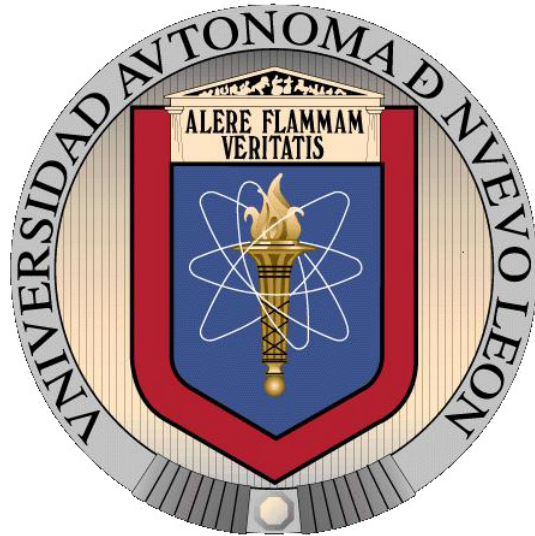


Universidad Autónoma de Nuevo León

Facultad de Ingeniería Mecánica y Eléctrica



**Efecto de la inercia térmica de la envolvente sobre  
la climatización de edificios comerciales**

Autor: Ing. Rafael Olvera Arévalo

Director: Dr. Simón Martínez Martínez

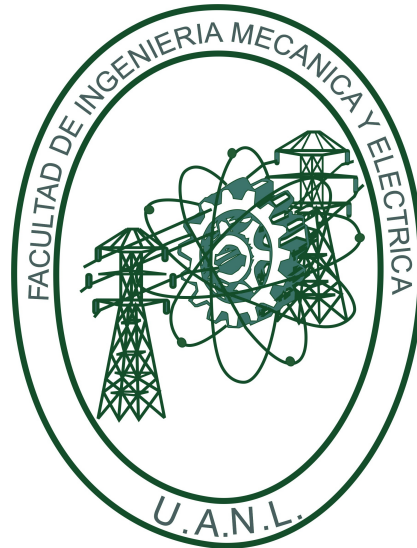
En opción al grado de Maestría en Ciencias de la Ingeniería con  
Orientación en Energías Térmica y Renovable

San Nicolás de los Garza, Nuevo León.

Marzo 2013.

Universidad Autónoma de Nuevo León

Facultad de Ingeniería Mecánica y Eléctrica



**Efecto de la inercia térmica de la envolvente sobre  
la climatización de edificios comerciales**

Autor: Ing. Rafael Olvera Arévalo

Director: Dr. Simón Martínez Martínez

En opción al grado de Maestría en Ciencias de la Ingeniería con  
Orientación en Energías Térmica y Renovable

San Nicolás de los Garza, Nuevo León.

Marzo 2013.

Universidad Autónoma de Nuevo León  
Facultad de Ingeniería Mecánica y Eléctrica  
División de Estudios de Posgrado

Los miembros del Comité de Tesis recomendamos que la tesis **Efecto de la inercia térmica de la envolvente sobre la climatización de edificios comerciales** realizada por el alumno Rafael Olvera Arévalo, con número de matrícula 1541834, sea aceptada para su defensa como opción al grado de Maestro en Ciencias de la Ingeniería con Orientación en Energías Térmica y Renovable.

**El Comité de Tesis**

---

Dr. Simón Martínez Martínez

---

Dr. Fausto Alejandro Sánchez Cruz

---

Dr. Salvador Valtierra Gallardo

---

Dr. Moisés Hinojosa Rivera  
Subdirector de División de Estudios de Posgrado

---

# Agradecimientos

---

Agradezco la oportunidad de poder realizar este trabajo a mi padre por todo su amor y por el apoyo que me brinda. A mis hermanos que siempre complementan mi perspectiva ante la vida. A toda mi familia que siempre enriquece mi mundo y me ayuda a ser mejor. A mi madre que me dejó una maravillosa lección.

Agradezco a mis amigos/familia y a mi novia, con los que he crecido y seguiré aprendiendo a vivir la vida a plenitud.

Agradezco a mis amigos/colegas, con los que he compartido estos años de la maestría y espero seguir aprendiendo con y de ellos.

Agradezco a mis profesores, por el trabajo que realizan y el tiempo que me han brindado.

Agradezco a la empresa Owens Corning por el apoyo proporcionado durante mi estancia en la maestría.

---

# Índice general

---

Índice general	II
Índice de figuras	V
Índice de tablas	VIII
Lista de símbolos	IX
Introducción	XII
<b>1 Antecedentes</b>	<b>1</b>
1.1. Energía y edificaciones . . . . .	1
1.1.1. Contexto energético en México . . . . .	2
1.1.2. Edificios comerciales en México . . . . .	3
1.1.3. Metodología actual de evaluación energética a edificaciones en México . . . . .	8
1.2. Transferencia de calor y masa . . . . .	11
1.2.1. Transferencia de calor a través de elementos opacos. . . . .	12
1.2.2. Transferencia de calor a través de elementos translúcidos. . . . .	14
1.2.3. Radiación entre superficies . . . . .	17
1.2.4. Transporte de humedad . . . . .	18
1.3. Clima . . . . .	22
1.4. Confort . . . . .	24

1.4.1. Cartas Bioclimáticas . . . . .	27
1.5. Inercia térmica . . . . .	29
1.5.1. Caracterización de muros y losas . . . . .	30
1.5.2. Masa térmica y aislamientos térmicos . . . . .	33
<b>2 Envolvente de edificios comerciales</b>	<b>36</b>
2.1. Almacenes . . . . .	37
2.2. Hoteles y restaurantes . . . . .	38
2.3. Oficinas . . . . .	38
2.4. Centros comerciales . . . . .	39
2.5. Hospitales . . . . .	40
2.6. Escuelas . . . . .	41
<b>3 Metodología empleada en el trabajo</b>	<b>43</b>
3.1. Simulación computacional de edificios . . . . .	43
3.1.1. Programa de cálculo . . . . .	44
3.1.2. Modelo geométrico . . . . .	44
3.2. Descripción del edificio . . . . .	45
3.2.1. Ubicación y clima del sitio . . . . .	45
3.2.2. Sistema de climatización del aire . . . . .	47
3.2.3. Materiales de construcción . . . . .	48
3.3. Diseño de experimentos . . . . .	52
3.3.1. Experimentos Factoriales . . . . .	52
3.3.2. Determinación de los factores y sus niveles . . . . .	53
3.3.3. Análisis de Diseños Factoriales a dos niveles . . . . .	57
<b>4 Resultados</b>	<b>59</b>
4.1. Análisis estadístico . . . . .	59
4.1.1. Modelo de regresión lineal . . . . .	62
4.1.2. Factores principales . . . . .	65
4.1.3. Interacciones entre factores . . . . .	71

4.1.4. Capacidad calorífica . . . . .	74
4.2. Análisis térmico . . . . .	80
<b>5 Conclusiones</b>	<b>86</b>
5.1. Trabajos futuros . . . . .	88
<b>Bibliografía</b>	<b>91</b>
<b>A Descripción de EnergyPlus</b>	<b>98</b>
<b>B Descripción de Blender</b>	<b>101</b>
<b>C Descripción de ODS-Studio</b>	<b>102</b>
<b>D Descripción de Meteonorm 6</b>	<b>103</b>
<b>E Descripción de R y Rcmdr</b>	<b>104</b>
<b>F Salidas de comandos en R</b>	<b>105</b>

---

# Índice de figuras

---

1.1. Mercado objetivo del sector inmobiliario de uso comercial. [35] . . . . .	6
1.2. Proyección de nuevas edificaciones del sector inmobiliario de uso comercial. [35] . . . . .	6
1.3. Proyección de renovación del sector inmobiliario de uso comercial. [35] . .	7
1.4. Proyección de reacondicionamientos del sector inmobiliario de uso comer- cial. [35] . . . . .	8
1.5. Proyección del consumo energético del sector inmobiliario de uso comer- cial. [35] . . . . .	9
1.6. Potencial de ahorro energético del sector inmobiliario de uso comercial. [35]	9
1.7. Representación del intercambio de calor y masa en un edificio. . . . .	11
1.8. Transmisión de la radiación solar a través del vidrio. . . . .	16
1.9. Intercambio de radiación entre dos elementos diferenciales de área. . . . .	18
1.10. Contenido de humedad como función de la posición en el material (a). Profundidad efectiva de penetración (b). . . . .	21
1.11. Mapa mundial de la clasificación climática de Köppen.[64] . . . . .	25
1.12. Clasificación Köppen dentro de México.[64] . . . . .	25
1.13. Carta bioclimática de Olgyay.[56] . . . . .	28
1.14. Carta bioclimática generada para Monterrey.[9] . . . . .	29
1.15. Representación del tiempo de retraso y el factor de decremento. . . . .	31
3.1. Vista exterior del edificio. . . . .	45



3.2. Vista hacia el interior del edificio. . . . .	46
3.3. Temperatura del aire exterior horaria en Monterrey, N.L. . . . .	47
3.4. Humedad relativa del aire exterior horaria en Monterrey, N.L. . . . .	48
3.5. Trayectoria solar para la coordenadas del sitio. . . . .	49
4.1. Gráfico de pareto, importancia de los factores y sus interacciones. . . . .	60
4.2. Arreglo experimental con respuestas para cada simulación. . . . .	61
4.3. Residuales contra valores ajustados por el modelo lineal. . . . .	63
4.4. Residuales contra cuantiles teóricos para el modelo lineal. . . . .	64
4.5. Residuales estandarizados contra valores ajustados por el modelo lineal. . . . .	65
4.6. Gráfica semi-Normal para Energía.Enfriamiento. $a = 0.05$ . . . . .	66
4.7. Gráfica Normal para Energía.Enfriamiento. $a = 0.05$ . . . . .	68
4.8. Efectos principales de cada factor experimental. . . . .	70
4.9. Interacción entre la posición del aislamiento y la operación del equipo de climatización. . . . .	72
4.10. Interacción entre la operación del equipo de climatización y la infiltración de aire. . . . .	73
4.11. Interacción entre la emisividad y el valor U de las ventanas. . . . .	74
4.12. Interacción entre la capacidad calorífica y la posición del aislamiento. . . . .	75
4.13. Interacción entre la capacidad calorífica y la emisividad de las ventanas. . . . .	76
4.14. Interacción entre la capacidad calorífica y la ventilación nocturna. . . . .	77
4.15. Interacción entre la capacidad calorífica y la operación del equipo de climatización. . . . .	78
4.16. Interacción entre la capacidad calorífica y la infiltración. . . . .	79
4.17. Interacción entre la capacidad calorífica y la temperatura interior. . . . .	80
4.18. Casos de interés y respuestas calculadas con el modelo lineal. . . . .	81
4.19. Temperatura del aire interior para una zona del edificio. . . . .	82
4.20. Humedad relativa en el aire interior para una zona del edificio. . . . .	83
4.21. Consumo energético y potencia mensual para el edificio. . . . .	84
4.22. Desglose del balance de calor en el edificio. . . . .	85

F.1. Salida en R del resumen para el diseño factorial empleado. . . . .	106
F.2. Modelo lineal general ajustado a las respuestas. . . . .	107
F.3. Modelo lineal reducido ajustado a las respuestas. . . . .	108

---

# Índice de tablas

---

1.1. Composición del SEN por fuente de energía.[8] . . . . .	3
1.2. Área construida y consumo eléctrico estimados para edificios comerciales en México. [34] . . . . .	5
1.3. Nomenclatura de la clasificación Köppen. . . . .	23
1.4. Datos climáticos relevantes para la evaluación energética de edificaciones. . . . .	24
3.1. Información climática y geográfica de Monterrey, N.L. . . . .	46
3.2. Materiales y sus propiedades físicas. [59] . . . . .	50
3.3. Coeficientes para el modelo de humedad en materiales. [1] . . . . .	50
3.4. Materiales translúcidos y sus propiedades. [2] . . . . .	51
3.5. Factores experimentales y niveles de estudio. . . . .	54
4.1. Nomenclatura de los niveles de estudio. . . . .	69

---

# Lista de símbolos

---

Símbolo	Nombre	Unidades
$\alpha$	Difusividad térmica	$\text{m}^2/\text{s}$
$\delta$	Coefficiente de difusión del vapor en el aire	$\text{kg}/\text{msPA}$
$\delta_M$	Profundidad efectiva de penetración de humedad	m
$\kappa$	Coefficiente de absorción	$1/\text{mm}$
$\mu$	Factor de resistencia a la difusión del vapor dependiente de la humedad	
$\lambda$	Calor de vaporización	$\text{J}/\text{kg}$
$\Phi$	Tiempo de retraso	h
$\phi$	Humedad relativa	%
$\rho$	Densidad	$\text{kg}/\text{m}^3$
$\sigma$	Constante de Stefan-Boltzmann	
$\theta$	Ángulo de incidencia	°
$\theta'$	Ángulo de refracción	°
$A$	Área	$\text{m}^2$
$A_T$	Capacidad de retención de humedad	$\text{m}^3/\text{kg}$
$B_\rho$	Coefficiente de gradiente térmico	$\text{kg}/\text{kgK}$
$c$	Capacidad calorífica	$\text{J}/\text{kgK}$
		continúa...

---

<b>Símbolo</b>	<b>Nombre</b>	<b>Unidades</b>
$D^w$	Coefficiente de difusión del líquido	m/s
$E$	Potencia emitida	W
$f$	Factor de decremento	
$h$	Coefficiente de transferencia de calor	W/m <sup>2</sup> K
$h_M$	Coefficiente de transporte de masa por convección	kg/m <sup>2</sup> s
$h_v$	Entalpía de evaporación del agua	J/kg
$I$	Irradiancia	W/m <sup>2</sup>
$k$	Conductividad térmica	W/mK
$k^w$	Conductividad térmica dependiente de la humedad	W/mK
$L$	Longitud	m
$pp$	Precipitación	mm
$q$	Tasa de transferencia de calor	W
$q''$	Flujo de calor por unidad de área	W/m <sup>2</sup>
R	Resistencia térmica	m <sup>2</sup> K/W
$T$	Temperatura	°C
$t$	Tiempo	s
U	Coefficiente global de transferencia de calor	W/m <sup>2</sup> K
$U$	Contenido de humedad	kg/kg
$W$	Relación de humedad	kg/kg
$\frac{\partial H}{\partial T}$	Almacenamiento de calor del material húmedo	J/m <sup>3</sup> K
$\frac{\partial w}{\partial \phi}$	Almacenamiento de humedad del material húmedo	kg/m <sup>3</sup>

---

# Resumen

---

El consumo de energía por climatización de edificios representa alrededor de un tercio del uso final de la energía a nivel mundial. Se espera que este consumo aumente considerablemente en los próximos años, especialmente en los países conocidos como economías emergentes, siendo este el caso de México. Para garantizar la disponibilidad de los recursos energéticos, es necesario hacer un mejor uso de la energía en todos los sectores. Las normas oficiales mexicanas actuales, sobre evaluación energética a edificios comerciales, deben avanzar como lo han hecho varios países del mundo, hacia una representación más detallada de los fenómenos físicos que determinan el consumo de energía de un edificio. La simulación computacional de edificios es una herramienta que representa dinámicamente los fenómenos de transferencia de calor y masa a través de la envolvente de un edificio, por lo que brinda mejores estimaciones y ayuda a obtener un mejor desempeño energético. La inercia térmica de la masa contenida en la envolvente es uno de muchos factores que determinan la climatización del edificio, por ello, es necesario tener una forma de diferenciar la influencia específica de cada factor. El presente trabajo de tesis, busca evaluar mediante la metodología del análisis de experimentos factoriales a dos niveles, las diferencias entre los distintos factores. Con esta metodología, en lugar de modificar un factor a la vez, se puede obtener la misma o más información con un menor número de simulaciones y además facilita el procesamiento de los resultados mediante un análisis gráfico de los resultados.

---

# Introducción

---

El presente trabajo de tesis surge al reconocer la importancia que tienen las edificaciones en la vida del hombre; el desarrollo humano se ha dado, y tal vez cada vez más, dentro de algún espacio o edificación; por ello, la mejora en las condiciones de vida del hombre es un tema que no pierde vigencia y que resulta apasionante. Los retos en esta materia, requieren que quién los enfrente se vea involucrado con el uso de herramientas novedosas y cuya curiosidad le permita explorar nuevos campos del conocimiento a fin de poder tener un enfoque integral de la problemática energética. Ciertamente no es suficiente justificación el obtener una gratificación personal, sino que al hacer este trabajo se puede impactar de forma positiva en las personas que finalmente harán uso de estos espacios.

