamiento térmico y materiales translúcidos con control solar, y otros elementos de protección solar como: parasoles, *louvers*, parteaguas; así como la implementación de una doble envolvente.

El sector de la industria de la construcción en la Ciudad de México está incursionando en nuevas áreas de edificación, evitando construir en un terreno virgen con el impacto ambiental que esto conlleva. Ahora se está apostando por la *Reconversión Sustentable* de edificios existentes, dando una segunda oportunidad a través de una nueva imagen a los edificios ya construidos.

## 1.1. Reconversión Sustentable

La Reconversión Sustentable de un edificio existente es sinónimo de disminuir la emisión de CO<sub>2</sub> al ambiente, para tener un menor impacto ambiental (Velázquez, 2017). Con la Reconversión Sustentable se tiene menor contaminación durante la etapa de construcción, por el menor movimiento de tierra que provoca la erosión y sedimentación, así como la contaminación por polvo y generación de residuos en esta etapa. Un inmueble existente cuenta con infraestructura y conectividad a la red de servicios existentes de la localidad. Otra medida de la Reconversión Sustentable consiste en contar con transporte público y generar programas de movilidad para llegar al inmueble, por ejemplo con el uso de bicicleta, para reducir el uso del automóvil.

La Reconversión Sustentable se basa en tres ejes fundamentales (triple bottom line values) (U.S. Green Building Council, 2013):

- Ambiental
- Económico
- Social

### *Ambiental*

El primer eje se refiere a reducir los impactos al ambiente, a través de la disminución del consumo de energía eléctrica al implementar soluciones como: abrir vanos, quitar muros divisorios, crear espacios flexibles y utilizar tecnología LED para iluminación. Adicionalmente se puede integrar tecnologías como tubos captadores de luz solar y fotoceldas. Así mismo es deseable aprovechar la energía renovable con sistemas de paneles fotovoltaicos y calentadores solares. Con la implementación de estas medidas se podrían dejar de producir toneladas de gases efecto invernadero en la vida útil de los edificios.

Otro factor importante es reducir el consumo de energía, debido a la climatización, por medio de un sistema de ventilación bioclimático, en caso de que el proyecto lo permita, o implementar un sistema de aire acondicionado de consumo eficiente de energía.

### *Económico*

Otro eje importante, en la Reconversión Sustentable, es el económico donde se logra un incremento en la plusvalía del inmueble y por lo tanto un aumento en el valor comercial del mismo. Adicionalmente la implementación de las medidas sustentables, antes mencionadas, aporta una reducción en costos de operación y mantenimiento del edificio.

### *Social*

Y el último eje, pero no menos importante, es el social el cual se ve reflejado en la calidad de vida de los empleados y usuarios finales. Recientes estudios indican que contar con la motivación de trabajar en un lugar sustentable con vistas verdes y una buena calidad del aire interior mejora las condiciones de trabajo reduciendo alrededor de 35% el ausentismo y aumentando la productividad laboral entre el 2% y 10% (U.S. Green Building Council, 2013).

Estas medidas contribuyen a conservar los recursos actuales para futuras generaciones.

## 1.2. Estándares Internacionales

Esta segunda oportunidad que aporta la Reconversión Sustentable a un inmueble se desarrolla bajo certificaciones internacionales, como las que se desarrollan a través del GBCI, por sus siglas en inglés Green Business Certification Inc., siendo estas: LEED BD+C, EB:OM, ARC, EDGE, entre otras, para que se vea reflejada sustancialmente la disminución del consumo de energía y otros recursos. Por lo tanto, es importante considerar los factores que desempeñan una mayor participación para este fin, uno de estos factores puede ser la envolvente del inmueble.

## 1.3. Segunda Envolvente

Al mencionar una segunda envolvente o segunda piel se hace referencia a un elemento arquitectónico de sombreado que rodea a la fachada del edificio para reducir la ganancia térmica a través de la fachada, como consecuencia se reduce la carga térmica y se pueden alcanzar condiciones de confort térmico en el interior del edificio con un menor consumo de energía para la climatización.

## 2. Marco Contextual

El inmueble caso de estudio es un edificio existente construido hace aproximadamente 56 años, en el cual se desea realizar una Reconversión Sustentable y darle una nueva imagen con reforzamiento a la estructura original.

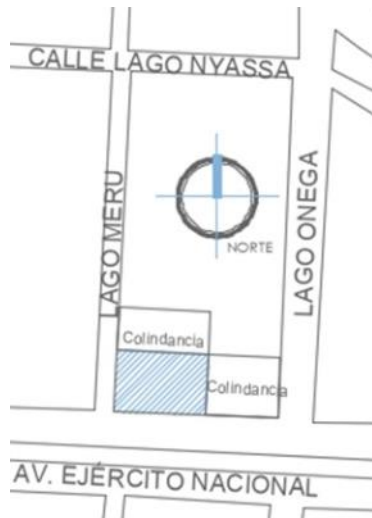
### 2.1. Situación actual (estado del inmueble)

El edificio denominado E. Nacional se encuentra en la zona de Polanco de la Ciudad de México (ver **Figura 1**), es un edificio de oficinas; conformado por seis niveles planta tipo y planta baja.



**Figura 1.** Ubicación del Edificio E. Nacional. Fuente: Google maps.

El edificio cuenta con dos fachadas, una fachada orientada al sur, sobre Ejército Nacional y la segunda fachada orientada al poniente, sobre la calle Lago Merú; la fachada sur recibe una considerable incidencia de radiación solar en gran parte del día. La fachada oriente colinda con un edificio de departamentos, el cual cubre esta fachada hasta el cuarto nivel. Mientras que la fachada norte, colinda con otro inmueble de departamentos el cual la cubre hasta el quinto nivel. Ver **Figura 2**.



**Figura 2.** Fachadas y Colindancias del Edificio E. Nacional.

El sistema constructivo del edificio es convencional, conformado por muros, columnas, y trabes de concreto; las losas son nervadas. Actualmente ambas fachadas del edificio cuentan con nuevos acabados en el exterior, el cual es un repellado (cemento–arena) con pintura en color claro (ver **Figura 3**). Actualmente se está dando mantenimiento a las fachadas, lo cual incluye maniobra de retiro de la estructura para posteriormente colocar la segunda envolvente.



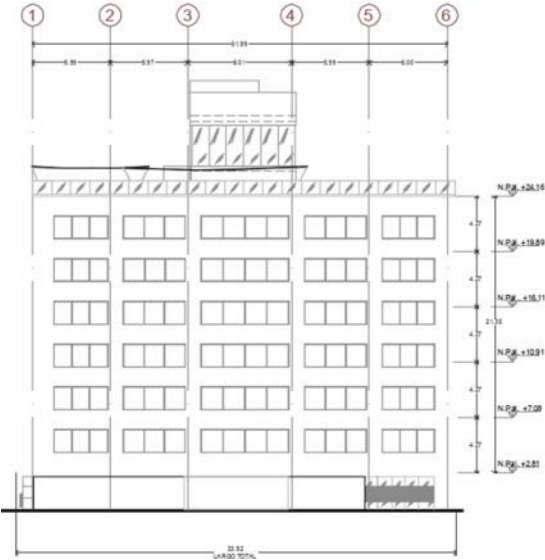
**Figura 3.** Estado actual del Edificio E. Nacional.

El edificio tiene 54 ventanas. El tipo de cancelería es de aluminio natural con un vidrio con una configuración en doble acristalamiento (el segundo vidrio es bajo emisivo).

El nivel de la azotea es una zona que actualmente funciona como área de comedor con una cubierta tipo velaría, la cual aporta un sombreado horizontal; y la otra área es una terraza vegetada con especies endémicas y de follaje extensivo.

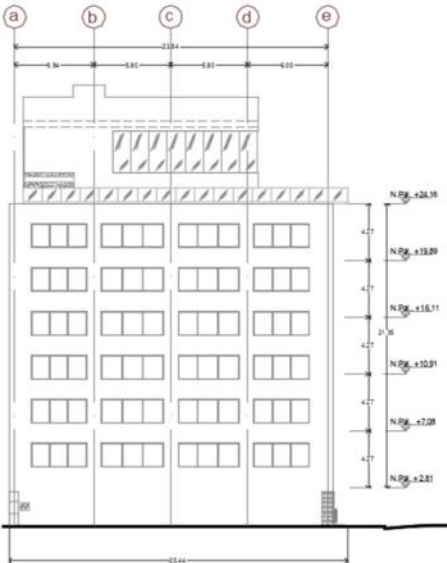


El edificio está orientado al sur poniente y tiene una altura aproximada de 24.0 metros. La configuración de la huella del edificio es rectangular, con las siguientes dimensiones: 32.0 metros de frente, sobre la fachada principal (sur) y 24.4 metros de ancho, sobre la fachada lateral (poniente). Lo anterior se muestra en las **Figuras 4 y 5**.



**Figura 4. Fachada Sur.**

El sistema de aire acondicionado fue seleccionado con base en los requerimientos del proyecto original y de los estándares de reducción del consumo de energía ASHRAE 90.1-2010. De acuerdo al estándar ASHRAE 90.1-2010 en la *Tabla B-4. Clasificación climática internacional*, la Ciudad de México se encuentra clasificada en la Zona 3A, contando con un clima cálido-húmedo.



**Figura 5. Fachada Poniente.**

## 2.2. Planteamiento del problema

El Edificio E. Nacional fue diseñado para desempeñarse energéticamente con una doble envolvente, como se muestra en la **Figura 6**. Sin embargo, el edificio ha operado durante varios años con una sola envolvente, como se muestra en la **Figura 7**, quedando pendiente la instalación de la segunda envolvente por diversas cuestiones de cálculo estructural y de viento.

Por lo tanto, la situación actual no cumple con el diseño del proyecto original y se tiene, por consecuencia, un discomfort en los interiores de cada uno de los niveles debido a que al variar el diseño de cargas térmicas, se dificulta la operación del inmueble. Por lo que el sistema HVAC (*Heating, Ventilating and Air Conditioning*) no funciona acorde al diseño, debido a que funciona de manera constante y no como debería de acuerdo a la demanda o el tipo de ocupación de cada espacio, por ser un sistema VRV (Volumen de Refrigerante Variable).

El Sistema VRV es un sistema de acondicionamiento de aire individual, que modula el volumen de refrigerante de acuerdo con las necesidades de cada ambiente. El Sistema VRV consiste en una Unidad Condensadora Exterior que emplea refrigerante R410a con un menor impacto al medio ambiente, equipada con compresores Scroll Digital que ajustan en todo momento la capacidad de refrigeración y calefacción de cada unidad en función de la demanda instantánea de cada zona climatizada.



**Figura 6.** Propuesta original de diseño de la segunda envolvente.



**Figura 7.** Estado del Edificio E. Nacional antes de la renovación que inicio en 2016.

El proyecto original se diseñó con una doble envolvente, para recubrir la fachada sur y la fachada poniente, como elemento sombreador para aportar una reducción en el diseño de cargas térmicas. Con base en lo anterior se propuso un sistema de HVAC eficiente. Durante el desarrollo e instalación de la segunda envolvente, los cálculos por cargas de viento no cumplían cabalmente con *el Reglamento de Construcción de la Ciudad de México*. Por lo cual, se replanteó el diseño de la segunda envolvente para cubrir los requerimientos estructurales alineados tanto a los cálculos por sismo como por viento. La actual propuesta, que se muestra en la **Figura 8**, donde se empleará el material ya adquirido de la propuesta original. Para la segunda envolvente se emplearán placas de 1.10 m × 4.25 m, estas placas son un laminado de alta tensión multiperforado para aplicación exterior en color rojo y gris claro.



**Figura 8.** Propuesta actual de diseño para la segunda envolvente.

Independiente de la nueva imagen a proyectar a través de la segunda envolvente del Edificio E. Nacional, el objetivo es proporcionar calidad de aire y confort térmico en los interiores, empleando el sistema de aire acondicionado con el que se cuenta actualmente.

## 2.3 Justificación

La Reconversión Sustentable que se desea realizar al Edificio E. Nacional, pretende obtener un abanico de resultados favorables con respecto a la reducción del consumo de energía eléctrica a través de la incorporación de un equipo de HVAC eficiente como lo es un sistema VRV, que opera de acuerdo con la demanda solicitada en cada espacio a climatizar y la colocación de una doble envolvente en la fachada sur y fachada poniente que son la que reciben mayor incidencia solar.

Actualmente el edificio opera de manera ineficiente con el sistema VRV, debido a que los espacios interiores ganan calor a través de las fachadas con superficies vidriadas y no cuentan con un elemento sombreador como lo es la doble envolvente.

Por lo tanto, la sensación térmica de los usuarios es desagradable porque el sistema de HVAC, no funciona como originalmente se consideró y no logra proporcionar una temperatura de confort idónea para cada espacio.

Actualmente se conocen tres escenarios posibles para el Edificio E. Nacional:

- *Primer escenario:* contempla que el edificio siga operando como hasta ahora, es decir, sin doble envolvente y sin película de protección solar en las ventanas. Esto implica la adquisición de un nuevo equipo HVAC y la sensación térmica por los usuarios.
- *Segundo escenario:* contempla sólo la instalación de películas de protección solar en las ventanas del edificio. Esto implica la compra de las películas protectoras y recalcular las cargas térmicas en el edificio para determinar si el actual sistema HVAC puede cubrir las exigencias térmicas, de no ser así se tiene que adquirir un nuevo sistema HVAC.
- *Tercer escenario:* contempla la instalación de la segunda envolvente (rediseñada en su configuración geométrica). Además de instalar la segunda envolvente se deben de recalcular las cargas térmicas en el edificio para determinar si el actual sistema HVAC es suficiente para proporcionar confort térmico a los usuarios, o en determinado caso, se debe adquirir un nuevo sistema.

En los tres escenarios se debe de realizar una inversión económica y posteriormente dar mantenimiento a los equipos y sistemas instalados. Para determinar qué inversión es la más rentable se requiere evaluar los tres escenarios. Por medio del modelado y la simulación térmica de edificaciones se puede hacer esto.

Para realizar la simulación existen diferentes alternativas que van desde el uso de software comercial hasta la implementación en algún lenguaje de programación de un modelo matemático que describa la transferencia de calor a través de la envolvente del edificio.

## 2.4. Objetivos

### 2.4.1. Objetivo general

Determinar el ahorro de energía en sistemas activos por acondicionamiento de aire en el Edificio E. Nacional al instalar una segunda envolvente, por medio del modelado y la simulación de la transferencia de calor a través de las envolventes del edificio.

### 2.4.2. Objetivos particulares

- Modelar matemáticamente la transferencia de calor a través del edificio sin la segunda envolvente y con la segunda envolvente.
- Implementar los modelos de transferencia de calor en algún lenguaje de programación.
- Verificar la infiltración de aire a través de las ventanas con equipo especializado, como: cámara termográfica, sistema de aspersión de agua para conocer como estas infiltraciones impactaran en los resultados que se obtengan con las simulaciones.

# 3. Marco Teórico

## Conceptual

Además de tener una función arquitectónica de conexión visual entre el interior, el paisaje exterior y el contexto urbano, las envolventes son un elemento necesario para filtrar el aire y dejar pasar luz natural (Richards, 2006). Se conoce que las fachadas de edificios convencionales tienen numerosos problemas, como el confort térmico, iluminación, ventilación natural y de deslumbramiento, especialmente en edificios con fachadas con grandes áreas de acristalamiento (Shameri *et al.*, 2011). Esto debido al ingreso de luz natural, que de no manejarse de manera adecuada incrementa la temperatura de los interiores. El problema se hace más notorio durante el verano cuando las temperaturas máximas del aire exterior coinciden con las altas ganancias solares de los materiales que conforman las fachadas (Manz and Frank, 2005). Por lo tanto, al no considerarse vidrios con propiedades de control solar y bajos emisivos (*low e*), puede verse comprometido el confort térmico de los usuarios finales, por un aspecto sólo de estética (Richards, 2006).

Las nuevas tecnologías de vidrio, permiten utilizarlo como material de recubrimiento gracias a las películas, capas bajo emisivas (*low e*) y ensambles (Richards, 2006). Aunado a esto, también es posible utilizar elementos de sombreado, como una doble envolvente o doble piel (Shameri *et al.*, 2011). Una fachada de doble piel es energéticamente una de las mejores opciones para gestionar la interacción entre el exterior y los espacios internos (Shameri *et al.*, 2011). De hecho, han sido probadas como una tecnología de construcción pasiva prometedora para mejorar la eficiencia energética y mejorar el confort térmico interior (Ghaffarianhoseini *et al.*, 2016).

Es importante optimizar el confort térmico y minimizar las cargas de enfriamiento, el comportamiento térmico de todo el edificio requiere un estudio exhaustivo en una etapa temprana de diseño (Manz and Frank, 2005). Por lo tanto, antes de proponer cualquier tipo de diseño de la envolvente, es importante que el diseñador identifique las necesidades y requerimientos de las fachadas de un edificio como: tipo de clima, orientación del edificio y porcentajes de superficies opacas y acristaladas, de acuerdo a lo recomendado (DOF, 2001). Asimismo, el estándar internacional ASHRAE 90.1-2010 en su Apéndice G, establece recomendaciones de porcentajes de áreas acristaladas, dependiendo de la zona climática donde se encuentre el proyecto o edificio a evaluar a través de un modelado energético, con esta herramienta de diseño se puede obtener un ahorro energético a través de la envolvente.

Una manera de conocer los posibles escenarios del comportamiento térmico y óptico de las fachadas es a través del modelado energético, analizando los sistemas pasivos de enfriamiento a través de la ventilación natural en este tipo de fachadas con doble envolvente, sin embargo es poco predecible debido a que el flujo de aire inducido de forma natural en las ventanas de las fachadas de doble envolvente es una de las características más sensibles de este tipo de sistema (Angeli and Dama, 2015). Al incorporar la doble fachada frente a la piel del edificio favorece el paso del aire. Su principal ventaja es que son un excelente aislante térmico, gracias a que el aire que circula entre ambas fachadas reduce la carga térmica en el interior del edificio, lo que disminuye el empleo de sistemas de refrigeración y calefacción, con lo que se favorece a la ventilación e iluminación natural (Shameri *et al.*, 2011).

Mediante la simulación y el modelado se ha evaluado el desempeño térmico de edificaciones con doble fachada, obteniendo ahorros considerables de energía de 41% a 59%, dependiendo si la simulación está considerada en verano o invierno (Ghadamian *et al.*, 2012). Estos resultados pueden variar si se incluyen otro tipo de consideraciones como tipo de equipos de HVAC, iluminación, orientación, ubicación geográfica, entre otros elementos.