## Hipótesis

La hipótesis a prueba en este trabajo plantea que el consumo energético de un edificio climatizado ubicado en una región cálida, puede ser reducido al aprovechar de la inercia térmica de la masa contenida en la envolvente del mismo. El método seleccionado para probar la magnitud de la reducción en el consumo, consiste en realizar un análisis energético del edificio, mediante simulación computacional, mientras se varían los factores que afectan la inercia térmica para un cierto número de combinaciones de los factores, logrando evaluar qué alternativa es la mejor.

## Objetivos

Además de buscar probar la validez de la hipótesis, se pretende demostrar la importancia de la simulación energética de edificios en etapas tempranas del diseño. Básicamente, al emitir recomendaciones sobre el diseño de la envolvente del edificio toda vez que se haya identificado la importancia de cada factor. También, se busca hacer uso de herramientas computacionales que sean distribuidas bajo licencias abiertas, ya que el costo de las licencias es muchas veces una limitante para realizar simulaciones computacionales.

## Estructura del documento

El documento consta de cinco capítulos; en el primer capítulo se presenta una reseña del panorama energético actual y los fundamentos teóricos que se utilizan en las simulaciones computacionales de edificios, al final del capítulo se mencionan las definiciones de la inercia térmica. El segundo capítulo señala las características de las envolventes comúnmente encontradas en edificios comerciales, esto con la finalidad de apreciar las diferencias y similitudes que tienen los edificios comerciales en este rubro. Más adelante, en el tercer capítulo se define la metodología del trabajo, el diseño de experimentos factoriales aplicado a la simulación computacional de edificios. El cuarto capítulo muestra los resultados y el análisis estadístico correspondiente para evaluar si es que se sustenta la hipótesis señalada. Finalmente, el quinto capítulo contiene las conclusiones que se desprenden del trabajo y menciona algunas áreas de futura investigación.



# Capítulo 1

---

## Antecedentes

---

Para entrar al estudio de cualquier problemática es recomendable tener un panorama claro y completo del problema en cuestión. Con este fin, se comienza por establecer la necesidad de este tipo de estudios y además se incluye una revisión general a los aspectos técnicos involucrados en el análisis energético de edificaciones.

### 1.1. Energía y edificaciones

La problemática energética actual es un asunto complejo que debe ser abordado por distintos frentes; cada sector económico tiene la responsabilidad de trabajar hacia un mejor aprovechamiento de la energía. Considerando que la energía eléctrica es la forma de energía más consumida en las edificaciones, se debe trabajar para diversificar la generación eléctrica a fin de reducir la dependencia de los combustibles fósiles y ampliar la capacidad de generación mediante fuentes renovables.

El sector de edificios es responsable del 35-40 % del consumo energético final a nivel mundial [10], el cuál considera la energía obtenida por todas las fuentes que actualmente se explotan en el mundo. De acuerdo con proyecciones hechas por la Agencia Energética Internacional (IEA) hacia el año 2050 en las que se estiman: el crecimiento demográfico, el desarrollo de tecnologías más eficientes en este sector y la aplicación

de políticas de apoyo al uso eficiente de la energía; se visualiza un crecimiento del 5 % en el consumo final de energía. En contraste, mantener las condiciones actuales en este sector resultaría en un incremento del 60 % para el año 2050 [17].

La necesidad de reducir el consumo energético no viene dada solamente por la escasez de recursos energéticos, es también motivada por el gran potencial económico que tiene asociado; el desarrollo y la producción de nuevas tecnologías impulsa la competencia entre los capitales productivos que mantienen activos a los sectores que dependen de ellos.

### **1.1.1. Contexto energético en México**

El artículo vigésimo séptimo de la Constitución Política de los Estados Unidos Mexicanos declara que los recursos naturales, las aguas, las tierras y los energéticos ubicados a lo largo de toda la extensión del territorio nacional son propiedad de la nación. El Sistema Eléctrico Nacional (SEN), operado por la Comisión Federal de Electricidad (CFE), una empresa propiedad de la nación; genera electricidad por medio de combustibles fósiles, presas hidroeléctricas, combustibles nucleares y energías alternativas; i.e. eólica y geotérmica. A pesar de la declaratoria constitucional, se han introducido reformas a la legislatura energética para habilitar la participación de los Productores Independientes de Energía (PIE), principalmente personas morales, e.g. sociedades o cooperativas, que aprovechan algún potencial energético, bien sea derivado de sus procesos productivos como es el caso de la cogeneración o bien haciendo uso de recursos naturales como cauces de ríos para la generación de electricidad a pequeña escala.

México es un país con tradición de conservación ambiental, a pesar de su situación como economía emergente en el marco mundial. La actual operación y futuros proyectos de generación eléctrica en campos eolieléctricos en el estado de Oaxaca; así como las plantas geotermoeléctricas del norte del país que operan desde hace varios años, son ejemplo de ello. Sin embargo, es un hecho que la mayor parte de la energía eléctrica

generada en el país proviene de las fuentes fósiles y de centrales de generación hidroeléctricas. La capacidad instalada en el SEN a la fecha de este trabajo se muestra en la Tabla 1.1

<b>Tipo</b>	<b>Capacidad (MW)</b>	<b>Porcentaje (%)</b>
Termoeléctrica	23,121.17	45.2
Hidroeléctrica	11,210.90	21.9
Carboeléctrica	2,600.00	5.1
Geotermoeléctricas	886.60	1.7
Eoloeléctricas	86.75	0.2
Nucleoeléctricas	1,364.88	3.61
Termoeléctrica (PIE)	11,906.90	2.83
<b>Total</b>	<b>51,177.20</b>	<b>100</b>

**Tabla 1.1:** *Composición del SEN por fuente de energía.*[8]

Considerando la gran demanda de energía necesaria para el desarrollo de México, se visualiza una expansión de la capacidad instalada del SEN; esta situación involucra el aumento en la participación de las fuentes alternas de energía y la creación de plantas termoeléctricas abastecidas por gas natural. A finales del año 2011 se dio a conocer por parte de la Secretaria de Energía, la existencia de yacimientos de gas de lignita en el norte del país; las reservas de este recurso podrían durar cerca de 90 años según los reportes preliminares. Este panorama puede llevar a la reconversión de las plantas de combustóleo para que utilicen gas natural [36], cuyos productos remanentes del proceso de combustión son menos contaminantes que los del combustóleo. Sin embargo, el abasto no lo es todo, el crecimiento de México tiene que ir acompañado de un mejor uso de la energía para poder hablar de un crecimiento sustentable.

### 1.1.2. Edificios comerciales en México

De manera usual se hace distinción entre edificios residenciales y edificios comerciales, los edificios residenciales son las casas y edificios de departamentos en condominio. Los edificios comerciales abarcan un grupo más amplio de construcciones como

se verá más adelante. Conocer como está integrado el inventario de edificios en el país y conocer la descripción de su consumo energético es importante, sobre todo porque permite identificar las áreas de oportunidad y definir los principales problemas que afectan al sector comercial.

Las cifras estadísticas disponibles al público en los portales electrónicos de: la Secretaría de Energía (SENER), la Comisión Federal de Electricidad (CFE), la Comisión Nacional para el Uso Eficiente de la Energía (CONUEE), el Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI) y la Cámara Nacional de la Industria de la Construcción (CMIC), son limitadas o bien inexistentes con respecto al número, área construida, ubicación, uso y demanda energética de los edificios comerciales.

No obstante, existe un reporte del Programa de las Naciones Unidas para el Medio Ambiente (UNEP) [34], donde se proponen algunas aproximaciones para establecer un marco de referencia. En el reporte se discute una inconsistencia que aparece tanto en el Balance Nacional de Energía, como en la información de la CFE, pues el sector de servicios, i.e. hoteles, restaurantes, centros comerciales, escuelas y hospitales, se ve subestimado en el balance energético nacional, ya que estos edificios están conectados a la red eléctrica en mediana tensión, y por ello figuran como mediana industria, esto hace que la información de CFE al respecto de la participación de estos edificios en el uso final de la energía quede fuera de contexto. La clasificación mostrada en la Tabla 1.2 agrupa el área construida y el consumo de energía eléctrica por tipo de edificio como resultado de la investigación mencionada. De esta forma queda representado el inventario de edificaciones mexicanas y su aporte al consumo energético nacional.

Con este antecedente y como parte del Acuerdo de Cooperación Ambiental de América del Norte (ACAAN), firmado entre Estados Unidos, México y Canadá, se ha delineado un análisis sobre edificación sustentable [29], donde se representan, entre otras cosas, tres posibles escenarios de crecimiento del sector inmobiliario hacia el año 2030. El primer escenario proyecta el crecimiento manteniendo la tendencia actual del merca-

Clase de edificio	Área ( $10^6 m^2$ )	Consumo unitario (kWh/ $m^2$ )	Total (GWh)
Almacenes	5	148.32	742
Hoteles y Restaurantes	14	310.60	4,348
Oficinas	4.6	158.91	730
Centros comerciales	15.2	189.81	2,885
Teatros y recreación	2.8	242.75	728
Hospitales	6	335.57	2,013
Escuelas	121	90.11	10,903
<b>General</b>	168.6	-	22,350

**Tabla 1.2:** Área construida y consumo eléctrico estimados para edificios comerciales en México. [34]

do, así como las políticas gubernamentales de la actualidad; un segundo escenario, donde se establece una fuerte penetración en el mercado de productos y tecnologías de mayor eficiencia energética y apoyo impulsado por nuevas políticas y regulación en materia de ahorro energético; y el tercer escenario similar al segundo sólo que con proyecciones menos ambiciosas, por lo tanto más asequibles. Las Figuras 1.1- 1.6 muestran gráficas tomadas del reporte técnico de la Comisión para la Cooperación Ambiental [35] para ilustrar el potencial de crecimiento inmobiliario, particularmente se muestran las proyecciones hechas para uso comercial.

El crecimiento del mercado esperado para los años más próximos estará centrado en dos apartados: las renovaciones, que consisten en hacer cambios considerables a las edificaciones que entre otras cosas, permiten introducir mejoras energéticas; y los edificios nuevos que evidentemente son susceptibles al cumplimiento de regulaciones y diseños enfocados al ahorro energético. Con menor participación se perfila un tercer apartado, los reacondicionamientos, que consisten en modificaciones que cumplen el único objetivo de mejorar la eficiencia energética del edificio.

El tipo de edificios nuevos donde se visualiza un mayor crecimiento son las escuelas, esto obedece en cierta medida al desarrollo esperado en un país como México,

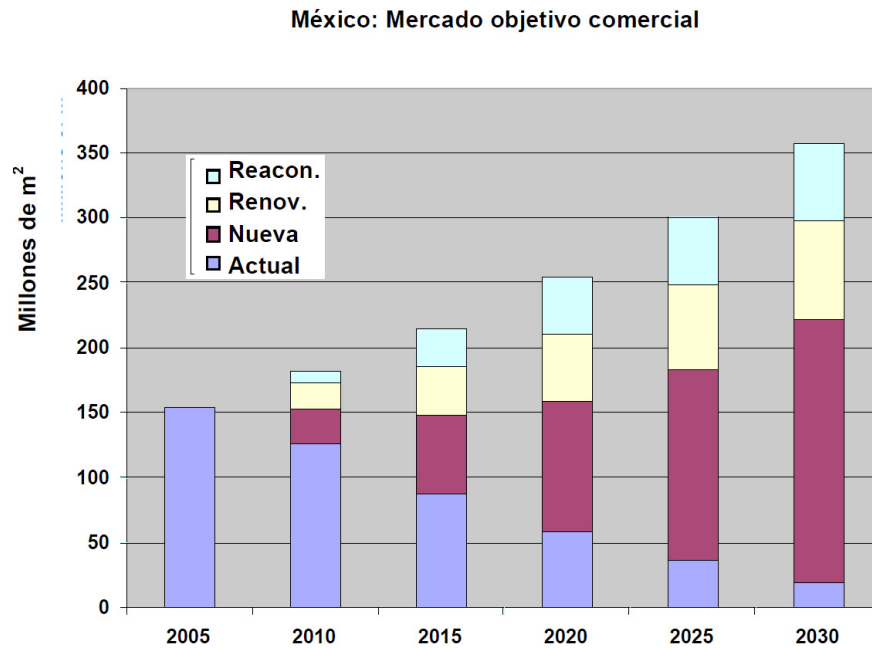


Figura 1.1: Mercado objetivo del sector inmobiliario de uso comercial. [35]

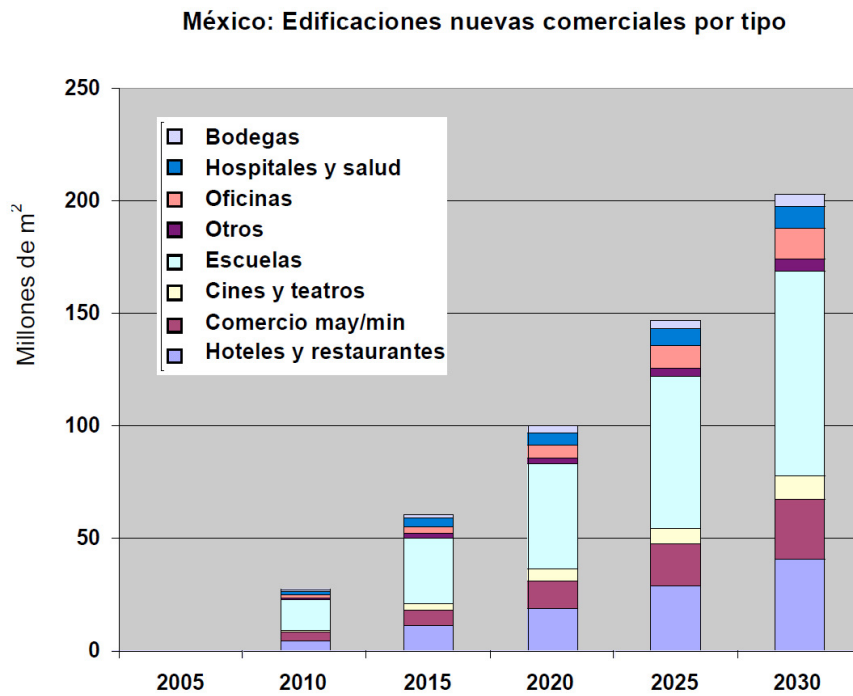
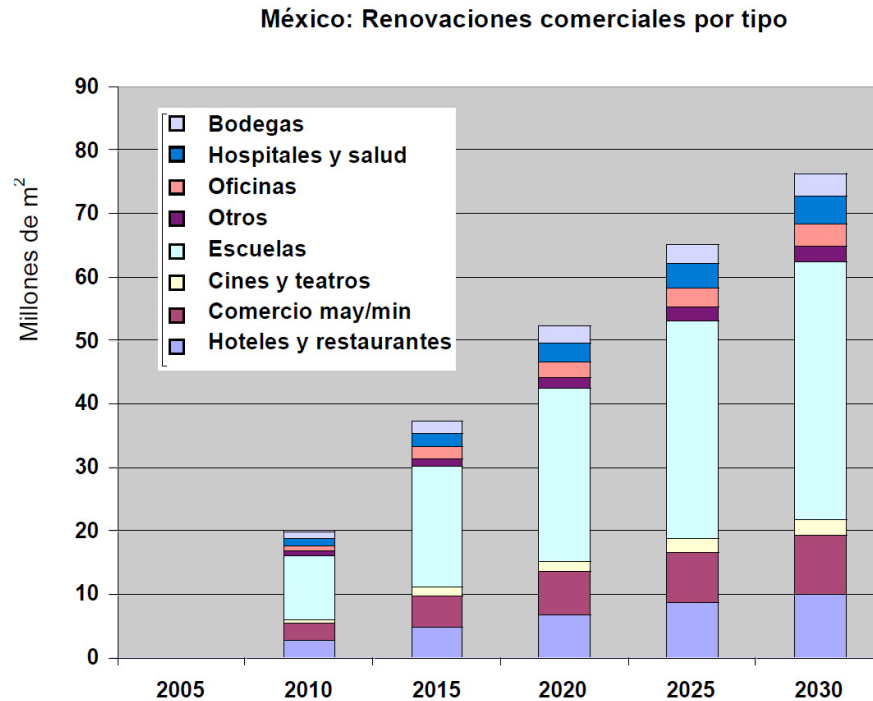