De acuerdo a un estudio de la CONUEE (Comisión Nacional para el Uso Eficiente de la Energía), el gasto de energía en edificios no residenciales, al no considerar un diseño integral y eficiente energéticamente de las envolventes, consumen casi un 30 % más de energía eléctrica en edificios gubernamentales, por concepto de acondicionamiento de espacios (enfriamiento o calefacción); pudiendo incrementar hasta el 50% en zonas de clima cálido. Por lo tanto, un diseño adecuado de la envolvente térmica de los edificios puede ayudar a reducir de manera significativa el consumo de energía (DOF, 2001).

# 4. Metodología

A continuación se establece una serie de pasos a realizar que conforman la metodología.

## **1. Modelo de transferencia de calor**

Realizar un modelo de transferencia de calor en estado estacionario para determinar la resistencia térmica en el edificio denominado E. Nacional, antes y después de la instalación de la segunda envolvente, tomando en cuenta las propiedades térmicas de los materiales.

## **2. Pruebas de hermeticidad**

Realizar una serie de pruebas de hermeticidad para verificar que no existan infiltraciones de aire y/o agua a través de las fachadas del edificio. Esto con la finalidad de comprobar que el edificio no tenga fuentes de calor no consideradas en el balance de energía.

## **3. Pruebas termográficas**

Realizar pruebas de envolvente con la cámara termográfica, para determinar puntos calientes en el edificio.

## **4. Temperatura interior del edificio**

Determinar la temperatura interior del Edificio E. Nacional con y sin doble envolvente considerando las fuentes de calor internas, como personas o equipos eléctricos; también se considera la transferencia de masa con el exterior, es decir se considera la ventilación.

## **5. Interpretación de resultados**

Evaluar el desempeño térmico del Edificio E. Nacional con la segunda envolvente y sin ella.

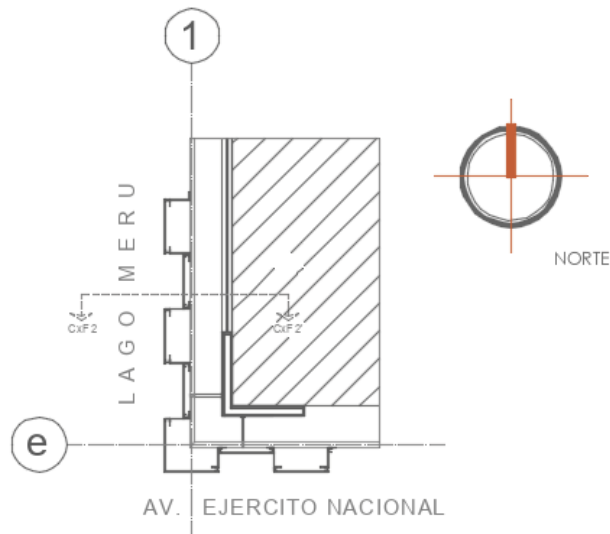
### 4.1. Balance de energía

En esta sección se desarrolla el modelo matemático de transferencia de calor para el Edificio E. Nacional. En la **Figura 9** se muestra una planta de ubicación, donde se está realizando el corte por fachada, para posteriormente observar los diferentes espesores y materiales que conforman ambas fachadas del edificio.

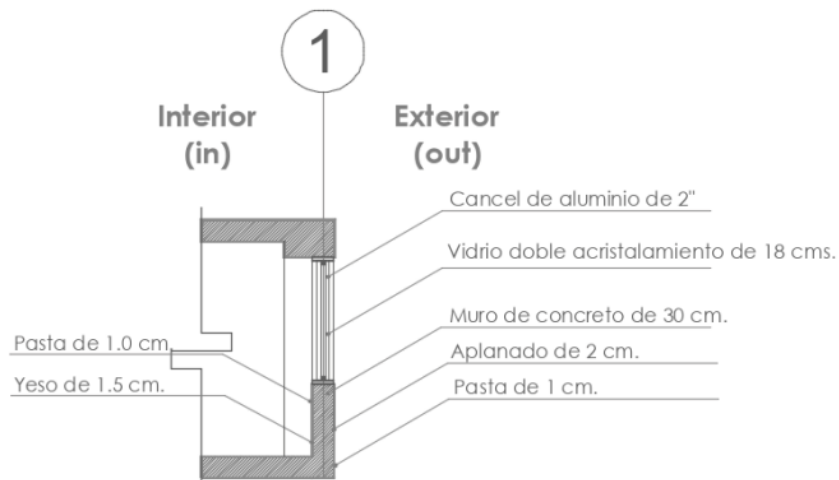


#### 4.1.1. Primera evolvente

En la **Figura 10** se muestra un corte transversal de la primera fachada formada por pasta, yeso, concreto y una capa de aplanado. También se muestra una ventana, la cual está compuesta por 2 acristalamientos soportados por un cancel de aluminio.



**Figura 9.** Planta de ubicación del corte por fachada.



**Figura 10.** Corte por fachada.

La transferencia de calor a través de la pared está dada por:

$$Q = \frac{T_{in} - T_{out}}{R_t} \quad (1)$$

donde  $R_t$  es la resistencia térmica total de la pared,  $T_{in}$  y  $T_{out}$  son la temperatura interior y exterior del edificio, respectivamente. La resistencia térmica total para la pared está dada por:

$$R_t = \frac{1}{A} \left( \frac{1}{h_{in}} + \frac{E_y}{k_y} + \frac{E_p}{k_p} + \frac{E_c}{k_c} + \frac{E_a}{k_a} + \frac{E_p}{k_p} + \frac{1}{h_{out}} \right) \quad (2)$$

donde  $A$  es el área de transferencia de calor,  $h$  es el coeficiente convectivo de transferencia de calor,  $E$  es el espesor del material,  $k$  es la conductividad térmica, los subíndices  $p$ ,  $y$ ,  $c$  y  $a$  hacen referencia a pasta, yeso, concreto y aplanado, respectivamente; mientras que los subíndices  $in$  y  $out$  se refieren al interior y al exterior del edificio, respectivamente.

El coeficiente convectivo externo de transferencia de calor se puede calcular a partir de:

$$h_{out} = \frac{Nu k_{aire}}{L_c} \quad (3)$$

donde  $L_c$  es la longitud de la pared en la dirección del movimiento del viento y  $Nu$  es el número adimensional de Nusselt el cual está dado por la siguiente expresión cuando se tiene convección natural:

$$Nu = \left\{ 0.825 + \frac{0.387 Ra_L^{1/6}}{\left[ 1 + (0.492/Pr)^{9/16} \right]^{8/27}} \right\}^2 \quad (4)$$

donde  $Ra_L$  es el número de Rayleigh dado por:

$$Ra_L = \frac{g \beta (T_s - T_\infty) L_c^3}{\nu^2} Pr \quad (5)$$

donde  $g$  es la aceleración de la gravedad,  $\beta$  es el coeficiente de expansión volumétrica,  $T_s$  es la temperatura de la superficie, en este caso de la pared,  $T_\infty$  es la temperatura del aire lejos de la superficie,  $\nu$  es la viscosidad cinemática y  $Pr$  es el número de Prandtl.

Cuando predomina la convección forzada se puede calcular el Nusselt con las siguientes expresiones:

$$Nu=0.664Re_L^{0.5} Pr^{1/3} \quad Re_L < 5 \times 10^5 \quad (6)$$

$$Nu=0.037Re_L^{0.8} Pr^{1/3} \quad 0.6 \leq Pr \leq 60 \quad (7)$$

$$5 \times 10^5 \leq Re_L \leq 10^7$$

donde  $Re_L$  es el número de Reynolds, dado por:

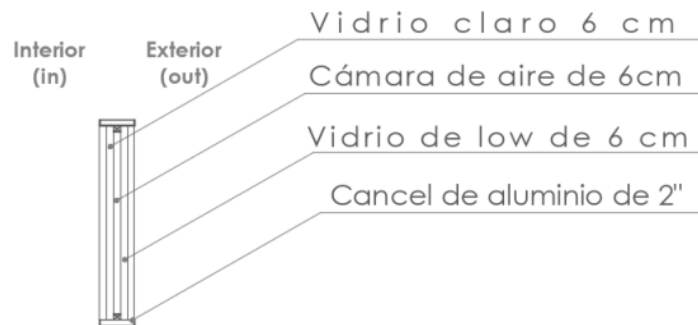
$$Re = \frac{\rho v L_c}{\mu} \quad (8)$$

donde  $\rho$  es la densidad,  $v$  es la velocidad del viento y  $\mu$  es la viscosidad dinámica.

A continuación, en la **Figura 12** se muestra el tipo de ventana, la cual está compuesta por 2 vidrios ensamblados por un separador de aluminio, dejando una cámara de aire de 6 cm, posteriormente este doble acristalamiento se embebe en un cancel de aluminio. Para la ventana la resistencia térmica total está dada por:

$$R_v = \frac{1}{A_v} \left( \frac{1}{h_{in}} + \frac{E_v}{k_v} + \frac{E_{aire}}{k_{aire}} + \frac{E_v}{k_v} + \frac{1}{h_{out}} \right) \quad (9)$$

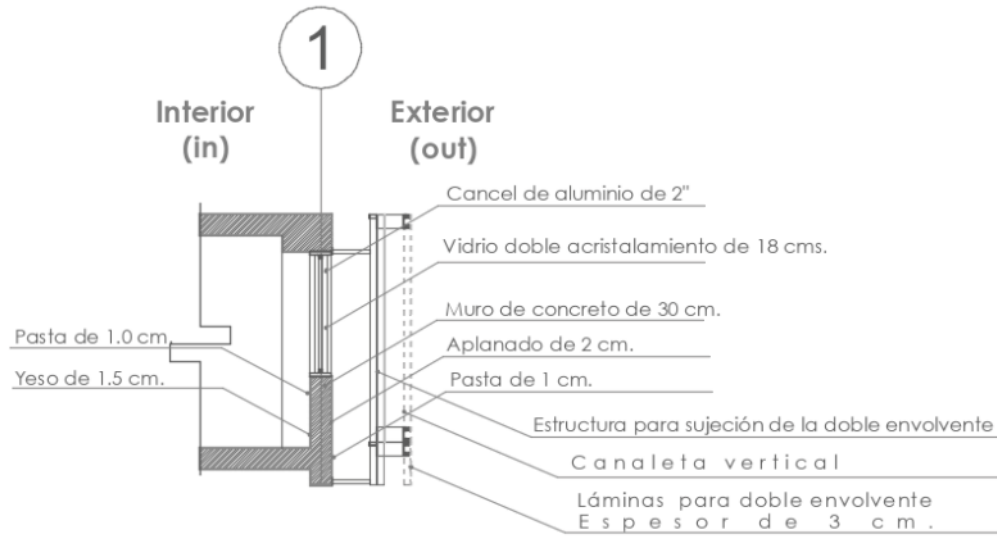
donde  $v$  hace referencia al vidrio de la ventana.