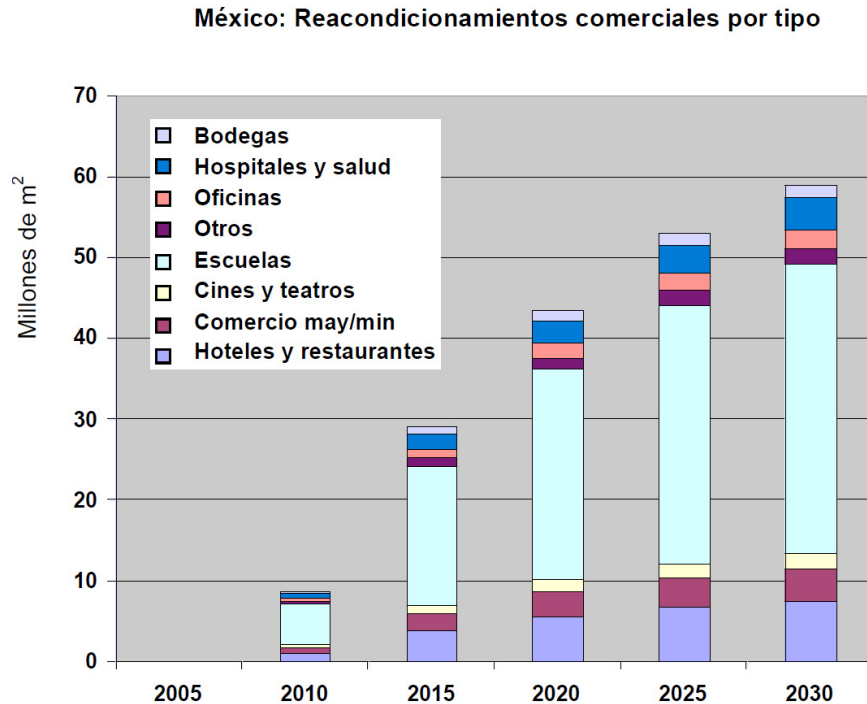
Figura 1.2: Proyección de nuevas edificaciones del sector inmobiliario de uso comercial. [35]



**Figura 1.3:** Proyección de renovación del sector inmobiliario de uso comercial. [35]

que busca aumentar el capital humano para satisfacer sus necesidades de crecimiento económico. Tanto las renovaciones como los reacondicionamientos esperan un crecimiento similar, centrado en las edificaciones escolares. Sin duda alguna, los centros educativos existentes deben sufrir procesos de modernización cada cierto tiempo si buscan mantenerse a la vanguardia y a la altura de las necesidades de la sociedad.

El crecimiento en el consumo energético bajo las condiciones actuales, también llamado *business as usual (BAU)* proyecta que las escuelas, centros comerciales, hoteles y restaurantes son los tipos de edificaciones que aumentarán su consumo energético en los próximos años. Los escenarios planteados marcan un reducción en el consumo base según muestra la Figura 1.6. En cierta forma, el objetivo energético que se busca alcanzar corresponde a este ahorro estimado. En el documento [35] se señalan dos aspectos que serán determinantes para alcanzar estas metas: que el mercado pueda elevar la eficiencia energética de los bienes que produce, y la puesta en marcha, amplia y oportunamente, de políticas energéticas que sustenten estos esfuerzos.

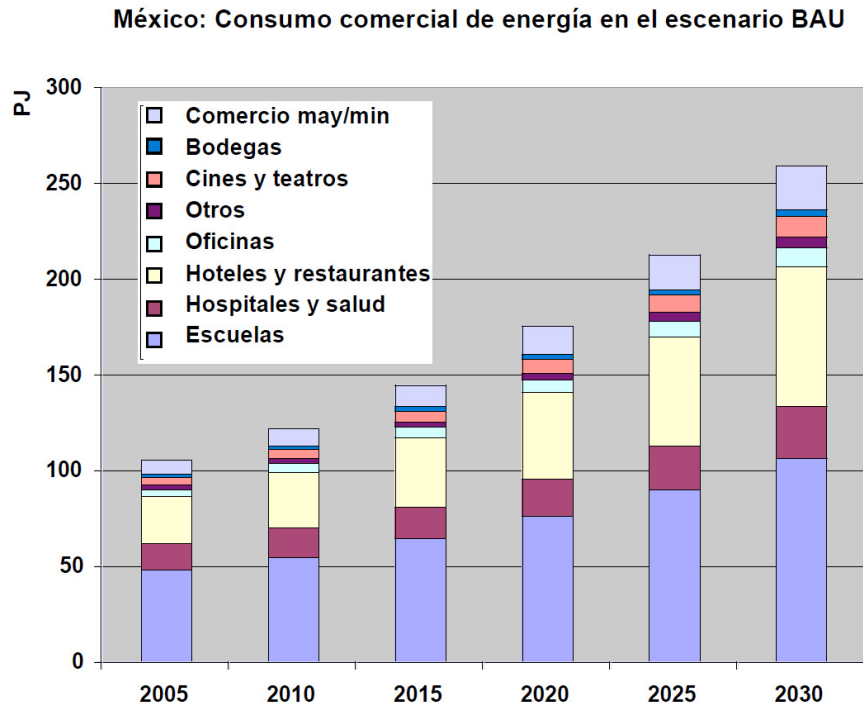


**Figura 1.4:** *Proyección de reacondicionamientos del sector inmobiliario de uso comercial.* [35]

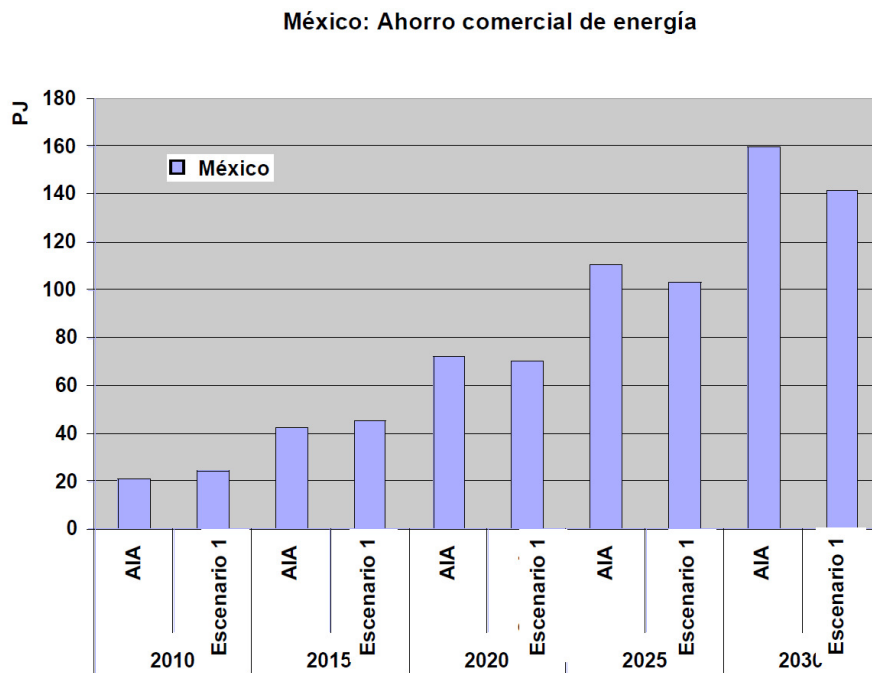
### 1.1.3. Metodología actual de evaluación energética a edificaciones en México

La evaluación energética que deben aprobar las construcciones comerciales en México, la NOM-008-ENER-2001, consiste en comparar un edificio de referencia contra un denominado edificio proyectado. El edificio que se pretende construir es el edificio proyectado, y debe mostrar un ahorro energético al someter los elementos de su envolvente a un cálculo en estado estable de transferencia de calor. El método de cálculo que exige la norma, consiste en definir las propiedades físicas de los materiales, calcular las superficies tanto de los elementos opacos como transparentes en la envolvente y evaluar la transferencia de calor por conducción y radiación según corresponda. Para los cálculos de radiación solar, se le asocia a cada elemento una temperatura promedio y un factor de ganancia solar de acuerdo a una tabla para distintas localidades de la República Mexicana; en la misma tabla se proporcionan temperaturas del aire exterior. La temperatura del aire al interior se considera fija





**Figura 1.5:** Proyección del consumo energético del sector inmobiliario de uso comercial. [35]



**Figura 1.6:** Potencial de ahorro energético del sector inmobiliario de uso comercial. [35]

a 25°C. En el cálculo de radiación se incluye un factor de sombreado para aquellos casos en los que el edificio cuente con parasoles o remetimientos en las ventanas. En general, la metodología de evaluación de la NOM-008-ENER-2001 se observa sencilla y de fácil aplicación; sin embargo, deja bastantes aspectos fuera de consideración; por ejemplo, los fenómenos térmicos a los cuales es sometida una edificación son transitorios, lo cual requiere de una herramienta de cálculo más compleja y esto a su vez demanda personal con conocimientos más avanzados.

### **Potencial de mejora a la norma mexicana**

La falta de información y la inexistencia de un catálogo de edificaciones comerciales representa, en un primer momento, una limitante para que se promuevan mejoras en los lineamientos oficiales sobre la eficiencia energética; en contraste a esta situación, la particularidad de cada edificio y las distintas regiones climáticas del país pueden incentivar el análisis individual de los edificios y así identificar los factores que verdaderamente influyen en el consumo energético.

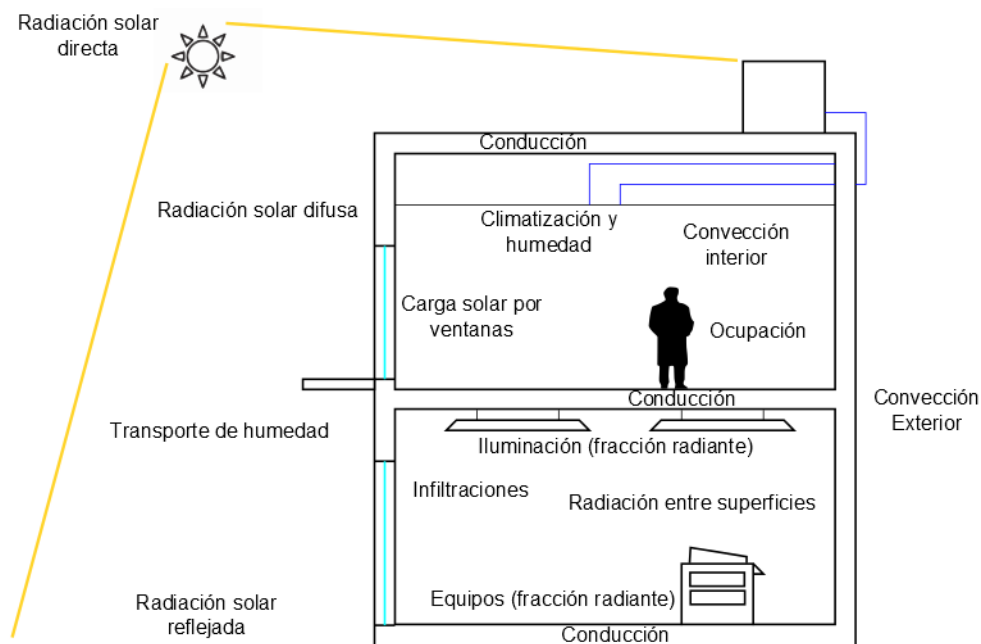
El párrafo anterior presenta una coyuntura donde se abre la posibilidad de mantener la práctica de evaluación energética de edificaciones comerciales tal como especifica la NOM-008-ENER-2001, o bien, avanzar hacia la evaluación energética de la envolvente por otro método, inclusive considerar la simulación computacional para dicho fin. La necesidad de personal con conocimientos específicos comentada anteriormente, no debe suponer una barrera a la mejora, de hecho representa una oportunidad para fomentar el desarrollo tecnológico en la industria de la construcción.

Una vez que se ha mostrado, de forma general, la necesidad de aumentar la eficiencia energética de los edificios y recordando que el presente trabajo busca estudiar los fenómenos térmicos de la envolvente sobre el consumo por climatización, se procede a definir y señalar los principales conceptos sobre este tópico.

## 1.2. Transferencia de calor y masa

El intercambio de calor y masa entre el edificio y el ambiente que lo rodea, determina fuertemente el gasto energético que los equipos de acondicionamiento requieren para mantener el confort térmico. Debe recordarse que dentro del perfil del uso final de energía en edificios comerciales, es justamente este rubro el que más aporta al consumo de energía total.

Como se muestra en la Figura 1.7 el intercambio de energía en un edificio se presenta bajo los tres mecanismos de transferencia de calor: conducción, convección y radiación. Además, el aire que rodea el edificio y ocupa los espacios interiores lleva consigo algún porcentaje de humedad; entonces, la carga de climatización debe considerar el calor sensible del aire y el calor latente de este contenido de humedad. Todos estos procesos están normalmente acoplados entre sí y además varían en el tiempo.



**Figura 1.7:** Representación del intercambio de calor y masa en un edificio.

Los métodos para el cálculo dinámico de la carga térmica en edificios, usualmente involucran simplificaciones a los fenómenos mencionados. Hacer tales simplificaciones sirve para mantener un bajo costo tanto en el desarrollo de los programas de cálculo,

como en los equipos de cómputo que los ejecutan. Además, tanto la escala espacial como la temporal, a la cual se estudian las variaciones en los edificios es relativamente grande, e.g. los valores reportados son horarios, la temperatura del aire en toda una zona se suele considerar homogénea, toda una superficie a una misma temperatura, etc.

A continuación se discuten los aspectos generales de los mecanismos de transferencia de calor aplicados al análisis de edificaciones [32] [41], mediante simulación computacional. Una descripción más detallada del cálculo que realiza el programa de simulación empleado en este estudio se presenta en el Apéndice A y la documentación completa se puede consultar en la referencias [54] y [55].

### **1.2.1. Transferencia de calor a través de elementos opacos.**

En este trabajo se hace referencia a distintas partes de la envolvente y a fin de mantener una clara distinción entre ellas, se mencionarán por los nombres comúnmente empleados, e.g. los muros y losas son elementos opacos en la envolvente. En la siguiente sección se dará mención a los elementos translúcidos que corresponden principalmente a las ventanas y domos.

#### **Ecuación de gobierno**

La ecuación general que gobierna la transferencia de calor a través de un material homogéneo, ecuación 1.1, se obtiene al realizar un balance de energía sobre un volumen de control dentro del material y considerando lo siguiente [41]:

- (a) el flujo de calor a través de cada frontera del volumen de control es impulsado por el gradiente de temperatura en esa superficie,
- (b) la razón de generación o remoción de calor por fuentes o sumideros presentes dentro del volumen de control, y

- (c) el cambio en la energía interna del material, el cuál se refleja en un cambio de temperatura del material.

$$\rho c \frac{\partial T}{\partial t} - \nabla \cdot k \nabla T - \dot{q} = 0 \quad (1.1)$$

Para calcular la transferencia de calor a través de muros y losas en edificaciones, la ecuación 1.1 se puede simplificar mediante las siguientes suposiciones:

- (a) la dirección de transferencia de calor es normal a la superficie evaluada, por lo que sólo se considera en una dirección;
- (b) la transferencia de calor en el material es isotrópica,
- (c) las propiedades físicas del material son independientes de la temperatura, y
- (d) no existen fuentes o sumideros de calor al interior del material.

Entonces, la ecuación de gobierno se reduce a:

$$\frac{\partial T}{\partial t} = \alpha \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} \quad (1.2)$$

### Condiciones de frontera

La solución de la ecuación de gobierno requiere que se tengan dos condiciones de frontera y una condición inicial; para transferencia de calor en edificios, se tienen los siguientes casos:

- (a) La temperatura en cualquier superficie es conocida, i.e:

$$T(x, t) = f(t) \quad x = 0, L \quad (1.3)$$

donde  $f(x)$  es una función conocida que relaciona la temperatura con el tiempo.

- (b) La superficie está en contacto con el aire a cierta temperatura e intercambia calor por radiación con sus alrededores.

$$q(0, t) = -k \frac{\partial T(x, t)}{\partial x} = h_0(T_{aire,0} - T(x, t)) - q_{r,0} \quad x = 0 \quad (1.4)$$

$$q(L, t) = -k \frac{\partial T(x, t)}{\partial x} = h_L(T(x, t) - T_{aire,L}) - q_{r,L} \quad x = L \quad (1.5)$$

Cabe destacar que en edificios, tanto las temperaturas como las cargas por radiación son funciones del tiempo; la temperatura del aire exterior y la radiación solar varían a lo largo del día; en ciertas aplicaciones esta variación se considera periódica.

### 1.2.2. Transferencia de calor a través de elementos translúcidos.

Los elementos translúcidos como ventanas y tragaluces son claves en el intercambio de calor entre el edificio y el ambiente. Estos elementos son mucho más delgados que los opacos y además permiten el paso de la radiación solar, por lo que tienen una alta influencia en la climatización de los espacios en edificios. Los procesos de transferencia de calor que pueden presentarse en las ventanas son los siguientes:

- Reflexión, absorción y transmisión de radiación solar directa y difusa.
- Conducción y convección de calor asociado a la radiación solar absorbida.
- Conducción y convección debido a diferencias de temperatura entre las superficies interior y exterior.
- Intercambio radiante entre superficies internas, equipos e iluminación y otras fuentes o sumideros.

La conductividad térmica de los acristalamientos y su delgado espesor hace que la resistencia térmica de estos elementos sea muy baja, lo cuál lleva a que el calor se conduzca rápidamente a través de ellos. No obstante, el principal aporte de calor hacia el interior es debido a la radiación. Las pérdidas de calor por conducción suelen tener mayor importancia en localidades dónde se tiene un mayor uso de la calefacción.

### Reflexión, absorción y transmisión de radiación a través del vidrio

La irradiancia solar directa incidente sobre la superficie del vidrio puede seguir dos caminos, verse reflejada en la superficie del vidrio o transmitirse a través de él. Los ángulos de incidencia y de reflexión son iguales y están relacionados con el ángulo de refracción mediante la ecuación 1.6 de acuerdo a la ley de Snell.

$$n = \frac{\text{sen } \theta}{\text{sen } \theta'} \quad (1.6)$$

donde  $n$  es una constante para cada tipo de vidrio.

La fracción de la irradiancia incidente que se ve reflejada se puede determinar a partir de la ecuación 1.7:

$$r = \frac{1}{2} \left( \frac{\tan^2(\theta - \theta')}{\tan^2(\theta + \theta')} + \frac{\text{sen}^2(\theta - \theta')}{\text{sen}^2(\theta + \theta')} \right) \quad (1.7)$$

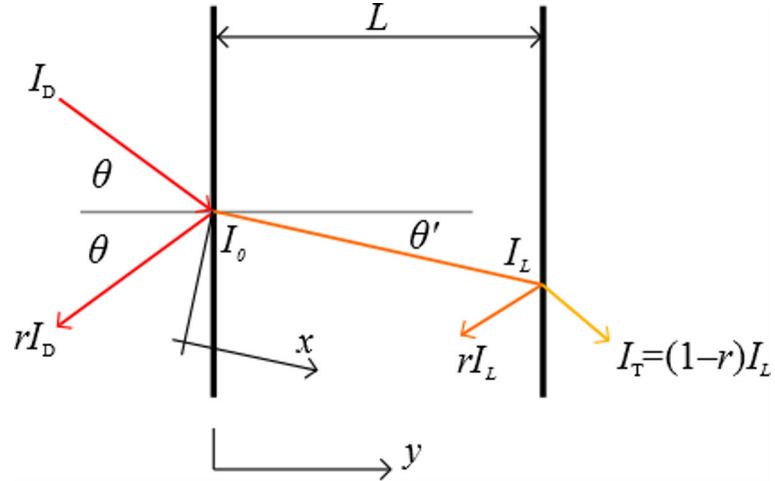
Entonces, la irradiancia directa incidente que logra entrar al vidrio es:

$$I_0 = (1 - r)I_D \quad (1.8)$$

A medida que el rayo de radiación solar viaja a través del vidrio, la intensidad de radiación disminuye debido a que el vidrio absorbe parte de su energía; la Figura 1.8 muestra una representación del fenómeno. Se puede observar que la intensidad disminuye a lo largo de  $x$ ; es posible expresar esta variación mediante la ecuación 1.9.

$$\frac{dI}{dx} = -\kappa I \quad (1.9)$$

donde  $\kappa$  es el coeficiente de absorción, que para el vidrio común es  $\approx 0.02/\text{mm}$ . La ecuación 1.9 se puede integrar en  $x = 0$  donde  $I = I_0$  y se obtiene la irradiancia en función de la posición  $x$  dentro del vidrio:



**Figura 1.8:** Transmisión de la radiación solar a través del vidrio.

$$I = I_0 \exp(-\kappa x) \quad (1.10)$$

Por lo tanto, para conocer la porción absorbida basta con calcular la diferencia entre las superficies:

$$I_0 - I_L = I_0(1 - \exp(-\kappa L / \cos \theta')) \quad (1.11)$$

la fracción absorbida queda expresada como:

$$a = \frac{I_0 - I_L}{I_0} \quad (1.12)$$

La irradiancia que se transmite a través del vidrio es:

$$I_T = (1 - r)I_L \quad (1.13)$$

Los procesos de absorción, reflexión y transmisión se repiten hasta que el total de la irradiancia incidente es disipada por absorción en el vidrio, o bien, por transmisión



hacia el exterior del vidrio. Para simplificar el análisis se introducen tres fracciones que suman la totalidad de cada proceso: la **absortividad**  $\alpha_I$ , la **reflectividad**  $\rho_I$  y la **transmisividad**  $\tau_I$ :

$$\alpha_I = \frac{a(1-r)}{1-r(1-a)} \quad (1.14)$$

$$\rho_I = r \left( 1 + \frac{(1+a)^2(1-r)^2}{1-r^2(1-a)^2} \right) \quad (1.15)$$

$$\tau_I = \frac{(1-r)^2(1-a)}{1-r^2(1-a)^2} \quad (1.16)$$

Usualmente se promedia la reflectividad sobre el hemisferio reflejado, a esto se le llama reflectividad espectral hemisférica.

### 1.2.3. Radiación entre superficies

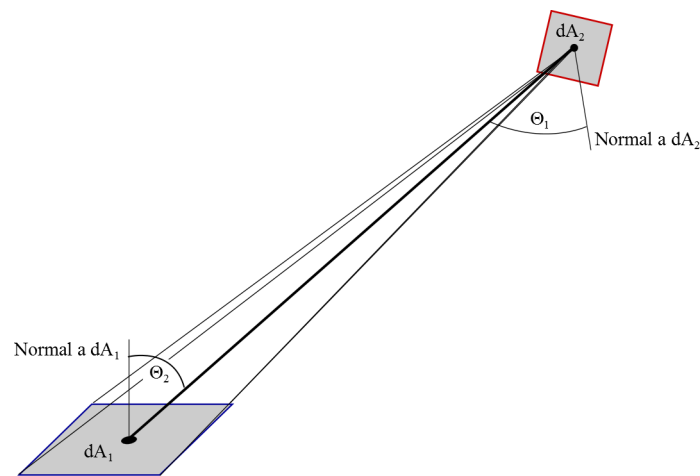
Bien sea al interior o al exterior del edificio, las superficies intercambian energía en forma de radiación; principalmente radiación de onda larga ya que las superficies de los edificios no alcanzan temperaturas elevadas. La potencia emitida por una superficie se obtiene a partir de la ley de Stefan-Boltzmann, ecuación 1.17, considerando la superficie como un cuerpo no negro:

$$E = \epsilon\sigma T^4 \quad (1.17)$$

La emisividad  $\epsilon$  está determinada por el material, la temperatura de la superficie y la condición de la superficie, e.g. el color y el acabado superficial. Usualmente se calcula de forma indirecta al considerar que  $\epsilon = 1 - \rho_I$ .

## Factores de forma

La fracción de la energía radiante que emite una superficie  $A_1$  e incide directamente en otra  $A_2$  se conoce como el factor de forma  $F_{1,2}$ . Existen distintos métodos para obtener los factores de forma, los cuáles requieren de la integración analítica o numérica sobre la superficie a tratar. El intercambio de radiación desde una superficie difusa hacia otra se muestra en la Figura 1.9, este análisis sirve para obtener las relaciones de transferencia entre áreas finitas.



**Figura 1.9:** Intercambio de radiación entre dos elementos diferenciales de área.

En Siegel [63], se presenta una amplia revisión sobre distintas configuraciones entre superficies, junto con las ecuaciones para calcular sus factores de forma.

### 1.2.4. Transporte de humedad

Además de la transferencia de calor, el transporte de humedad debe ser considerado en el cálculo de las cargas de climatización. La humedad del aire exterior, la actividad desarrollada al interior, la ventilación, la porosidad de los elementos constructivos y el contenido de humedad que puedan almacenar son factores que determinan la carga latente de climatización en el edificio.

Por otra parte, la masa térmica puede almacenar calor sensible y latente; y dado que el tiempo que permanece almacenado el calor sensible es menor que el tiempo de almacenaje del calor latente, resulta importante tomar en cuenta la participación de la humedad en el aire y en los materiales para tener una buena representación de la inercia térmica.

### Modelo de transporte de calor y humedad de Künzle

Künzel [48] desarrolló un modelo teórico para el transporte de calor y humedad a través de un material; las ecuaciones 1.18 y 1.19 describen este modelo.

$$\frac{\partial H}{\partial T} \frac{\partial T}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left( k^w \frac{\partial T}{\partial x} \right) + h_v \frac{\partial}{\partial x} \left( \frac{\delta}{\mu} \frac{\partial T}{\partial x} \right) \quad (1.18)$$

$$\frac{\partial w}{\partial \phi} \frac{\partial \phi}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left( D^w \frac{\partial w}{\partial \phi} \frac{\partial \phi}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial x} \left( \frac{\delta}{\mu} \frac{\partial T}{\partial x} \right) \quad (1.19)$$

En la ecuación 1.18 cada término representa el almacenamiento, el transporte y la generación de calor, respectivamente. En la ecuación 1.19 cada término representa el almacenamiento de humedad, el transporte de humedad líquida y el transporte de vapor, respectivamente. La solución de estas ecuaciones sólo puede darse numéricamente debido a su carácter no lineal. La solución propuesta por Künzle es por diferencias finitas, la temperatura y la humedad relativa del aire se deben conocer ya que las demás propiedades dependen de ellas.

El método de diferencias finitas no es un método que actualmente sea utilizado en los programas para estudios energéticos en edificaciones, de tal suerte que el modelo de Künzle no es comúnmente usado para representar el transporte de humedad, a pesar de ser un modelo bastante completo. A medida que se tengan avances en el desarrollo

de algoritmos de cálculo para edificaciones que usen diferencias finitas, se dará mayor uso a este modelo.

### Profundidad efectiva de penetración

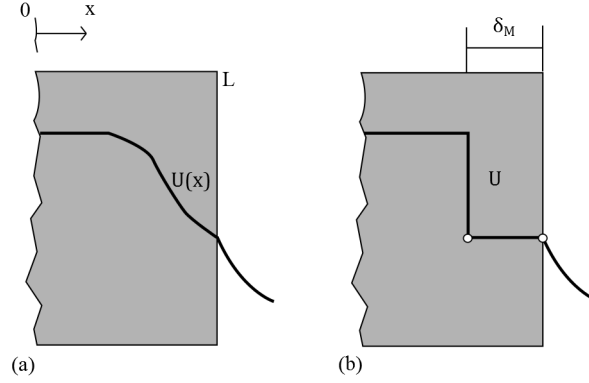
Kerestecioglu et al. [16] emplean un enfoque más simple, se supone un modelo donde la transferencia de humedad entre el material y el ambiente se da principalmente en la región cercana a la superficie, además, el contenido de humedad en el material varía periódicamente. Por otra parte, en lugar de considerar un perfil del contenido de humedad como función de la posición, Figura 1.10 (a), se define una profundidad a la cual la humedad es adsorbida o desorbida por el material, Figura 1.10 (b).

$$\int_0^L U(x)dx = U\delta_M \quad (1.20)$$

Esta suposición es válida solamente cuando los periodos de adsorción y desorción son cortos, e.g. del orden de algunas horas, puesto que a periodos más largos (varios días) se dará el almacenamiento de humedad a una mayor profundidad que la propuesta por el modelo.

La validez de emplear esta suposición en edificios comerciales parece razonable, ya que la frecuencia de operación del equipo de aire acondicionado es intermitente y los periodos de paro no son particularmente largos. De cualquier manera, se debe considerar como un modelo simplificado y debe ser usado con reservas.

Para usar este modelo se debe conocer la isoterma de sorción de humedad de los materiales que están ubicados en las superficies con vista al interior de la zona, ver ecuación 1.21. Esta ecuación describe el contenido de humedad en función de la humedad relativa,. Una lista de varios materiales con los coeficientes a, b, c y d obtenidos experimentalmente se encuentra en Kerestecioglu et al. [53].



**Figura 1.10:** Contenido de humedad como función de la posición en el material (a). Profundidad efectiva de penetración (b).

$$U = a\phi^b + c\phi^d \quad (1.21)$$

El cambio en el contenido de humedad en el material queda descrito por la siguiente expresión:

$$\frac{dU}{dt} = \frac{\partial U}{\partial W} \frac{dW}{dt} + \frac{\partial U}{\partial T} \frac{dT}{dt} \quad (1.22)$$

Esta ecuación puede ser manipulada hasta obtener una expresión para evaluar el transporte de humedad en la superficie:

$$(A\rho\delta_M A_T) \frac{dW}{dt} = h_M A (W_\infty - W) + (A\rho\delta_M B_\rho) \frac{dT}{dt} \quad (1.23)$$

Además, la condición de frontera de la pared interior para la ecuación 1.1 toma la siguiente forma:

$$-k \frac{dT}{dx} = -q'' + h(T - T_\infty) + \lambda h_M (W - W_\infty) \quad (1.24)$$

La solución numérica a este modelo se proporciona en Kerestecioglu et al. [53], tiene

la ventaja de poder ser obtenida mediante funciones de transferencia (CTF's) lo cual facilita su uso en los programas de simulación de edificios.

### 1.3. Clima

Conocer las características climáticas del emplazamiento del edificio, ayuda a definir aspectos importantes del diseño, esto forma parte del llamado diseño bioclimático de edificaciones. Lograr que el edificio tenga una respuesta adecuada a las condiciones del terreno y al clima local, lleva a que el consumo de energía sea menor y que los recursos sean mejor aprovechados.

#### Clasificación Köppen

La clasificación climática de Köppen se muestra en la Tabla 1.3, esta información corresponde a una reciente actualización de acuerdo a Kottek et. al. [64]. Las Figuras 1.11 y 1.12 muestran las zonas climáticas mundiales y mexicanas, respectivamente. Las imágenes fueron generadas con una plantilla proporcionada por los autores para su uso con el programa Google Earth.

Para determinar la carga de climatización debidamente, se necesita tener los datos climáticos correspondientes a la ubicación del edificio. Dependiendo de que tan riguroso sea el análisis, serán necesarios distintos datos, la Tabla 1.4 puede verse aumentada o disminuida en función de ello. Además, dado que estos valores varían con el tiempo, suele ser necesario conocerlos a lo largo del año.