**Figura 11.** Modelo de ventana para ambas fachadas

#### 4.1.2. Segunda envolvente

En la **Figura 12** se muestra un corte transversal de la primera fachada, anteriormente citada, además de que muestra el espacio de aire que hay (entre 0.5 m y 1.0 m, dependiendo de la ubicación del panel) para posteriormente recibir la segunda envolvente



**Figura 12.** Corte por fachada, incluyendo segunda envolvente.

La resistencia térmica total para la segunda envolvente, cuando se considera que se tiene convección natural entre las dos fachadas, está dada por:

$$R_{tse} = \frac{1}{A} \left( \frac{1}{h_{in}} + \frac{E_y}{k_y} + \frac{E_p}{k_p} + \frac{E_c}{k_c} + \frac{E_a}{k_a} + \frac{E_p}{k_p} + \frac{1}{h_{aire}} + \frac{E_l}{k_l} + \frac{1}{h_{out}} \right) \quad (10)$$

donde  $h_{aire}$  es el coeficiente convectivo de transferencia de calor del aire contenido entre la primera y la segunda fachada. El subíndice  $l$  hace referencia al material laminado de la segunda fachada.

La resistencia térmica total para la segunda envolvente, cuando se considera que el aire contenido entre las dos fachadas está estancado, está dada por:

$$R_{tse} = \frac{1}{A} \left( \frac{1}{h_{in}} + \frac{E_y}{k_y} + \frac{E_p}{k_p} + \frac{E_c}{k_c} + \frac{E_a}{k_a} + \frac{E_p}{k_p} + \frac{E_{aire}}{k_{aire}} + \frac{E_l}{k_l} + \frac{1}{h_{out}} \right) \quad (11)$$

La resistencia térmica total para las ventanas, con la segunda envolvente, cuando se considera convección natural entre las fachadas está dada por:

$$R_{vse} = \frac{1}{A_v} \left( \frac{1}{h_{in}} + \frac{E_v}{k_v} + \frac{E_{aire}}{k_{aire}} + \frac{E_v}{k_v} + \frac{1}{h_{aire}} + \frac{1}{h_{out}} \right) \quad (12)$$

Mientras que la resistencia térmica total de la ventana cuando se considera que el aire entre las dos fachadas está estancado se puede calcular a partir de:

$$R_{vse} = \frac{1}{A_v} \left( \frac{1}{h_{in}} + \frac{E_v}{k_v} + \frac{E_{aire}}{k_{aire}} + \frac{E_v}{k_v} + \frac{E_{aire}}{k_{aire}} + \frac{1}{h_{out}} \right) \quad (13)$$

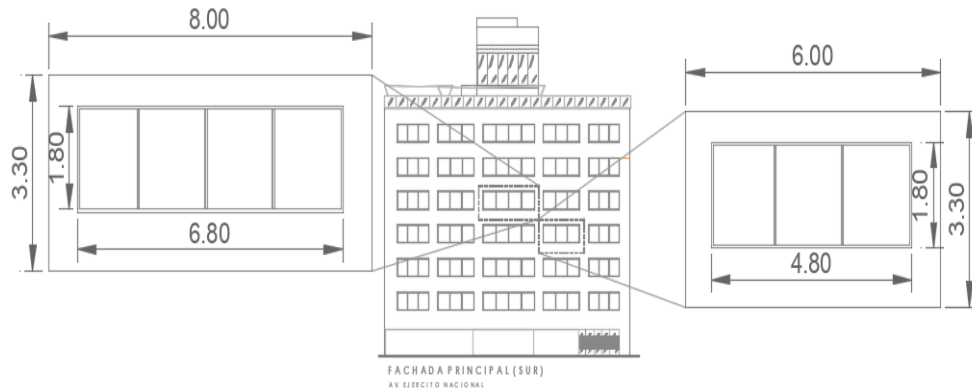
En la **Tabla 1** se muestran las medidas y la conductividad térmica de los materiales que conforman las fachadas y doble envolvente del Edificio E. Nacional.

**TABLA 1. ESPESOR Y CONDUCTIVIDAD TÉRMICA DE LOS MATERIALES QUE CONFORMAN LAS DIFERENTES FACHADAS Y ENVOLVENTES (Cengel, 2007)**

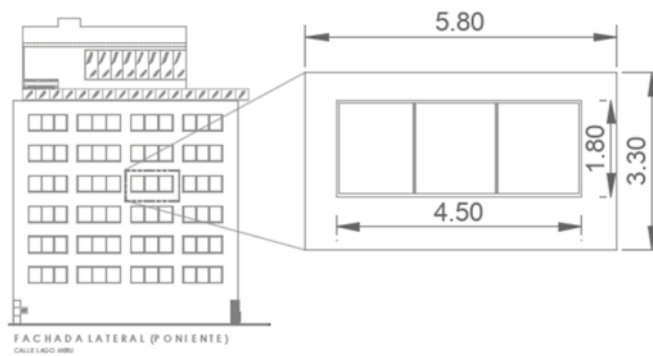
Material	Espesor [cm]	Conductividad Térmica [ $\text{W m}^{-1} \text{K}^{-1}$ ]
Pasta	1.0	0.65
Yeso	1.5	0.81
Concreto	30.0	1.30
Aplanado (mortero)	2.0	1.40
Lámina (Trespa)	8.0	0.30
Vidrio claro	6.0	1.0.
Vidrio low e	6.0	1.0

En la **Figura 13** se muestran las dimensiones de los dos distintos tipos de paredes con ventana con los que cuenta la fachada sur del Edificio E. Nacional. Mientras que en la **Figura 14** se muestra las dimensiones de una de las paredes de la fachada poniente.

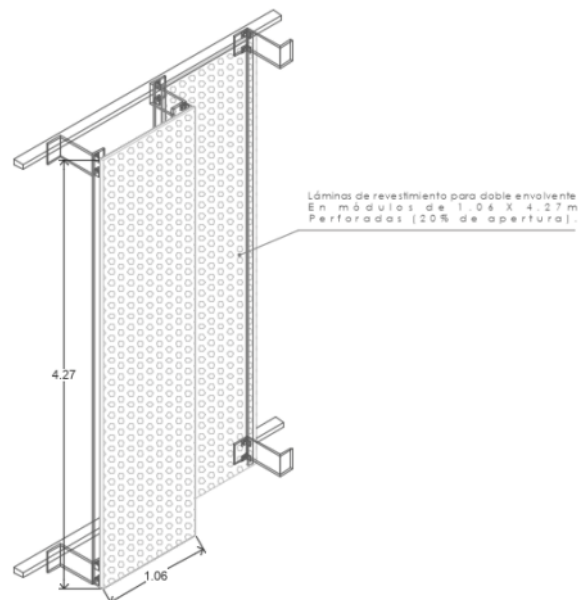
La segunda envolvente es una placa laminada compacta, homogénea, no porosa, de alta presión con una superficie decorativa integrada de la marca **Trespa® Meteon®**. La mezcla de hasta un 70% de fibras basadas en madera y resinas termoendurecibles, sometidas a alta presión y temperatura, permite obtener una placa compacta con una buena relación resistencia-peso, ver **Figura 15**.



**Figura 13.** Dimensiones de áreas representativas en Fachada Sur



**Figura 14.** Dimensiones de áreas representativas en Fachada Poniente



**Figura 15.** Isométrico de la instalación de las láminas que formaran parte de la segunda envoltivo.

## 4.2. Dimensionamiento de aire acondicionado

Para calcular con exactitud la potencia necesaria de aire acondicionado para eliminar el calor de un recinto o vivienda y mantener una temperatura de confort inferior a 25°C, se debe de tener en cuenta los siguientes factores:

- Conductividad térmica de las superficies
- Superficie de cada pared/techo/suelo/ventana a climatizar
- Diferenciar la zona climática donde se encuentra la edificación a climatizar
- Ventilación
- Coeficiente de intermitencia

Se considera que existen cuatro tipos de climáticas básicos: clima frío para temperaturas menores a 18°C, clima templado de 19°C a 25°C, clima cálido de 26°C a 33°C y clima muy cálido para temperaturas superiores a los 34°C.

También es necesario tomar en cuenta la diferencia de temperatura entre el exterior y el interior,  $\Delta T$ . Se puede considerar una temperatura máxima en verano de 45°C para la zona sur y 35°C para la zona norte. En cuanto a la temperatura interior, por lo general se recomienda no superar los 25°C.