#### Año típico meteorológico

Las principales fuentes de datos climáticos son las estaciones meteorológicas, las cuáles obtienen mediciones en tiempo real. De ellas, se generan bases de datos anuales con mediciones horarias; posteriormente se analiza un periodo que comprenda varios años a fin de generar una sola colección anual; definiendo así el año típico meteorológico (*Typical Meteorological Year TMY*), el cuál refleja la variación climática durante el

Clave	Descripción	Criterios
<b>A</b>	<b>Ecuatorial o Tropical</b>	$T_{min} \leq 18 \text{ }^\circ\text{C}$
Af	húmedo	$pp_{min} \geq 60 \text{ mm}$
Am	monzón	$pp_{ann} \geq 25 \text{ mm}$
As	sabana con verano seco	$pp_{min} < 60 \text{ mm}$
Aw	sabana con invierno seco	$pp_{min} < 60 \text{ mm}$
<b>B</b>	<b>Árido</b>	$pp_{ann} < 10 pp_{lim}$
BS	estepario	$pp_{ann} > 5 pp_{lim}$
BW	desértico	$pp_{ann} \leq 5 pp_{lim}$
<b>C</b>	<b>Templado</b>	$-3 \text{ }^\circ\text{C} < T_{min} < 18 \text{ }^\circ\text{C}$
Cs	con verano seco	$pp_{vmin} < pp_{imin}, pp_{imax} > 3pp_{vmin}$ $pp_{vmin} < 40 \text{ mm}$
Cw	con invierno seco	$pp_{imin} < pp_{vmin}, pp_{vmax} > 10pp_{imin}$
Cf	húmedo	
<b>D</b>	<b>Nevado</b>	$T_{min} \leq -3 \text{ }^\circ\text{C}$
Ds	con verano seco	$pp_{vmin} < pp_{imin}, pp_{imax} > 3pp_{vmin}$ $pp_{vmin} < 40 \text{ mm}$
Dw	con invierno seco	$pp_{imin} < pp_{vmin}, pp_{vmax} > 10pp_{imin}$
Df	húmedo	
<b>E</b>	<b>Polar</b>	$T_{max} < 10 \text{ }^\circ\text{C}$
ET	tundra	$0 \text{ }^\circ\text{C} \leq T_{max} < 10 \text{ }^\circ\text{C}$
EF	hielo perpetuo	$T_{max} < 0 \text{ }^\circ\text{C}$
h	estepa o desierto frío	$T_{ann} \geq 18 \text{ }^\circ\text{C}$
k	estepa o desierto caliente	$T_{ann} < 18 \text{ }^\circ\text{C}$
a	verano caliente	$T_{max} \geq 22 \text{ }^\circ\text{C}$
b	verano templado	no (a) y $4T_{men} \geq 10 \text{ }^\circ\text{C}$
c	verano e invierno frío	no (b) y $T_{min} > -38 \text{ }^\circ\text{C}$
d	frío extremo	como (c) pero $T_{min} \leq -38 \text{ }^\circ\text{C}$

**Tabla 1.3:** Nomenclatura de la clasificación Köppen.

$$pp_{lim} = \begin{cases} 2(T_{ann}) & \text{si al menos 2/3 de la precipitación anual ocurre en invierno} \\ 2(T_{ann}) + 28 & \text{si al menos 2/3 de la precipitación anual ocurre en verano} \\ 2(T_{ann}) + 14 & \text{distinto de los anteriores} \end{cases}$$

<b>Aire exterior</b>	<b>Unidades</b>
Temperatura de bulbo seco	°C
Temperatura de punto de rocío	°C
Humedad relativa	%
Presión atmosférica	Pa
Velocidad del viento	m/s
Dirección del viento	°
Precipitación	mm
<b>Radiación solar</b>	
Radiación directa normal	W/m <sup>2</sup>
Radiación difusa horizontal	W/m <sup>2</sup>
Nubosidad	-

**Tabla 1.4:** *Datos climáticos relevantes para la evaluación energética de edificaciones.*

periodo analizado.

Los datos climáticos que no estén disponibles en bases de datos pueden ser generados mediante modelos climatológicos; sin embargo esto usualmente representa una reducción en la confiabilidad del estudio por lo que se recomienda ser cuidadoso al usar tales herramientas.

## 1.4. Confort

Determinar el confort térmico involucra la consideración de factores fisiológicos, psicológicos e inclusive regionales. Mucha investigación ha sido llevada a cabo al respecto y se han elaborado distintos índices de confort a partir de estos esfuerzos. La definición del confort térmico dada por Givoni [43], define el confort desde un punto de vista operacional como el rango de condiciones climáticas consideradas aceptables al interior de los edificios; específicamente, hace referencia a dos situaciones: la incomodidad a causa del calor y a causa del frío.

### Incomodidad por frío

Cuando Givoni habla de incomodidad por frío, marca una distinción con respecto a si la incomodidad es general, o bien, si es localizada, e.g. cuando se siente frío en



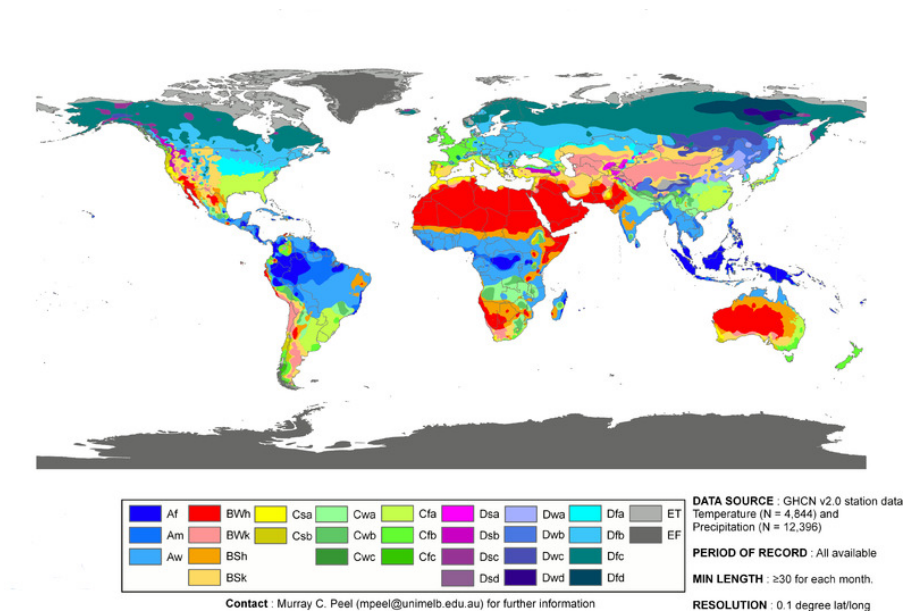


Figura 1.11: Mapa mundial de la clasificación climática de Köppen.[64]

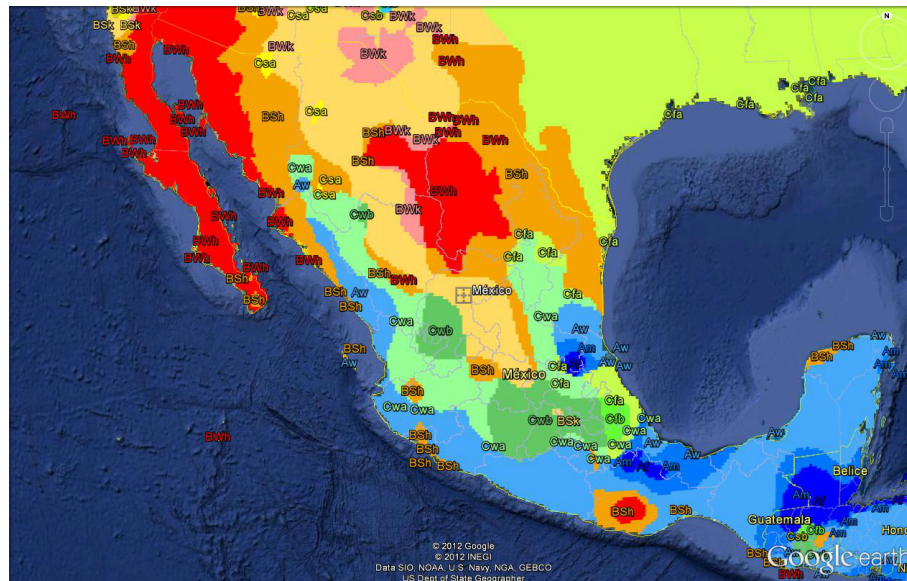


Figura 1.12: Clasificación Köppen dentro de México.[64]

partes específicas del cuerpo. La incomodidad por frío se considera general, cuando la temperatura media de la piel está por debajo del límite inferior de la región de confort, la cuál se define más adelante.

El confort térmico dentro de edificaciones ubicadas en climas fríos, involucra tres aspectos:

1. Mantener temperaturas confortables en el aire interior y en las superficies internas de los muros exteriores.
2. Evitar el enfriamiento radiante directo, e.g. ventanas muy grandes.
3. Evitar las corrientes de aire frío ocasionadas por infiltraciones en aperturas de ventanas y grietas.

En climas fríos, la vestimenta modifica considerablemente los límites de la región de confort. Debido a esto, es posible mantener temperaturas bajas al interior y aún así observar condiciones confortables.

### **Incomodidad por calor**

La incomodidad por calor se presenta cuando la temperatura media de la piel está por encima del límite superior de la región de confort. La rapidez a la cuál aumenta la temperatura de la piel se ve afectada por la evaporación del sudor, esto ocasiona que la tasa de incremento de la temperatura de la piel sea menor que la tasa de decremento.

Fanger [37] reportó que el aumento en la tasa metabólica (mayor actividad física), reduce la temperatura de confort de la piel, esto es resultado del aumento en la tasa de evaporación del sudor y la desviación del flujo sanguíneo desde la piel hacia los músculos, lo que favorece al intercambio de calor en el cuerpo.

### 1.4.1. Cartas Bioclimáticas

Las cartas bioclimáticas son diagramas donde se presenta la región de confort; generalmente se trata de gráficos que relacionan la temperatura del aire con la humedad relativa (contenido de humedad en el aire); dentro de ellos se marcan los límites de la región de confort, según los factores que se hayan considerado al momento de su definición.

#### Carta bioclimática de Olgyay

El pionero en la elaboración de las cartas bioclimáticas fue Olgyay [56]. La carta de Olgyay mostrada en la Figura 1.13, delinea la región de confort fijando el límite inferior en los  $21^{\circ}\text{C}$ , mientras que el límite superior varía con la humedad relativa tal que: por debajo del 50 % el límite superior es de  $27.8^{\circ}\text{C}$  y para humedades relativas mayores del 50 %, el límite superior desciende gradualmente hasta la intersección con el límite inferior en el 90 % de humedad relativa.

Los límites de la región de confort se deben ajustar para latitudes menores a los  $40^{\circ}$  y alturas no mayores de 1000 msnm, tal que por cada  $5^{\circ}$  desplazados en latitud se incremente  $0.4^{\circ}\text{C}$ , hasta que el límite superior llegue a los  $29.3^{\circ}\text{C}$ .

La carta también especifica la cantidad de radiación de onda larga requerida al interior para elevar la temperatura media radiante, información que puede ser empleada en el diseño de elementos de la envolvente que almacenen energía solar, o bien en la selección del equipo de calefacción.

En regiones calientes y áridas la utilización de la carta de Olgyay como guía de diseño, puede traer consecuencias contraproducentes al sobrestimar la necesidad de calefacción, sobre todo si la cantidad de masa de la edificación es alta. Otro inconveniente de esta carta es que fue elaborada para una región de Norteamérica donde el clima es más bien templado.

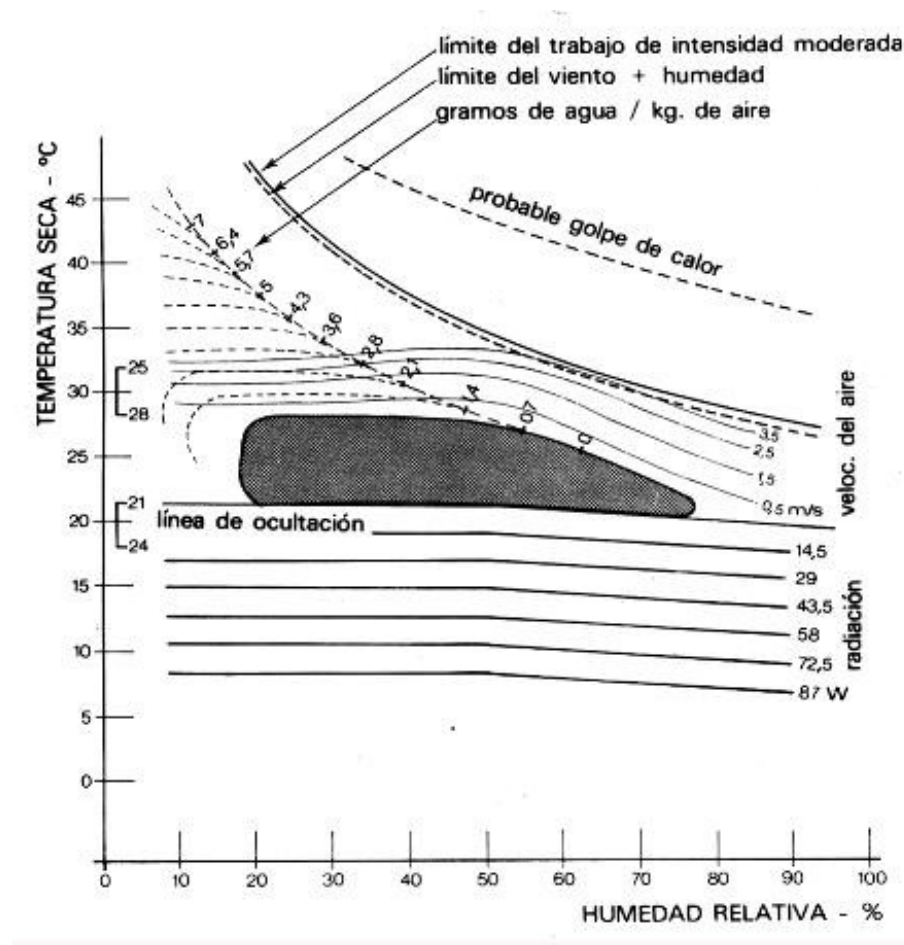


Figura 1.13: Carta bioclimática de Olgyay.[56]

### Carta bioclimática de Givoni para edificaciones

A partir de la necesidad de superar las limitaciones antes mencionadas en las cartas de Olgyay, surgen las cartas bio-climáticas de Givoni[42]. En estas cartas se extienden las consideraciones de confort a regiones cálidas y húmedas donde la gente se ha aclimatado a ello, principalmente países en desarrollo. En la carta de Givoni se plasman distintas estrategias de diseño para alcanzar el confort térmico como el uso de ventilación durante el día, la combinación de masa térmica con ventilación nocturna y el uso de enfriamiento evaporativo (directo e indirecto).

La elaboración de cartas bioclimáticas puede ser asistida mediante la herramienta Climate Consultant [9]. Para generar la carta se necesita tener el archivo de datos climáticos para la región de interés y seguir las instrucciones que brinda el programa.

Una carta generada para la ciudad de Monterrey se muestra en la Figura 1.14

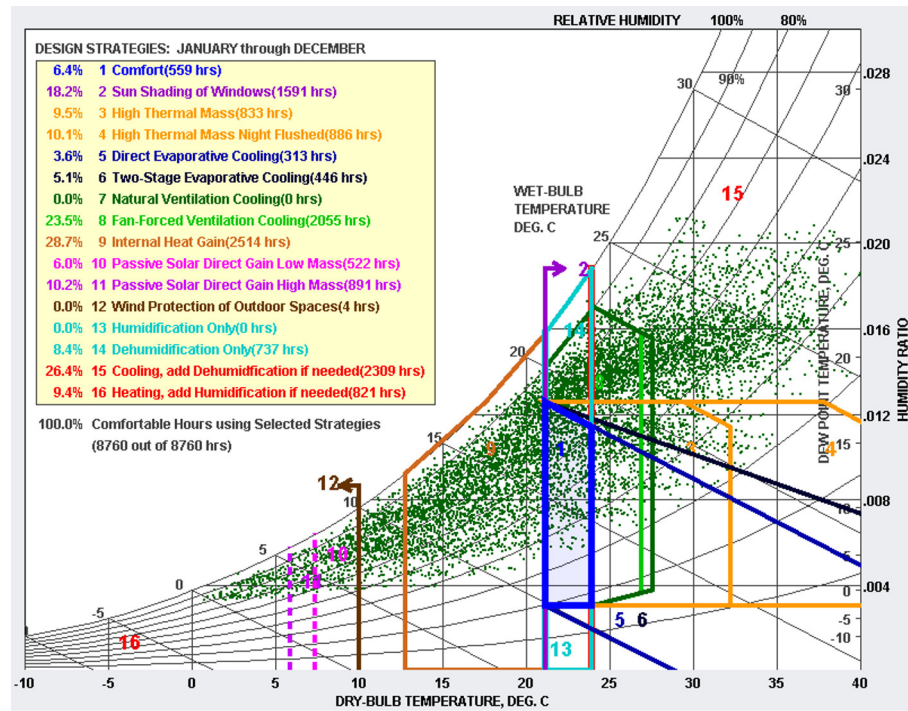


Figura 1.14: Carta bioclimática generada para Monterrey.[9]

### Estrategia de diseño: Masa térmica y ventilación nocturna

Givoni [43] menciona que en regiones calientes y áridas, el amplio rango de variación de la temperatura exterior durante el verano (entre 15 y 20 °C) sugiere construir edificios de masa térmica elevada, la cual se discute a detalle en la siguiente sección, y que junto con la ventilación nocturna, se puede reducir la temperatura interior del aire entre 6 y 8 °C por debajo de la temperatura máxima exterior.