Tomando en cuenta todos estos factores, la potencia necesaria de aire acondicionado por cada superficie está dada por:

$$\dot{W} = UA\Delta T \quad (14)$$

donde  $U$  es el coeficiente total de transferencia de calor, dado por:

$$U = \frac{1}{AR_t} \quad (15)$$

por lo tanto, se tiene:

$$\dot{W} = \frac{1}{R_t} \Delta T \quad (16)$$

La potencia total necesaria para climatizar todo un espacio resulta de la suma de cada pared, techo, suelo y ventana que tiene el espacio.

Otro factor importante a tener en cuenta es la ventilación. Parte del aire refrigerado sale del recinto y es sustituido por aire exterior. Actualmente, se empieza a tener en cuenta la

ventilación mecánica controlada y su recuperación energética. Las pérdidas por la renovación del aire se pueden calcular a partir de:

$$\dot{W}_{\text{ventilación}} = \rho_a C p_a f V \Delta T \quad (17)$$

donde  $f$  es la fracción de aire que sale del espacio a refrigerar y es sustituido por aire exterior, se expresa en  $s^{-1}$ , este factor depende del tiempo que permanezca abierta la puerta o las ventanas. Para una actividad moderada se puede tomar como  $3 \times 10^{-4} s^{-1}$

El coeficiente o suplemento de intermitencia es un valor que se utiliza para aportar cierto margen de seguridad al resultado del cálculo. Generalmente se le asigna un valor entre 1 y 2. Entre menos horas al día se utilice la instalación, mayor será el valor de  $C$  que se debe emplear. Por ejemplo, una vivienda de uso esporádico los fines de semana  $C=1.4$ , mientras que, para una vivienda de uso diario,  $C=1.1$ . Así la potencia total está dada por:

$$\dot{W}_{\text{total}} = C \left( \sum_i^n \dot{W}_i + \dot{W}_{\text{ventilación}} \right) \quad (18)$$

En algunos casos es importante tomar en cuenta la carga térmica interna en el dimensionamiento del aire acondicionado. La carga térmica interna está formada por el calor que aportan las personas en el lugar, así como por los aparatos que consumen energía para su funcionamiento como: computadoras, lámparas y televisores, por mencionar algunos. En la **Tabla 2** se muestra la cantidad extra de potencia que se debe de considerar para las cargas térmicas internas.

**TABLA 2. CARGA TÉRMICA QUE APORTA CADA FUENTE DE CALOR**

Fuente de calor	Carga Térmica [W]
Persona	150
Computadora	120
Televisión	180
Lampara Led	160



## 4.2. Pruebas de hermeticidad

Las pruebas de hermeticidad consisten en una revisión física-visual de los acabados y los ensamblajes entre elementos que conforman los sistemas vidriados de las fachadas; para evitar el ingreso de aire y/o agua.

A continuación, se presentan los diseños de dos tipos de pruebas que se realizaron a las fachadas del Edificio E. Nacional, estas pruebas están basadas en la metodología de dos tipos de estándares internacionales:

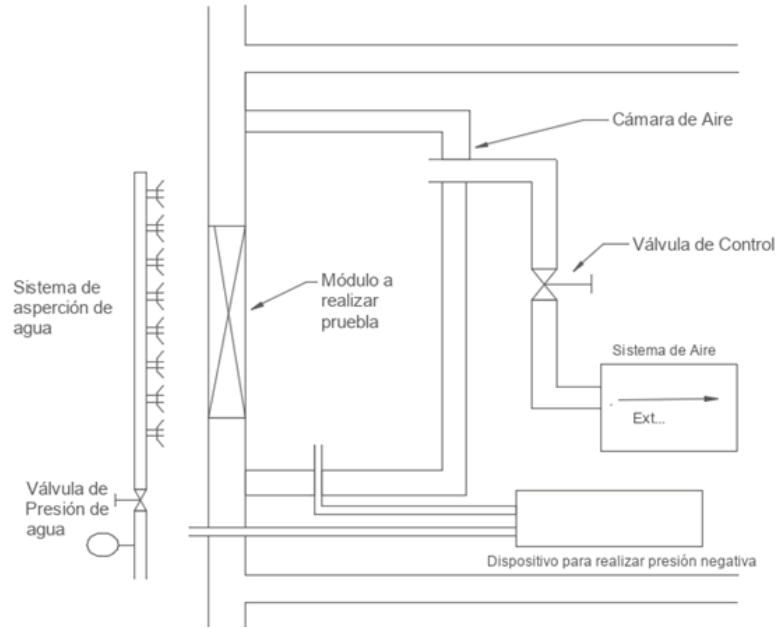
- ASTM E1105. Prueba Tipo 1
- AAMA 501.2. Prueba Tipo 2

### 4.2.1. Diseño de Prueba 1

La prueba consiste en verificar la hermeticidad del sistema de ventana, normalmente como elementos fijos o móviles. Esta prueba se realiza con un sistema de aspersión de agua, mejor conocido como *rain maker* (ver **Figura 16**), el cual funciona a una presión constante de 12 psi, en un periodo de 15 minutos. Por la parte interior del elemento evaluado se coloca una cámara de aire (transparente), a la cual se le aplica una presión negativa para forzar el ingreso del agua, que se inyecta por la parte exterior, verificando así que la hermeticidad del sistema de cancelería sea idónea, para evitar futuras infiltraciones al interior.

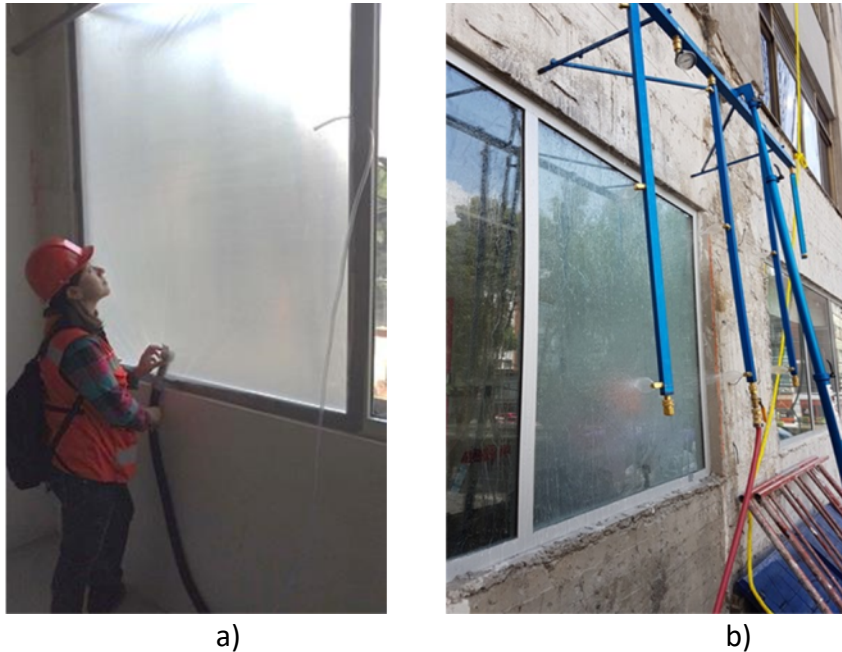
A continuación, se enlista el equipo necesario para la realización la prueba Tipo 1 (ASTM E1105):

- Cámara de prueba (*chamber*) que permita la presurización del elemento a evaluar. Esta deberá contar con visibilidad al interior.
- Ventilador de presurización capaz de mantener una presión constante durante el periodo de prueba.
- Manómetro con una precisión de  $\pm 2\%$  de la presión de prueba a 12 psi.
- Sistema de aspersión de agua (*rain maker*), que permita una inyección uniforme a una tasa de  $3.4 \text{ L m}^{-2} \text{ min}^{-1}$ .
- Equipo de seguridad: guantes, lentes, ropa de manga larga.



**Figura 16.** Esquema de arreglo general de la maqueta.

En la **Figura 17** se muestra la instalación y aplicación de la Prueba Tipo 1. La prueba se realizó de manera previa a la instalación de los acabados finales de las fachadas (pasta exterior).



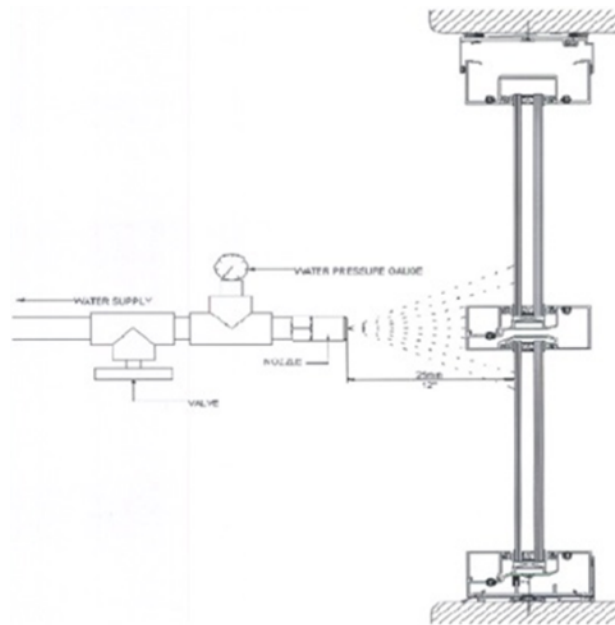
**Figura 17.** Prueba Tipo 1, a) Vista interior de la aplicación de la prueba, aplicando presión negativa; b) Vista exterior de la prueba, con los aspersores de agua (*rain maker*).

#### 4.2.2. Diseño de Prueba 2

La prueba consiste en verificar la hermeticidad del sistema de ventanas, normalmente como elementos fijos, esta prueba se realiza con la herramienta conocida como boquilla de aspersión de agua, la cual se coloca a una distancia de 10 cm a 15 cm del elemento a evaluar, a tres intervalos de 5 minutos cada uno, posteriormente a ese tiempo, se procede a verificar los elementos evaluados (ver **Figura 18**).

A continuación, se enlista el equipo necesario para la realización la prueba Tipo 2 (AAMA 501.2-03):

- Boquilla de aspersión de agua (Type B-25, #6.030 brass nozzle with a 1/2 in FPT).
- Manómetro con una precisión de  $\pm 2\%$  de la presión de prueba a 30 psi mínimo y 35 psi máximo.
- Bomba presurizada para proporcionar la presión requerida para realizar la prueba.
- Escalera, Extensión eléctrica, manguera de 3/4 in.
- Equipo de seguridad: guantes, lentes, ropa de manga larga.



**Figura 18.** Esquema de arreglo general de la maqueta.

En la **Figura 19** se muestra la revisión visual de los acabados y aplicación de la Prueba Tipo 2. Estas pruebas se realizaron de manera posterior a la instalación de los acabados finales de las fachadas.



**Figura 19.** Prueba Tipo 2, a) Vista exterior de la realización de prueba tipo 2, con la varilla calibrada; b) Vista interior de la realización de la prueba, sin infiltraciones de agua.

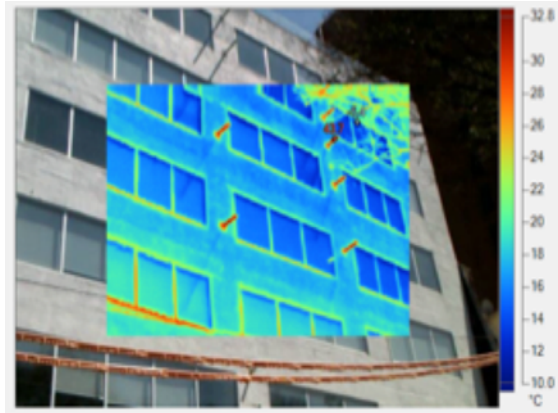
### 4.3. Pruebas Termográficas

Otra herramienta para pruebas de envolvente, es la cámara termográfica, que se emplea para verificar la hermeticidad de la envolvente de un edificio, ésta es una prueba no invasiva de supervisión y diagnóstico del estado de los edificios.

Con una cámara termográfica, se puede identificar problemas de manera anticipada para posteriormente corregir las incidencias halladas, antes de que se agraven y resulten en un mayor costo de reparación. La prueba se puede aplicar para:

- Detectar falta de aislamiento en muros o losas, o bien encontrar aislamiento defectuoso.
- Localizar posibles infiltraciones de aire en los perfiles de cancelería.
- Encontrar humedad en el aislamiento, en las losas y muros.
- Localizar puentes térmicos entre los diferentes materiales que conforman las fachadas.

Por lo general se detectan defectos propios de la construcción: como falta de aislamiento, desgastes en azoteas y problemas de condensación y/o fugas de aire. En la **Figura 20** se muestra una de las imágenes tomadas durante la realización de la prueba termográfica.



**Figura 20.** Vista exterior de la fachada sur realizando la prueba termográfica.

# 5. Resultados

En esta sección se reportan los resultados obtenidos para tres casos de estudio los cuales consisten en el edificio con una envolvente, edificio con una segunda envolvente considerando que el aire contenido entre la primera y la segunda envolvente está estancado y el caso del edificio con segunda envolvente considerando que el aire contenido entre las dos envolventes se mueve por convección natural.

En la Tabla 3 se muestran los resultados obtenidos para los diferentes elementos de las envolventes. Se puede ver que la resistencia térmica incrementa de manera considerable, cuando se agrega la segunda envolvente, los valores más altos de la resistencia se alcanzan cuando el aire contenido entre la primera y segunda envolvente se encuentra estancado.

**TABLA 3. VALORES DE RESISTENCIA TÉRMICA OBTENIDOS PARA LOS DIFERENTES ELEMENTOS ENVOLVENTES DEL EDIFICIO E. NACIONAL.**

Elemento envolvente	Resistencia (K/W)		
	Una envolvente	Segunda envolvente	
		Aire estancado	Convección natural
Fachada sur	0.000961	0.053537	0.019216
Fachada poniente	0.001233	0.068691	0.024656
Pared posterior	0.000637	0.035468	0.012731
Pared lateral	0.000849	0.047291	0.016975
Ventanas de la fachada principal	0.009522	0.112726	0.045357
Ventanas de la fachada lateral	0.013753	0.162827	0.065515

La capacidad total de enfriamiento con la que cuenta actualmente el Edificio E. Nacional es de 1,125,000 BTU/h que equivalen a 329,706 W.

Los datos climáticos de la Tabla 4 se utilizan para determinar la capacidad de refrigeración necesaria para alcanzar la temperatura de confort térmico, 23°C para este estudio, en el interior del Edificio E. Nacional.

En la Tabla 5 se reporta la capacidad total de refrigeración que requiere el Edificio E. Nacional para mantener la temperatura de confort térmico en su interior. Los datos en **rojo** hacen referencia a las situaciones en la cuales la capacidad de refrigeración instalada no es suficiente para alcanzar el confort.

Se puede observar que a pesar de la implementación de la segunda envolvente hay meses en los cuales no se alcanzará la temperatura de confort, a pesar de que el edificio cuenta con el equipo eficiente de aire acondicionado instalado. Sobre todo, en los meses de febrero a mayo que son los meses críticos.

De no implementarse la segunda envolvente la capacidad de refrigeración debe de aumentar de 329,706 W a 371,366 W, con la segunda envolvente tendría que incrementarse hasta 335,540 W que corresponde al valor máximo para el caso en el que se tiene convección natural entre las envolventes.

**TABLA 4. TEMPERATURA MÁXIMA Y VELOCIDAD DEL VIENTO MEDIA EN LA CIUDAD DE MÉXICO DURANTE EL AÑO 2019. (SERVICIO METEOROLÓGICO NACIONAL-CONAGUA)**

Mes	Temperatura	Velocidad del viento
	máxima (°C)	media (m/s)
<b>Enero</b>	25	2.6
<b>Febrero</b>	30	2.8
<b>Marzo</b>	30	3.0
<b>Abril</b>	30	3.3
<b>Mayo</b>	30	3.5
<b>Junio</b>	28	3.8
<b>Julio</b>	26	3.4
<b>Agosto</b>	27	3.5
<b>Septiembre</b>	26	3.6
<b>Octubre</b>	27	3.3
<b>Noviembre</b>	27	2.8
<b>Diciembre</b>	25	2.5

**TABLA 5. CAPACIDAD DE REFRIGERACIÓN REQUERIDA PARA ALCANZAR LA TEMPERATURA DE CONFORT TÉRMICO AL INTERIOR DE EDIFICIO E. NACIONAL.**

Mes	Capacidad de refrigeración requerida (W)		
	Una envolvente	Segunda envolvente	
		Aire estancado	Convección natural
Enero	302,143	292,150	292,592
Febrero	369,766	334,229	335,535
Marzo	370,276	334,229	335,537
Abril	370,958	334,229	335,538
Mayo	371,366	334,230	335,540
Junio	344,319	317,398	318,410
Julio	316,397	300,566	301,213
Agosto	330,203	308,982	309,819
Septiembre	316,564	300,566	301,214
Octubre	329,970	308,982	309,818
Noviembre	329,289	308,982	309,816
Diciembre	302,056	292,150	292,592

En la Tabla 6 se reporta la temperatura ambiente media en la cual debería de operar el sistema de aire acondicionado y una estimación de las horas de operación al día durante cada mes. Durante el mes de diciembre no es necesario encender el sistema de aire acondicionado.

En la Tabla 7 se muestra el consumo medio de energía por la operación del sistema de aire acondicionado para cada mes del año para el edificio con una envolvente y el edificio con segunda envolvente considerando que hay convección natural entre las envolventes, se toma este caso porque durante el tiempo de operación debe de existir un gradiente de temperatura entre las envolventes.



**TABLA 6. TEMPERATURA AMBIENTE MEDIA A LA QUE OPERA EL SISTEMA DE AIRE ACONDICIONADO Y HORAS DE OPERACIÓN AL DÍA PARA CADA MES DEL AÑO 2019.**

Mes	Temperatura ambiente	Tiempo de operación
	media (°C)	horas/ día
Enero	24.0	4
Febrero	27.9	8
Marzo	26.3	10
Abril	25.8	10
Mayo	27.5	10
Junio	26.4	8
Julio	24.0	6
Agosto	24.7	6
Septiembre	24.5	6
Octubre	23.7	3
Noviembre	24.4	3
Diciembre	-----	-----

**TABLA 7. CONSUMO DIARIO DE ENERGÍA POR OPERACIÓN DEL AIRE ACONDICIONADO PARA CADA MES Y AHORRO DIARIO DE ENERGÍA DEBIDO A LA IMPLEMENTACIÓN DE LA SEGUNDA ENVOLVENTE.**

Mes	Consumo de energía (kWh/día)		Ahorro de energía
	Una envolvente	Segunda envolvente	(kWh/día)
Enero	1156.2	1135.9	20.3
Febrero	2731.5	2540.4	191.1
Marzo	3160.1	3012.1	148.0
Abril	3133.0	2994.9	138.1
Mayo	3373.5	3144.6	228.9
Junio	2582.3	2440.0	142.3
Julio	1734.1	1703.8	30.3
Agosto	1788.6	1738.0	50.6
Septiembre	1775.6	1729.7	46.0
Octubre	854.6	844.1	10.5
Noviembre	882.6	862.2	20.4
Diciembre	0.0	0.0	0.0

Considerando que se trabaja en promedio 22 días por mes, el ahorro de energía para el año 2019 es de 22,583 kWh.