## 1.5. Inercia térmica

La inercia térmica de una edificación es la capacidad que este tiene, para acumular y liberar calor; el efecto de que la inercia térmica sea alta, se ve reflejado, en una menor variación de la temperatura al interior, aún cuando los cambios que se presenten en la temperatura exterior sean muy grandes. Otro efecto a observar, es

que se necesitará más energía para vencer esta inercia, e.g. los equipos de aire acondicionado tendrán que remover el calor almacenado en la envolvente para alcanzar la temperatura deseada. Por ello se considera que la ventilación nocturna puede ayudar a reducir el consumo por climatización en edificios con envolventes pesadas.

La masa térmica es una característica del elemento constructivo que depende del calor específico del material, su densidad y de las dimensiones. Para estudiar la masa térmica en edificaciones se utilizan los siguientes conceptos:

- El producto de la densidad por el calor específico del material por su espesor; a este producto se le conoce como **capacidad calorífica por unidad de área**, sirve como referencia de cuál es la masa térmica del elemento:

$$C = \rho c_p L \quad (1.25)$$

- la raíz cuadrada del producto de la conductividad térmica, el calor específico y la densidad se conoce como **efusividad térmica**, es referencia de la facilidad que tiene el elemento de absorber calor desde la superficie:

$$b = \sqrt{k \rho c_p} \quad (1.26)$$

### 1.5.1. Caracterización de muros y losas

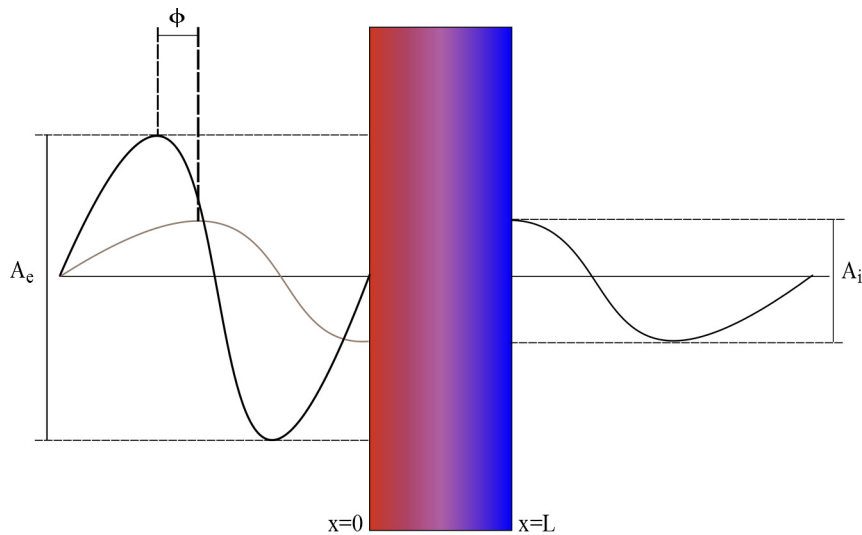
Dado que los elementos constructivos de las edificaciones son muy variados, vale la pena estudiar el comportamiento que cada material describe al transferir el calor a través del edificio. La caracterización de un elemento constructivo involucra principalmente dos parámetros, el tiempo de retraso y el factor de decremento; Asan y Sancaktar [27] dan una definición para estos parámetros:

”Durante el proceso transitorio, en el cual la temperatura exterior varía en un período de un día, una onda de calor fluye a través de la pared desde el exterior hacia el interior; las amplitudes de estas ondas muestran las magnitudes de la temperatura y la longitud de onda muestra el tiempo

que le toma viajar a través de la pared. Durante la propagación de la onda a través de la pared, su amplitud disminuirá de acuerdo a las propiedades termofísicas de los materiales que componen la pared. Cuando esta onda alcanza la superficie interior, tendrá una amplitud considerablemente menor al valor que tenía en el exterior. El tiempo que tarda la onda en propagarse desde la superficie exterior hasta la interior se llama **tiempo de retraso**, ecuación 1.27; y la relación a la cual disminuye la amplitud se le llama **factor de decremento**, ecuación 1.28.”

$$\Phi = \begin{cases} t_{T_o^{max}} > t_{T_e^{max}} \Rightarrow t_{T_o^{max}} - t_{T_e^{max}} \\ t_{T_o^{max}} < t_{T_e^{max}} \Rightarrow t_{T_o^{max}} - t_{T_e^{max}} + P \\ t_{T_o^{max}} = t_{T_e^{max}} = P \end{cases} \quad (1.27)$$

$$f = \frac{A_o}{A_e} = \frac{T_o^{max} - T_o^{min}}{T_e^{max} - T_e^{min}} \quad (1.28)$$



**Figura 1.15:** Representación del tiempo de retraso y el factor de decremento.

### Tiempo de retraso y factor de decremento

La solución analítica del problema de conducción de calor en una dirección y en estado transitorio, sirve para determinar tanto el tiempo de retraso como el factor de decremento, de elementos planos; la solución para elementos compuestos por varias capas, con materiales homogéneos, proviene del análisis matricial y fue publicada por Pipes [60].

El método de la admitancia es una metodología de evaluación de edificaciones empleada en el Reino Unido; en ella se utiliza tanto el factor de decremento como el tiempo de retraso para clasificar el tipo de construcción, el método a detalle puede encontrarse en la Guía A del *Chartered Institute of Building Services* (CIBSE) [31]. La ecuación 1.29 muestra el sistema de ecuaciones en álgebra de matrices, para el problema descrito anteriormente.

$$\begin{bmatrix} \hat{T}_i \\ \hat{q}_i \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & R_{Si} \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} m_1^1 & m_2^1 \\ m_3^1 & m_1^1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} m_1^2 & m_2^2 \\ m_3^2 & m_2^2 \end{bmatrix} \cdots \begin{bmatrix} m_1^n & m_2^n \\ m_3^n & m_1^n \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & R_{So} \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \hat{T}_o \\ \hat{q}_o \end{bmatrix} \quad (1.29)$$

Los coeficientes de la matriz para cada capa de material homogéneo se obtienen a partir de las siguientes expresiones:

$$p^n = \sqrt{\frac{\pi l^2 \rho c}{86400 k^n}} \quad (1.30)$$

$$m_1^n = \cosh(p^n + ip^n) \quad (1.31)$$

$$m_2^n = \frac{l \sinh(p^n + ip^n)}{k^n (p^n + ip^n)} \quad (1.32)$$

$$m_3^n = \frac{k^n (p^n + ip^n) \sinh(p^n + ip^n)}{l} \quad (1.33)$$

Para las superficies del muro y en caso de que existan huecos al interior del muro



se calculan las resistencias  $R$  que sean necesarias. Tras realizar la multiplicación de matrices entre los términos similares, se obtiene la ecuación 1.34 a partir de la cuál se obtienen los parámetros dinámicos del elemento constructivo.

$$\begin{bmatrix} \hat{T}_i \\ \hat{q}_i \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} M_1 & M_2 \\ M_3 & M_4 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \hat{T}_o \\ \hat{q}_o \end{bmatrix} \quad (1.34)$$

El factor de decremento se obtiene de la ecuación 1.35:

$$f_c = \frac{1}{UM_2} \quad (1.35)$$

$$f = |f_c|$$

El tiempo de retraso se obtiene de la ecuación 1.36:

$$\Phi = \frac{12}{\pi} \arctan \frac{Im(f_c)}{Re(f_c)} \quad (1.36)$$

Este procedimiento para conocer el factor de decremento y el tiempo de retraso puede ser realizado en una hoja de cálculo o bien, dentro de alguna rutina de cálculo. De esta forma se puede estimar la respuesta térmica en distintos tipos de envolventes.

### 1.5.2. Masa térmica y aislamientos térmicos

El consumo energético puede abatirse mediante el uso de materiales aislantes, sobre todo en regiones calurosas, donde las cargas de enfriamiento son elevadas. Al diseñar edificios en estas regiones, sobre todo si se busca aprovechar la masa térmica como estrategia de diseño, se deben considerar factores como la posición del aislamiento, el espesor, los sistemas de montaje del mismo y los acabados superficiales o recubrimientos.

Los estudios numéricos realizados por Asan [26], Mavromatidis et al. [49] [50] y Al-Sanea et al. [19], muestran la importancia de que el aislamiento térmico sea instalado por la parte exterior del muro si se busca satisfacer las condiciones de confort en edificios sin climatización, mientras que ubicar el aislamiento al interior usualmente ayuda a reducir el consumo energético en edificios climatizados. Además se puede considerar la posibilidad de emplear dos capas de aislamiento, una al centro y otra en la parte externa del muro para obtener mayores tiempos de retraso y menores factores de decremento.

Por otra parte y de acuerdo al estudio de Ozel [58] tanto el espesor del material aislante, como el del material estructural, debe ser óptimo para lograr un balance entre el costo económico inicial y el potencial ahorro energético.

En distintos estudios paramétricos, Aste et al. [28] y Al-Sanea y Zedan [18], muestran las relaciones entre los efectos de las propiedades termofísicas y el espesor de los materiales para distintas configuraciones. A continuación, se listan algunas conclusiones obtenidas de estos estudios:

- En general, a mayor capacidad calorífica  $C$ , mayor tiempo de retraso y menor factor de decremento.
- Los materiales con baja conductividad térmica  $k < 1 \text{ W/m}^2\text{K}$ , alcanzan mayores tiempos de retraso y menores factores de decremento.
- El efecto de la conductividad térmica es mayor sobre el efecto de la capacidad calorífica con relación al factor de decremento.
- Para materiales con una conductividad térmica  $k < 3 \text{ W/m}^2\text{K}$  los efectos de la capacidad calorífica y la conductividad tienen una influencia combinada; por arriba de este valor, sólo la capacidad calorífica tiene efectos importantes.

En este capítulo se presentaron los fundamentos para tomar una dirección inicial en el diseño térmico de edificios mediante simulación computacional; aunque aún restan

distintos parámetros por definir para simular el edificio. Los próximos capítulos se enfocan en mostrar aquellos detalles que deben ser cuidados para dirigir el diseño del edificio hacia la reducción del consumo energético por climatización.

## Capítulo 2

---

# Envolvente de edificios comerciales

---

Al hablar de edificios comerciales, resulta abrumador pretender enunciar consideraciones generalizadas de diseño; cada edificio posee particularidades muy específicas, ya sea por sus dimensiones o como consecuencia de las actividades que se desarrollen en él. De cualquier manera, al buscar mejorar el consumo del edificio, se debe de tener conocimiento de cuáles son los principales factores que impactan en la climatización, en el consumo y en el confort térmico. Las secciones de este capítulo están dedicadas a discutir estos factores. Buena parte de los comentarios son tomadas de una serie de publicaciones sobre edificios comerciales y ahorro energético, distribuidas por la *American Society of Heating, Refrigerating and Air Conditioning Engineers* (ASHRAE) [20, 21, 24, 23, 25, 22], así como por la *International Energy Agency* (IEA) [47].

Retomando la clasificación mostrada en la Tabla 1.2 del primer capítulo, es posible identificar los distintos tipos de edificios comerciales, sin embargo, es necesario hacer hincapié en el hecho de que esa clasificación es aún muy general. Como ejemplo se puede tomar a los hoteles, aunque su actividad principal sea el ofrecer hospedaje a las personas, inmediatamente se piensa en que existe una gran variedad de acuerdo a las exigencias y necesidades de los clientes; los edificios pueden ir desde ser pequeños establecimientos con los servicios básicos, hasta ser grandes y novedosas construcciones que ofrecen numerosas comodidades. Por esta razón, es necesario que la evaluación de

cada elemento sea siempre conforme al criterio y a la experiencia de los involucrados en el diseño.

## 2.1. Almacenes

La envolvente de los edificios de almacenaje y talleres pueden ser estructuras metálicas revestidas con paneles ligeros tanto en la superficie externa como en la interna, o bien, construcciones con muros masivos. La cubierta superior es ligera, láminas metálicas o plásticas que permiten el paso de la luz solar. Por lo general, no son espacios completamente climatizados, las áreas con aire acondicionado son aquellas destinadas para uso de oficina y son construidas con elementos ligeros y ventanas.

El aislamiento de la envolvente y su espesor se determina en función del tipo de construcción; en el caso de las estructuras metálicas revestidas, donde se forman puentes térmicos, se pueden instalar aislamientos justo en las uniones. Las superficies metálicas emiten gran parte de la radiación que absorben, por ello deben ser evitadas, o bien, instalar aislamientos o recubrimientos que reduzcan la absorción de la radiación solar.

La ventilación natural y la ventilación mecánica son los mecanismos más usados para lograr renovación de aire al interior de almacenes y talleres. El diseño del sistema de ventilación debe ser evaluado detalladamente; el movimiento de aire al interior del edificio está influenciado fuertemente por fenómenos convectivos; las obstrucciones al flujo y las aperturas definen la distribución del aire a lo largo del espacio. En este tipo de edificios, la altura del techo suele ser elevada, lo que fomenta variaciones de temperatura en la dirección vertical, dando lugar a la formación de estructuras convectivas, e.g. plumas convectivas y zonas de recirculación, éstas pueden crear zonas de estancamiento del aire o bien, lugares donde la velocidad local del aire provoque incomodidad.

## 2.2. Hoteles y restaurantes

El alcanzar reducir el consumo energético en hoteles y restaurantes representa una labor compleja. La intensidad energética de estos edificios proviene de la gran demanda de servicios que estos brindan; el acondicionamiento del aire, la refrigeración de alimentos, el servicio de agua caliente, las máquinas proveedoras de hielo, entre otros. El diseño estético de la envolvente muchas veces compromete la eficiencia energética al optar por fachadas cubiertas con acristalamientos. Sin embargo, debido a la propia capacidad económica de las cadenas comerciales, se pueden integrar soluciones novedosas y de mayor costo inicial. El poder realizar un diseño a la medida, es muy útil en proyectos de este tipo; al pensarse como una región donde convergen los intereses de los inversionistas con las ideas innovadoras de ahorro de energía.

El aislamiento de la envolvente y la instalación de acristalamientos de mayor eficiencia son las medidas más frecuentemente empleadas. Cabe señalar que las medidas orientadas hacia la envolvente, si bien son necesarias, darán un beneficio menor al que se podría obtener con estrategias de operación de los equipos mencionados en el párrafo anterior.

El factor humano juega un papel determinante, por lo que tener personal capacitado en la operación del equipo y que esté plenamente consciente de los beneficios que con ello se obtienen, es otro ángulo que conviene cubrir para mantener un uso apropiado de los sistemas que tenga el edificio.

## 2.3. Oficinas

Los edificios de oficinas, tanto del sector público como privado, son edificios climatizados cuya envolvente está compuesta por elementos masivos y por ventanas que ocupan distintos porcentajes de la superficie exterior; además, llegan a tener estacionamientos en el sótano y generalmente cuentan con elevadores para facilitar el

traslado del personal. El techo exterior suele ser una losa de concreto. Gran parte de esta superficie está expuesta directamente a la radiación solar.

Las superficies de la envolvente que más intercambian calor debido a factores climáticos son la losa exterior de la azotea y las superficies orientadas al este, al oeste y al norte para el hemisferio norte, la exposición solar varía conforme a la latitud del sitio de construcción, por ello, la ubicación de ventanas grandes debe ser preferentemente al sur; la instalación de elementos que brinden sombreado en las demás orientaciones también tiene que evaluarse. Otras superficies que deben ser cuidadosamente estudiadas, son aquellas adyacentes a espacios no acondicionados, e.g. los pisos sobre estacionamientos en el sótano y los muros de elevadores y escaleras de emergencia. Muchas veces los pasillos internos son zonas sin climatización, por ello también se deben evaluar estas adyacencias.