En la Figura 21 se muestra un análisis de sensibilidad para determinar cuáles son los parámetros que influyen más en el consumo de energía. Como se puede ver la fracción de aire que sale del espacio a refrigerar es el parámetro que mayor impacto tiene en el consumo de energía. Por esta razón es importante realizar las pruebas de hermeticidad y corregir las infiltraciones que se detecten en ellas.

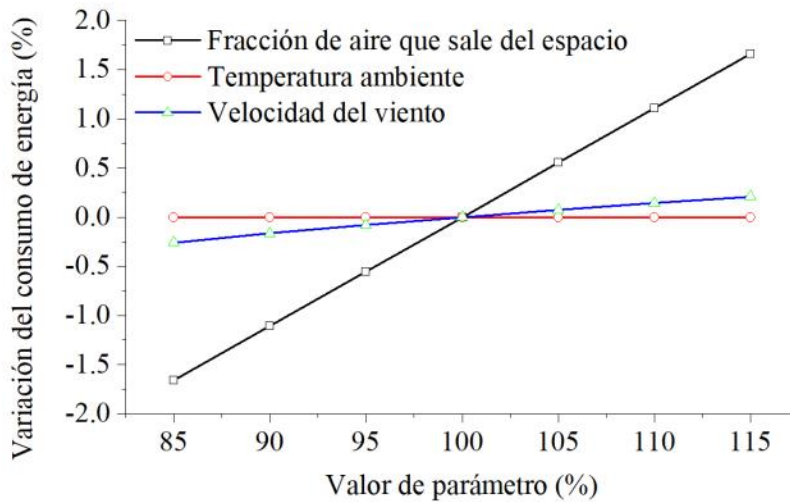
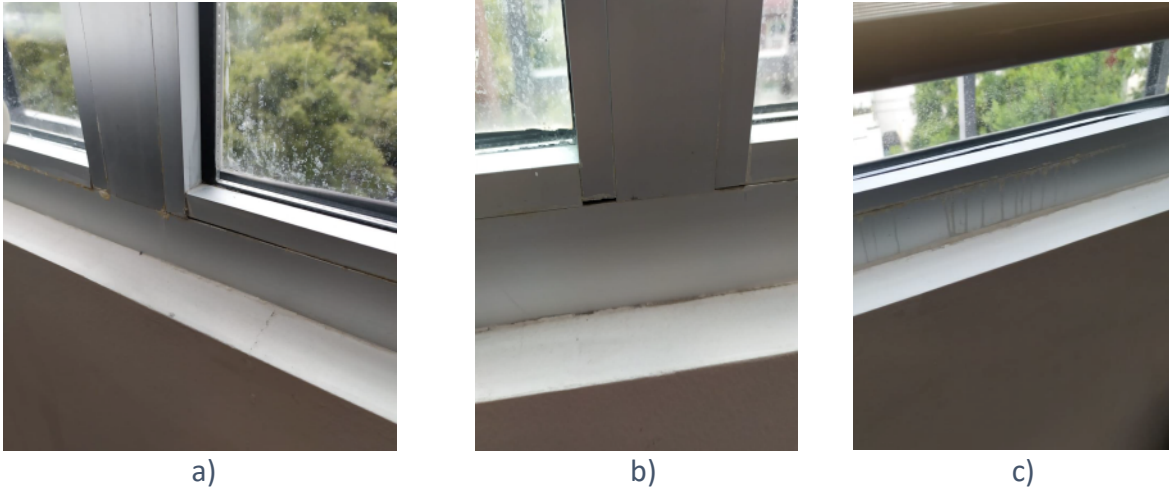


Figura 21. Análisis de sensibilidad del consumo de energía del sistema de aire acondicionado del Edificio E. Nacional.

## 5.2. Pruebas de hermeticidad

Durante la realización de las pruebas de envolvente, se encontró evidencia de infiltración de agua, a través de la falta de sellos en perfiles de cancelería, o bien, a una mala ejecución de ensambles de perfiles de aluminio; además de la baja calidad de los acabados exteriores. Ver **Figura 22**.



**Figura 22.** Prueba Tipo 2, a) carente de calidad de instalación de cancelería, así como humedades; b) infiltraciones de agua a través de los perfiles de aluminio y c) infiltraciones de agua en las uniones de los perfiles de aluminio.

La realización de las pruebas Tipo 2, se ejecutaron en el primer nivel de la fachada principal, debido a que sólo se encontraban instalados andamios hasta el primer y segundo nivel a ver Figura 23.



**Figura 23.** Realización de la prueba tipo 2. Utilización de la boquilla de aspersión, cumplimiento con los requerimientos que pide el estándar AAMA 501.2 -03.

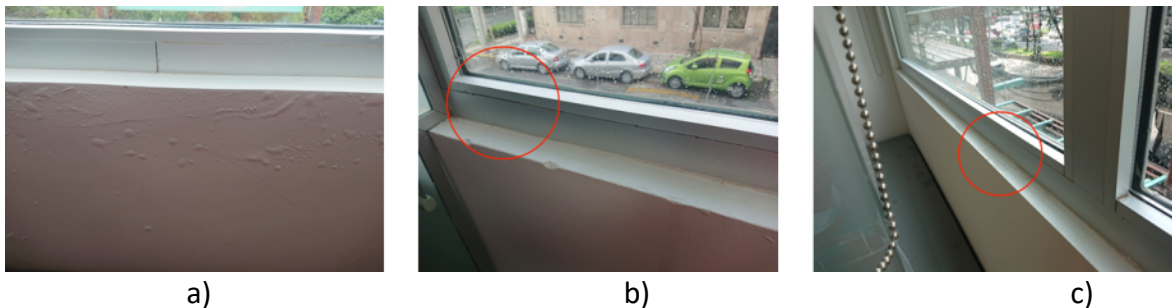
En la **Figura 24**, se muestra donde se realizaron las pruebas Tipo 2, a 5 elementos evaluados sobre la fachada principal (Sur).



**Figura 24.** Fachada Sur.

Los resultados de las pruebas realizadas fueron a 4 elementos, que se les introdujo agua y al resto de las ventanas se encontraron diversas señales de estancamiento de agua de mucho tiempo y que ahora podía observarse salitre en las uniones de los perfiles de aluminio

La **Figura 25**, muestra tres imágenes posteriores a la aplicación de la prueba Tipo 2, encontrando una serie de incidencias, cómo ingreso de agua a través de los perfiles de aluminio. Estas pruebas fueron realizadas unos meses posteriores a la terminación de trabajos de renovación del edificio.



**Figura 25.** Prueba Tipo 2, a) carente de calidad de instalación de cancelería, así como humedades; b) infiltraciones de agua a través de los perfiles de aluminio y c) infiltraciones de agua en las uniones de los perfiles de aluminio.

También sobre de la fachada lateral (poniente) se realizaron una serie de pruebas correspondientes al Tipo 2, por las mismas condiciones de apoyo para su realización. Ver **Figura 26**.



**Figura 26.** Realización de la prueba tipo 2. Sobre la fachada lateral (Poniente).

A continuación, se muestra la fachada poniente, donde se realizaron 4 pruebas, indicadas en la siguiente **Figura 27**.



**Figura 27.** Fachada Poniente.

Los resultados de las pruebas realizadas fueron a 3 elementos que se les introdujo agua y el resto de los elementos se visualizó hallazgos de salitre como los otros elementos en los perfiles de aluminio, como la otra fachada.

La **Figura 28**, muestra dos imágenes posteriores a la aplicación de la prueba Tipo 2, encontrando una serie de incidencias, cómo ingreso de agua a través de los perfiles de

aluminio. Estas pruebas fueron realizadas unos meses posteriores a la terminación de trabajos de renovación del edificio.



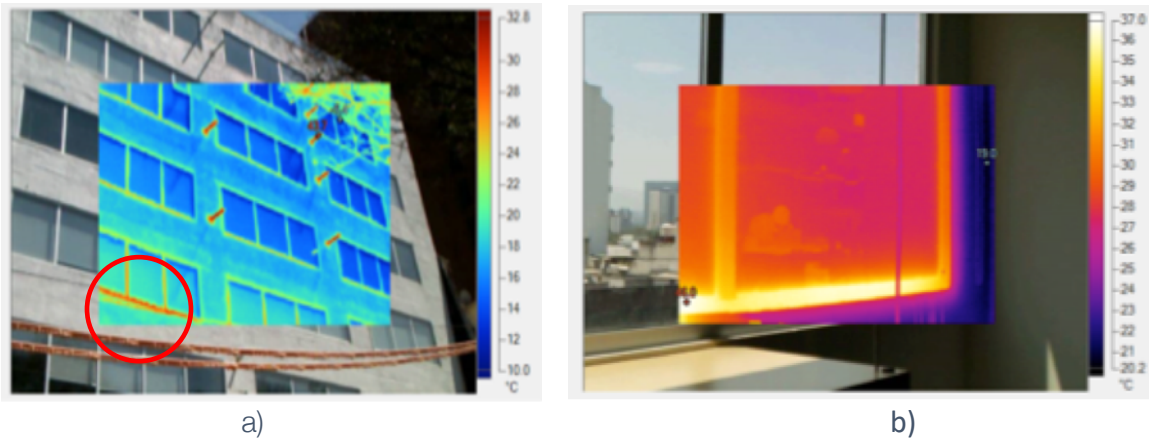
**Figura 28.** Prueba Tipo 2, a) introducción de agua y posteriormente se genera un escurrimiento hacia los antepechos interiores; b) infiltraciones de agua a través de los perfiles de aluminio.

Por lo tanto, es importante realizar una serie de mejoras para corregir las incidencias encontradas, para evitar infiltraciones o fugas de aire en un futuro. De no corregir las incidencias una de las consecuencias será un mayor consumo de energía, a través de los equipos de aire acondicionado, para mantener una temperatura de confort en los interiores.

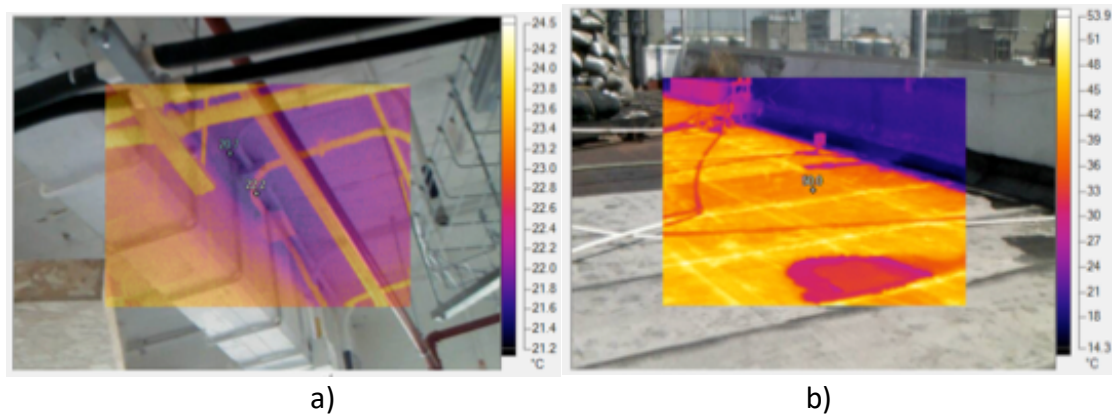
### 5.3. Pruebas termográficas

Las pruebas realizadas, con la cámara termográfica, a ambas fachadas fueron reveladoras, debido a que se localizaron áreas sensibles donde se aprecian zonas de infiltraciones a través de la cancelería de aluminio, en la fachada principal (sur). Ver **Figura 29**.

En la **Figura 30**, se muestra una serie de imágenes termográficas, donde se evidencia infiltraciones de agua en azotea, las cuales fueron atendidas, pero nos deja ver que estas pruebas no sólo reportan infiltraciones de aire, sino también de agua, a través de diferencia de temperaturas bajas (color morado).

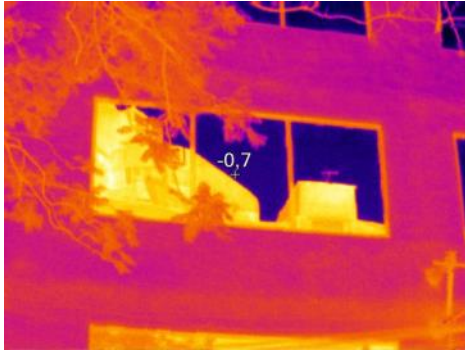


**Figura 29.** Prueba Termográfica: a) fachada sur, los marcos de aluminio presenta una temperatura promedio de 23°C, sin embargo, el marco inferior del segundo nivel muestra una temperatura similar a la de los muñones; b) imagen que muestra una temperatura interior de 36°C en el marco de aluminio inferior de esta ventana.

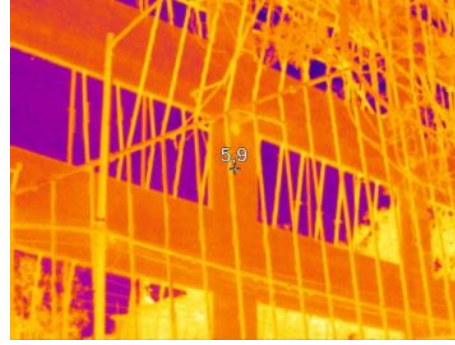


**Figura 30.** Prueba termográfica: se localizó una infiltración de agua desde la azotea hacia al nivel inferior; b) imagen del proceso de instalación del sistema de riego en azotea para las áreas de paisaje.

Al momento de realizar las tomas de las imágenes con la cámara termográfica, en las distintas fachadas, existen otros elementos como: árboles, edificaciones colindantes; así como la estructura que soportará la doble envolvente, generan sombras que se reflejan en los elementos vidriados: Ver **Figura 31**, obteniendo temperaturas de los materiales que conforman la envolvente poco convincente.



a)



b)

**Figura 31.** Muestra en imágenes termográficas: a) imagen donde se refleja los elementos de enfrente de la fachada, b) imagen donde se refleja en la fachada una serie de elementos: vegetación (árboles) y la estructura que recibirá la segunda envolvente.

Este tipo de pruebas corroboran el comportamiento térmico de las envolventes, para verificar si hay posibles infiltraciones o fugas de aire a través de las temperaturas obtenidas de los materiales de las fachadas.



# 6. Conclusiones

Al realizar el análisis correspondiente a las distintas fachadas que integran el Edificio E. Nacional, con base en el sistema de aire acondicionado que actualmente está instalado, se concluye que en diversos meses no llega abatir la carga térmica con una sola fachada, pero aún con la instalación de la segunda envolvente tampoco se lograría llegar a la temperatura de confort para los ocupantes.

En el estado actual del edificio la capacidad de refrigeración requerida excede a la capacidad instalada durante 7 meses del año, con la segunda envolvente esta capacidad se ve excedida en 4 meses. Por lo cual, los usuarios tendrán mayor confort térmico por 3 meses más. La instalación de la segunda envolvente puede generar un ahorro de energía por refrigeración en el interior del edificio de 22,583 kWh/años, según datos de 2019. El análisis de sensibilidad muestra que la variable que mayor impacto tiene en el consumo de energía para climatización es la cantidad de aire externo que ingresa al interior del edificio. Una variación del 15% de la fracción de aire que sale del espacio climatizado impacta en casi 2% la cantidad de energía que se debe de emplear para el acondicionamiento del edificio, por tal razón es importante verificar su hermeticidad.

Se realizó de manera conjunta una serie de pruebas para verificar la hermeticidad de los elementos que conforman la primera fachada, arrojando resultados como infiltraciones de aire a través de la cancelería en algunas ventanas, debido a la carente calidad de la instalación de cancelería de aluminio y sellos. Estas infiltraciones se traducen en el incremento de cargas térmicas no consideradas desde el diseño y por tanto, la capacidad del aire acondicionado es insuficiente para acondicionar el edificio durante gran parte del año.

El tipo de sistema VRV que opera de acuerdo a la demanda de los ocupantes, se diseñó de acuerdo a ciertos requerimientos de la certificación internacional LEED, basado en el estándar ASHRAE 62.1-2010, el cual requiere una toma de inyección de aire de exterior, además de que solicita que exista aire de renovación a ciertas tasas de ventilación por tipo de espacio y número de personas. Logrando así, que el aire que ingresa a los usuarios finales, sea tratado a través de filtros para garantizar la calidad del aire. Con estas tasas de ventilación se consigue una correcta disolución de contaminantes, como: VOC, CO<sub>2</sub>, PM 2.5, PM 10 y ozono; en el aire que respiran los ocupantes del inmueble, sin considerar virus y bacterias de enfermedades que viajan a través de los ductos del sistema de aire acondicionado.

# Bibliografía

AHRI. Air Conditioning and Refrigeration Institute.

AMERIC. Asociación Mexicana de Empresas del Ramo de Instalaciones para la Industria de la Construcción.

Angeli, D. and Dama, A. (2015) Modelling natural ventilation in double skin facade, *Energy Procedia*, 78, pp. 1537 – 1542.

ASHRAE 90.1 - 2010. American Society of Heating, Refrigeration and Air Conditioning Engineers.

Asociación Española de Termografía Infrarroja, Guía de la Termografía infrarroja. Aplicaciones en ahorro y eficiencia energética.

Carbonell M. (2019) Reglamento de Construcción de la Ciudad de México. Tirant Lo Blanch. México

Cengel, Yunus A. Transferencia de Calor y Masa. Un enfoque práctico, edit. Mc Grall Hill, tercera edición, 2007.

Diario Oficial, 2001. Norma Mexicana. NOM-008-ENER-2001. Eficiencia energética en edificaciones, envolvente de edificios no residenciales. México.

Ghadamian, H. et al. (2012) 'Analytical solution for energy modeling of double skin facades building', *Energy and Buildings*, 50, pp. 158–165.

Manz, H. and Frank, T. (2005) 'Thermal simulation of buildings with double-skin facades', *Energy and Buildings*, 37, pp. 1114–1121.

Richards, B. (2006) *Arquitectura de Cristal*. Blume. Barcelona, España.

Shameri, M. A. et al. (2011) 'Perspectives of double skin facade systems in buildings and energy saving', *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 15, pp. 1468–1475.

SMACNA (1996) *Sheet Metal and Air Conditioning Contractors National Association*. Segunda Edición.

U.S. Green Building Council (2013) *LEED Reference Guide for Building Design and Construction*, v4.

Velázquez, G. (2017) *Reconversión Sustentable de Edificios*. Universidad Iberoamericana. Ciudad de México, México.