La altura entre pisos en los edificios de oficinas es, por lo general, la misma en cada piso y no tan alta como para que existan grandes diferencias de temperatura en la dirección vertical; por ello, la estratificación de la temperatura del aire al interior de cada zona puede ser debida a la alta concentración de personas o de equipos en una zona, aunque también en áreas cercanas a las superficies de los vidrios, ya que los vidrios y los marcos que los sostienen son elementos que fácilmente transfieren calor al aire.

## 2.4. Centros comerciales

Dentro de los centros comerciales se pueden reconocer distintos usos del espacio, e.g. área de ventas, almacenaje, cuartos de máquinas, espacio de oficinas, pasillos y vestíbulos, entre otros. En cada una de estas zonas, las necesidades de climatización y las cargas internas pueden ser muy diferentes, por ello la distribución de cada zona dentro del edificio es determinante para poder tener una simulación confiable.

Las envolventes de este tipo de edificios se construyen con elementos masivos y cierta parte se cubre mediante acristalamientos. Por lo general los acristalamientos son para fines de iluminación natural, lo cuál ayuda a reducir el consumo energético total; sin embargo, se debe cuidar el uso excesivo en zonas climatizadas para evitar que se incremente la transferencia de calor a través de estos elementos.

Algunas zonas como los pasillos y vestíbulos son muy amplias, y los cálculos obtenidos mediante las simulaciones para temperatura y humedad del aire, no son representativos para este tipo de situaciones; no obstante, el uso de la simulación brinda una comparativa entre las distintas opciones de diseño y sirve de apoyo en el proceso de decisión. En este tipo de edificios se recomiendan estudios más completos para el diseño de climatización, e.g. modelado con dinámica de fluidos computacional.

## 2.5. Hospitales

Los hospitales en general tienen una gran demanda energética, mucha de la cual no es fácil de reducir debido a la fuerte dependencia de los equipos de monitoreo, diagnóstico y cuidado del paciente. Por otra parte, la necesidad de mantener una muy buena calidad del aire y confort térmico en zonas comunes demanda que la operación de los equipos de acondicionamiento del aire sea continua. Algunas zonas especiales, e.g. cuartos estériles, quirófanos, cuidados intensivos y cuartos de investigación clínica, demandan condiciones de alta pureza en el aire, la cual se obtiene mediante sistemas de filtrado, que a su vez, imponen una mayor caída de presión al flujo de aire dentro de los ductos de distribución, ocasionando que se incremente el consumo energético.

La distribución de planta en cada piso del edificio, sobre todo en los espacios de internación ha sido una de las medidas más recurridas recientemente para mantener un consumo energético eficiente. Algunos diseños arquitectónicos novedosos han buscado que se interconecten las zonas de la planta, manteniendo la entrada de luz exterior y



a la vez, favoreciendo la ventilación natural. La presencia de patios internos con áreas verdes ayuda a amortiguar la variación de la temperatura lo cuál ayuda a mantener condiciones más confortables.

Sin embargo, los diseños eficientes no son los que comúnmente se encuentran en México. La centralización de los servicios de salud en las zonas urbanas es un factor que determina que los hospitales sean edificios altos, muy parecidos a edificios de oficinas, con poca ventilación natural y sólo pocas zonas aprovechan la luz exterior. Dependiendo del tipo de hospital, la relación de área exterior a volumen y la cantidad de acristalamientos serán los factores que determinen la definición de la envolvente.

## 2.6. Escuelas

Las escuelas se presentan como lugares con el potencial para iniciar un cambio en la conducta de la gente, particularmente, con respecto a la forma en la que se observa a los edificios y el consumo energético de los sistemas. Se puede aprovechar el entorno que brindan las escuelas, para que las mejoras dadas en este sentido no sólo impacten en el ahorro energético, sino que también sirvan como casos prácticos sobre los cuales las personas puedan valorar la eficiencia y el ahorro energético en edificios.

El aprovechamiento del espacio, el fomento del aprendizaje y el confort son factores principales que se deben cuidar en este tipo de edificios. El uso de equipos de acondicionamiento de aire junto a la importancia de tener una renovación de aire en las aulas, incrementa el consumo energético. Los muros de la envolvente para estos edificios son muy diversos, sin embargo, el aislamiento debe ser considerado en todos los casos. La iluminación de las instalaciones demanda que una buena parte de la envolvente esté cubierta con acristalamientos, por lo que se debe de seleccionar cuidadosamente la orientación y de ser posible que estos cuenten con recubrimientos o empleen tecnologías que mitiguen el flujo de calor hacia el interior.

La inversión que se realice al inicio de la construcción o en la reconversión de algún edificio existente, se debe de apreciar en el largo plazo, ya que al reducir los costos de operación y mantenimiento del edificio, al paso del tiempo, se podrán atender otras necesidades mucho más fundamentales para la academia en lugar de dirigir ese dinero al pago de energía por alto consumo.

## Capítulo 3

---

# Metodología empleada en el trabajo

---

La evaluación energética de edificaciones está ligada al grado de precisión que se desea obtener en el estudio. Algunos métodos simplificados, como el propuesto en la norma mexicana, resultan inapropiados para observar los fenómenos transitorios en el edificio a lo largo del año y puesto que la inercia térmica es un fenómeno dinámico se elige trabajar mediante simulación computacional.

### 3.1. Simulación computacional de edificios

En el primer capítulo se mostraron las ecuaciones de transferencia de calor y humedad utilizadas en el modelado de edificios, estas ecuaciones pueden ser resueltas de forma numérica. Para ello es necesario dividir el modelo geométrico del edificio a estudiar en diversas zonas; cada elemento de una zona lleva asignado un cierto número de nodos y en cada nodo se evalúan las ecuaciones de energía y masa expresadas de forma discreta en el espacio y en el tiempo. Las condiciones de frontera para cada nodo dependen del tipo de elemento del cuál sea parte el nodo en turno, e.g. superficies exteriores, interiores, interfaz entre dos materiales, superficies adiabáticas, entre otras. Este tipo de solución permite evaluar de forma paramétrica el diseño del

edificio bajo condiciones dinámicas de operación. Además, este enfoque de solución facilita la identificación oportuna de los factores que tienen mayor impacto en el consumo energético del edificio. Sin embargo, existen varios programas computacionales que sirven esta función, por lo que se debe realizar una evaluación comparativa y escoger la opción más adecuada de acuerdo a los objetivos que se plantean, esto se discute en la siguiente sección.

### 3.1.1. Programa de cálculo

Al tiempo que se desarrolla este trabajo existen distintos programas que realizan cálculos térmicos dinámicos para edificios [33], uno de ellos es EnergyPlus, ver Apéndice A. La razón por la cual se escoge este programa obedece dos aspectos; primero, es una herramienta muy completa que se encuentra en constante actualización; y segundo, se han realizado estudios previos haciendo uso de este programa, por lo que ya se cuenta con un cierto conocimiento de su funcionamiento.

Para realizar la simulación en EnergyPlus se requiere de un archivo de texto que contenga la definición del modelo empleando la sintaxis de EnergyPlus y un archivo de datos climáticos con datos del año típico meteorológico con formato de EnergyPlus Weather (.epw). El archivo de entrada puede ser llenado mediante el editor IDFeditor distribuido con EnergyPlus aunque sólo está disponible para el sistema operativo Windows. O bien, puede ser escrito directamente en un editor de texto genérico.

### 3.1.2. Modelo geométrico

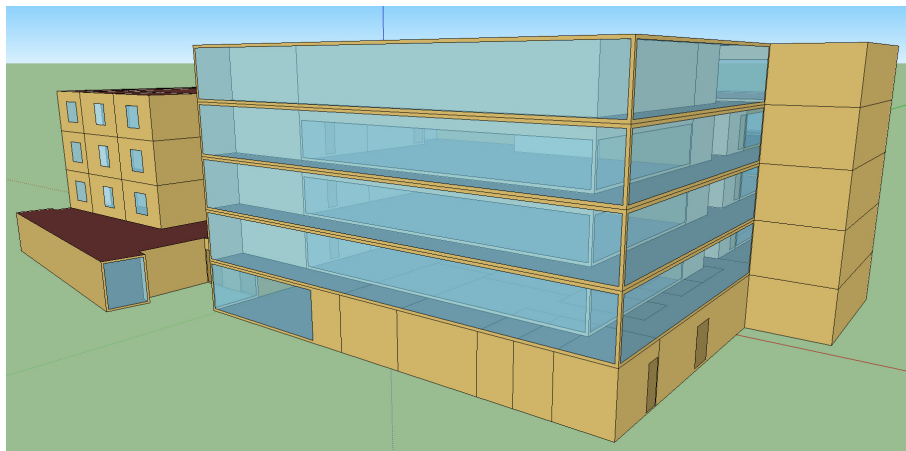
La geometría de cualquier edificio en EnergyPlus, se describe introduciendo los vértices que conforman todas las superficies en un sistema de coordenadas rectangulares X,Y,Z; dependiendo del tamaño del modelo esto puede llegar a ser muy complicado. Usualmente se recurre a una interfaz gráfica externa para la creación de la geometría, principalmente se usa SketchUp ya que es ahí donde se han desarrollado los principales complementos para EnergyPlus. Para el año 2013 se espera que

EnergyPlus sea distribuido con su propia interfaz gráfica.

La interfaz gráfica que se utilizó para la creación de la geometría fue el programa de diseño y animación Blender, ver Apéndice B. Debido a que Blender no guarda ninguna relación con EnergyPlus, para la elaboración del archivo de texto se empleó el complemento ODS-Studio para Blender 2.63 creado por la firma australiana ODS Engineering, ver Apéndice C. Este complemento fue proporcionado de forma gratuita por ser para uso académico solamente.

## 3.2. Descripción del edificio

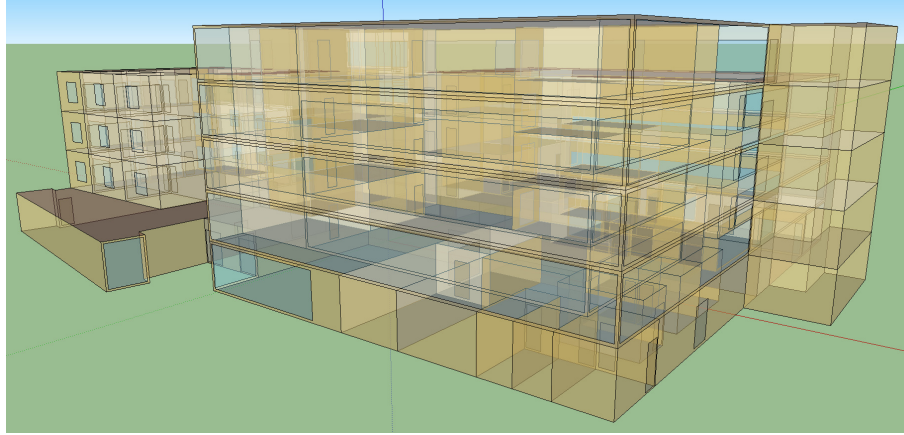
El edificio seleccionado para el estudio es un centro de investigaciones de la Universidad Autónoma de Nuevo León, figura 3.2; la construcción del edificio se encuentra en marcha al momento en que este trabajo se conduce. La información aquí presentada es, en principio, la misma que se necesita para realizar una simulación energética sobre cualquier otro edificio.



**Figura 3.1:** *Vista exterior del edificio.*

### 3.2.1. Ubicación y clima del sitio

El edificio está localizado dentro del Parque de Investigación e Innovación Tecnológica en el municipio de Apodaca, N.L. Apodaca forma parte del área metropo-



**Figura 3.2:** Vista hacia el interior del edificio.

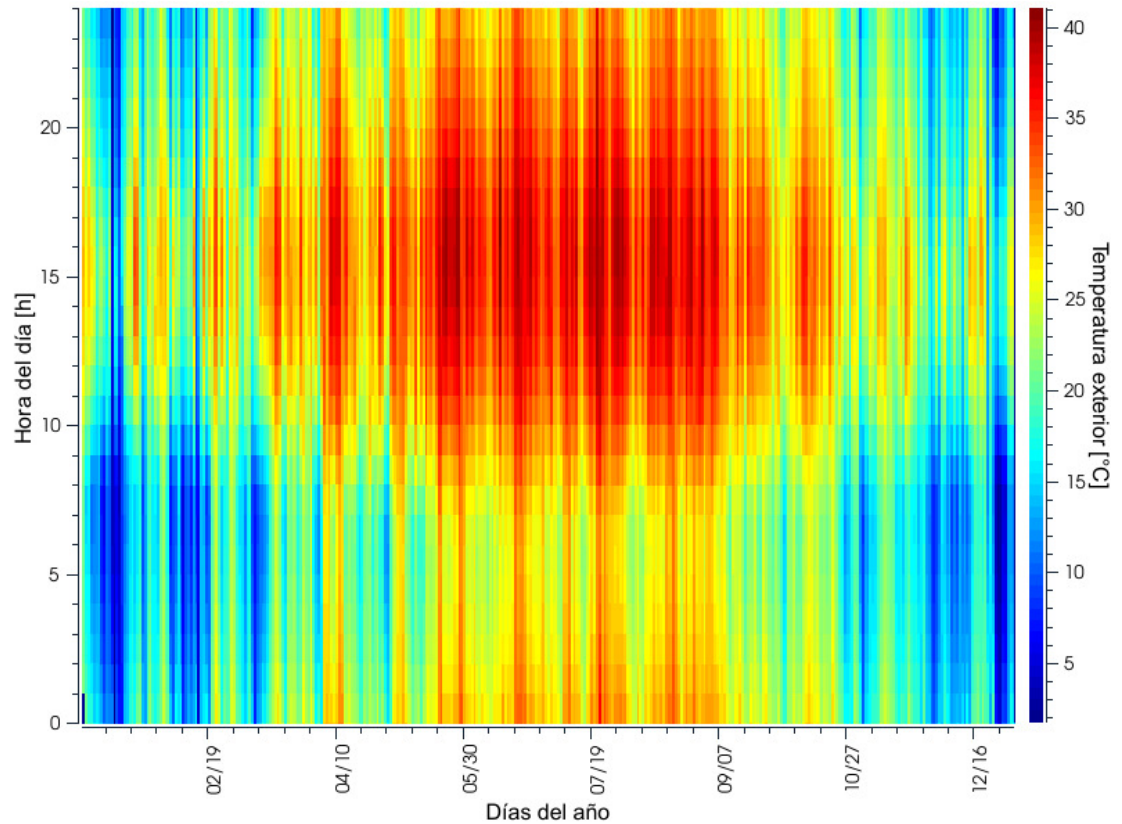
litana de la ciudad de Monterrey situada en una región climática del tipo BSh de acuerdo a la clasificación climática de Köppen. La Tabla 3.1 muestra información de la localidad.

<b>Datos del Servicio Meteorológico Nacional</b>	
Altitud	495 msnm
Latitud	25°40'57"
Longitud	100°16'01"
Temperatura media anual	22.3 °C
Precipitación anual	631.4 mm

**Tabla 3.1:** Información climática y geográfica de Monterrey, N.L.

Los datos climáticos necesarios para la simulación fueron generados mediante Meteonorm 6, ver Apéndice D, los datos fueron conseguidos mediante el sitio de internet de soporte a usuarios de EnergyPlus [6]. La Figura 3.3 muestra la gráfica de temperatura exterior horaria del año típico meteorológico. En la Figura 3.4 se muestra la humedad relativa del aire para el mismo año.

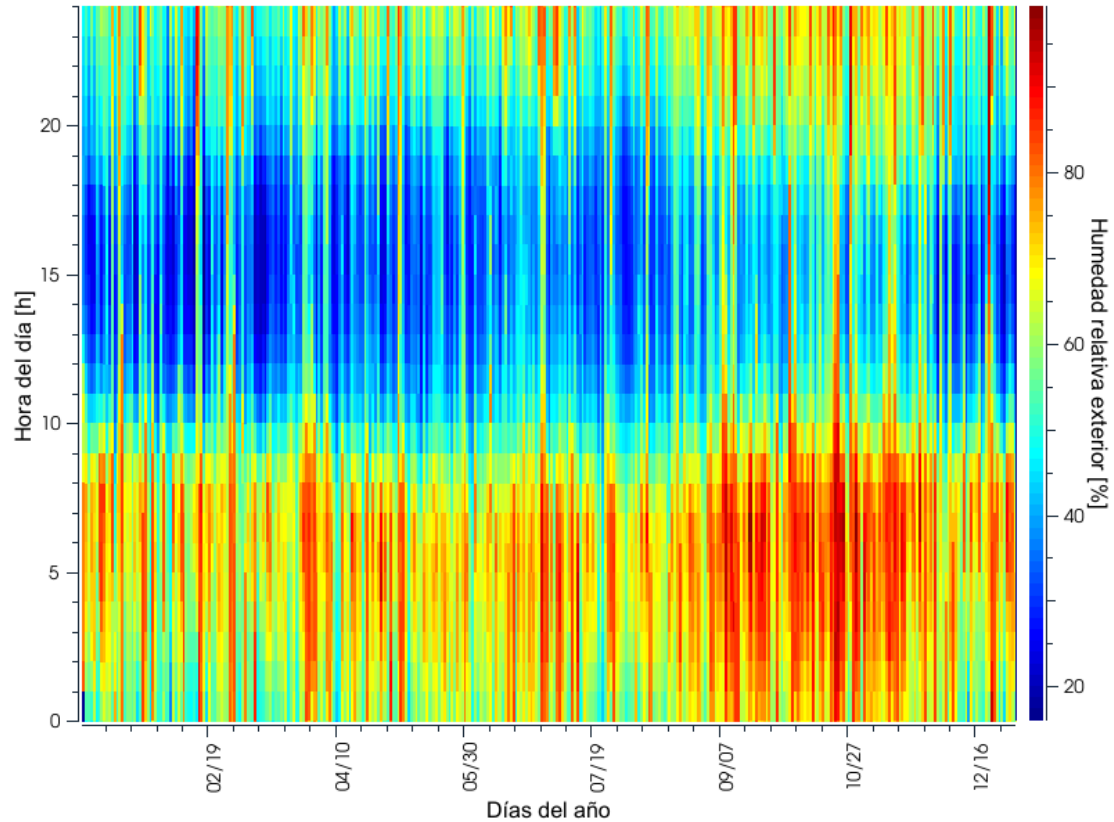
El diagrama de la trayectoria solar para la ubicación dada sirve para observar y determinar la mejor orientación que pueda tener el edificio a lo largo del año. El programa tiene un módulo que permite visualizar este diagrama, Figura 3.5, en la figura se puede apreciar la orientación del edificio con respecto al norte geográfico.



**Figura 3.3:** *Temperatura del aire exterior horaria en Monterrey, N.L.*

### 3.2.2. Sistema de climatización del aire

EnergyPlus es capaz de calcular la capacidad de climatización del edificio, tanto para calefacción como para enfriamiento, este proceso se lleva a cabo mediante una simulación previa empleando un período denominado día de diseño, el cuál debe haber sido definido en el archivo de texto. Para realizar el comparativo del consumo energético se determinan solamente las cargas considerando un sistema ideal; es decir, no se modela ningún sistema mecánico, ni de otro tipo, necesario para entregar el acondicionamiento de aire a las zonas del edificio. Por ello los resultados esperados corresponden solamente a la carga ideal, sin considerar el comportamiento de los equipos que componen el sistema real, e.g. compresores, evaporadores, ductos, entre otros.



**Figura 3.4:** *Humedad relativa del aire exterior horaria en Monterrey, N.L.*

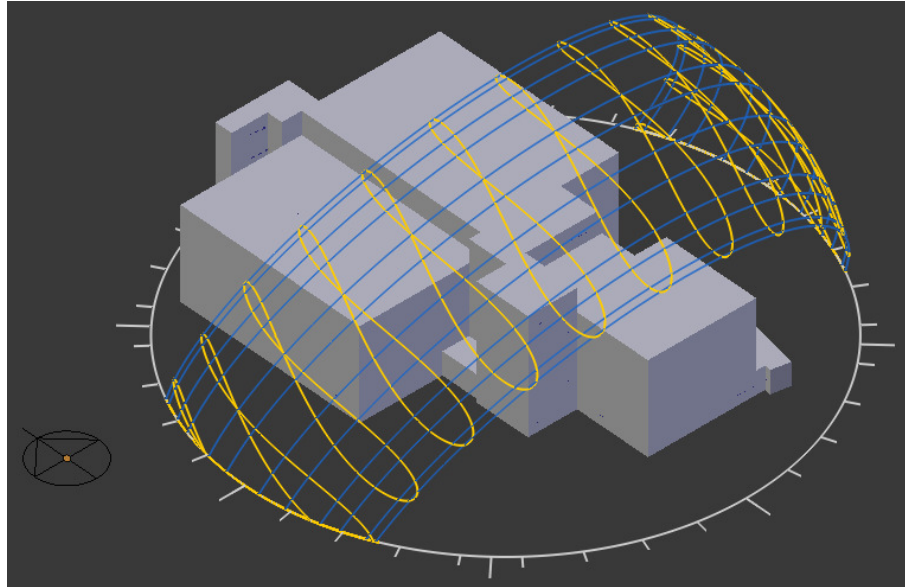
### 3.2.3. Materiales de construcción

La definición de las propiedades físicas de los materiales de construcción es fundamental para llevar a cabo la simulación computacional. Es posible definir distintos tipos de materiales dentro de EnergyPlus según sea necesario.

#### Materiales opacos

A los materiales sólidos se les asigna un nombre para identificarlo, un indicador de rugosidad, auxiliar en el cálculo de los coeficientes de transferencia de calor por convección, el espesor del material y las propiedades térmicas: conductividad térmica, densidad y calor específico. También es posible asignar valores R equivalentes, aunque esto supone que se desprecia el fenómeno dinámico en el material.





**Figura 3.5:** *Trayectoria solar para la coordenadas del sitio.*

La Tabla 3.2 lista los materiales con sus propiedades definidos en este trabajo, estos materiales corresponden a la base de datos de materiales del manual de fundamentos de ASHRAE [59].

Adicionalmente es posible definir otras propiedades cuando otros modelos las requieren, tal es el caso de los coeficientes  $a$ ,  $b$ ,  $c$ , y  $d$  necesarios para el uso del modelo de profundidad efectiva de penetración de humedad visto en el primer capítulo, la Tabla 3.3 muestra estos coeficientes para los materiales ubicados en las superficies internas de las zonas.

### **Materiales translúcidos**

Los materiales de los elementos translúcidos se definen mediante un nombre que los identifica, el espesor y posteriormente las propiedades térmicas y ópticas del material: transmitancia solar normal (TSN), reflectancia solar normal para ambos lados del material (RSNF y RSNT), transmitancia visible (TV), reflectancia visible normal para ambos lados del material (RVNF y RVNT), transmitancia infrarroja normal (TIN), emisividad hemisferica infrarroja para ambos lados del material (EHIF y EHIT) y la

Material	Espesor m	Conductividad W/mK	Densidad kg/m <sup>3</sup>	Calor específico J/kgK
Estuco	0.006	0.72	1856	840
Yeso	0.0069	0.58	800	1090
Placa de yeso	0.0159	0.58	800	1090
Concreto pesado	0.1016	1.95	2240	900
Concreto ligero	0.1016	0.53	1280	840
Block de concreto pesado	0.2032	1.11	800	920
Block de concreto ligero	0.2032	0.5	464	880
Poliestireno XPS	0.0254	0.026	28.32	960
Losa de piso	0.0191	0.06	368	590
Madera	0.009	0.129	496	1630
Vidrio	0.006	0.9	na	na
Material	Valor R m <sup>2</sup> K/W			
Rollo de asfalto	0.026			
Aire horizontal	0.18			
Aire vertical	0.0.15			

**Tabla 3.2:** *Materiales y sus propiedades físicas. [59]*

Material	Profundidad de penetración	a	b	c	d
Yeso	0.004 m	0.072549	0.397173	0.007774	11.7057
Madera	0.004 m	0.144687	0.0631307	0.122495	10.1203
Losa de piso	0.002 m	0.06246	4.516	0.07096	0.4883

**Tabla 3.3:** *Coefficientes para el modelo de humedad en materiales. [1]*

conductividad térmica. Como se puede apreciar los elementos de acristalamiento a definir no almacenan energía, solamente participan en la transferencia de calor por radiación y por conducción; lo cual corresponde a condiciones reales en los edificios.

Para aquellos sistemas con gas al interior se suele definir el tipo de gas, i.e. aire, Argón, Kriptón o Xenon; y el espesor que ocupa en el sistema de acristalamiento. Es posible definir otros tipos de gases si se conoce su conductividad, su viscosidad y su calor específico, las propiedades deben ser funciones de la temperatura. También es

Descripción	Vidrio claro	Vidrio de baja emisividad
<b>TSN</b>	0.775	0.6
<b>RSNF</b>	0.071	0.170
<b>RSNT</b>	0.071	0.220
<b>TV</b>	0.881	0.840
<b>RVNF</b>	0.080	0.055
<b>RVNT</b>	0.080	0.078
<b>TIN</b>	0.0	0.0
<b>EHIF</b>	0.84	0.84
<b>EHIT</b>	0.84	0.10

**Tabla 3.4:** *Materiales translúcidos y sus propiedades. [2]*

posible definir mezclas de gases.

Los acristalamientos pueden ser definidos con un marco sencillo o con divisiones, en él se define el material, las dimensiones y el número de divisiones según sea el caso. También es posible la definición de elementos de sombreado con control de tiempo y de posición, e.g. operación de persianas o cortinas.

La Tabla 3.4 muestra los materiales translúcidos usados en este trabajo, la nomenclatura es la mostrada en el primer párrafo de este apartado.

### Construcciones

Una vez que se han definido los materiales se procede a crear las construcciones que los usaran; e.g. los muros, pisos, techos, etc. La definición requiere que se le dé un nombre e inmediatamente se define la capa de material exterior, i.e. la capa que está orientada hacia afuera de la zona. Las siguientes capas se asignan hasta la capa interna bajo la misma lógica. Este proceso aplica tanto a elementos opacos como a elementos translúcidos.

Estas construcciones son finalmente referenciadas por cada superficie del modelo geométrico; las superficies de aquellas zonas adyacentes entre sí deben tener asignadas construcciones simétricas, es decir, el orden de los materiales visto desde una

zona debe corresponder al orden inverso visto desde la otra zona.

### 3.3. Diseño de experimentos

En la búsqueda de reducir el consumo energético de los edificios, se suelen modificar aspectos del diseño inicial, se varían los parámetros de operación en la simulación, entre otros cambios. Generalmente se introducen modificaciones de forma arbitraria o según la experiencia de los diseñadores, esto no es necesariamente una mala estrategia; sin embargo, es deseable mantener una estructura que permita obtener información objetiva que sirva de soporte en las decisiones. El diseño experimental brinda dicha estructura y tras algunas simulaciones, muestra la dirección a seguir en el diseño del edificio para lograr alcanzar el objetivo señalado al inicio.

#### 3.3.1. Experimentos Factoriales

En la simulación de edificios intervienen distintos factores y generalmente existen interacciones entre ellos, por lo que la metodología de experimentación factorial resulta ser una herramienta de gran valor para determinar cuáles son los factores que tienen mayor impacto en una variable de respuesta, en este caso, será el consumo energético por acondicionamiento del edificio.

Los experimentos factoriales completos son de la forma  $N^F$ ; siendo los factores  $F$  evaluados en varios niveles  $N$ . Si la variable de respuesta presenta un comportamiento lineal entre los niveles inferior y superior, se pueden tener solamente dos niveles, tal que  $2^F$  simulaciones serán necesarias para lograr conocer los efectos de los factores y de las interacciones sobre la respuesta [46].

La experimentación factorial es ampliamente utilizada en la industria en general. El diseño de edificios también ha sido influido por ella, Filfi [38] en su tesis doctoral, presenta esta metodología aplicada al análisis de un edificio de oficinas; además, en dicho trabajo se observa el uso de los factoriales fraccionados para reducir el número de

corridas, manteniendo una producción de información suficiente y útil. Comúnmente, los factoriales fraccionados se utilizan cuando el número de factores a estudiar es alto, dado que eso incrementa rápidamente el número de corridas o simulaciones; e.g. si se consideran dos niveles y nueve factores se tienen  $2^9 = 512$  simulaciones con el factorial completo.

### **Diseños factoriales fraccionados**

Los factoriales fraccionados pueden entenderse como una porción del diseño factorial completo, dependiendo de que tan pequeña sea, se perderá algo de información a cambio de tener un conjunto de pruebas más pequeño. Entonces, conviene aplicarlo en etapas iniciales del diseño, justo cuando se desea avanzar desde un panorama general hacia una solución particular. La manera en la que se definan las interacciones será muy importante para poder interpretar los resultados.

Un elemento fundamental de los factoriales fraccionados es la estructura de confusión del diseño; al sólo considerar una fracción del diseño experimental completo, los efectos quedan definidos como la suma de los efectos de los factores principales y los efectos de las interacciones de varias vías. Gracias al principio de la escasez de los efectos [52], es posible determinar que las interacciones de tres y más vías no son responsables de los efectos, en tanto que es mucho más posible que sean ocasionados por un sólo factor o por interacciones de dos factores que, al estar combinados puedan generar dicho efecto en condiciones reales. Es en este momento que el conocimiento del fenómeno de estudio ayuda a obtener información útil al evitar caer en malas interpretaciones de los resultados.

#### **3.3.2. Determinación de los factores y sus niveles**

En los capítulos anteriores se presentaron los conceptos y expresiones que soportan la elección de cuáles factores deben ser considerados para poder identificar los efectos de la inercia térmica de la envolvente, sobre la climatización del edificio. Además,

se ha inspeccionado en la literatura acerca del uso de ésta metodología aplicada a edificios en los cuáles la masa térmica sea un factor de estudio. Chlela et al. [30], estudian un edificio de oficinas bajo tres condiciones climáticas distintas en localidades francesas; en dicho estudio, la inercia térmica no figura como un factor de peso sobre el consumo de climatización. Más importante aún, muestra que la variación de la respuesta, i.e. la demanda anual de energía por enfriamiento, es no lineal dentro de los límites de los factores de inercia térmica (muy baja en el límite inferior, muy alta en el límite superior) y ventilación nocturna (cero y cinco cambios de aire por hora). Respecto a la baja participación de la inercia térmica, mostrada en dicho estudio, queda pendiente por evaluar zonas climáticas más extremas, sobre todo climas cálidos como el clima de la ciudad de Monterrey.

Se busca evaluar ocho factores dentro del diseño experimental, ver la Tabla 3.5, con los cuales se delinea un factorial fraccionado que pueda mantener el panorama completo y evitar un alto número de simulaciones. Para tal cantidad de factores se recomiendan dos tipos de diseños, principalmente debido a la resolución, el  $2^{8-2}$  con resolución V y el  $2^{8-3}$  con resolución IV; el primero con sesenta y cuatro corridas y el segundo con treinta y dos. La principal diferencia entre estos dos diseños es que para el primero, los factores principales y todas las interacciones de dos vías no se encuentran confundidas; mientras que en el segundo, algunas interacciones de dos vías están confundidas con otras del mismo orden [52].

ID	Factor	Unidades	Nivel -1	Nivel +1
A	Capacidad calorífica	-	baja	alta
B	Posición del aislamiento	-	interior	exterior
C	Emisividad de los cristales	-	baja	alta
D	Ventilación nocturna	ca/h	0	5
E	Operación HVAC	h	8	10
F	Infiltraciones	ca/h	0	0.25
G	Valor U cristales	W/m <sup>2</sup> K	5.7	2.9
H	Temperatura interior	°C	22	24

**Tabla 3.5:** Factores experimentales y niveles de estudio.

Al evaluar la cantidad de simulaciones necesarias con los diseños ya mencionados y el tiempo de cómputo de cada simulación, se opta por el diseño con resolución V. La decisión de emplear este diseño surge al considerar el tiempo que se necesita para correr una simulación del modelo ( $\sim 30$  min); como suele ser típico en cualquier simulación computacional, la mayor parte del tiempo se invierte en el pre-proceso de la simulación. El post-proceso de la información consiste en introducir las variables de respuesta para cada experimento y la elaboración del análisis estadístico correspondiente, el cuál se describe más adelante.

A continuación se describen los factores con sus respectivos niveles:

### **Factor A. Capacidad calorífica**

La capacidad calorífica de la envolvente está definida en función de los materiales y el espesor de cada uno, por ello dependiendo de lo que se busque, se puede modificar el espesor, o bien, el material de alguna de las capas. En este trabajo se modifican los materiales de construcción en muros y losas. En los muros exteriores se definieron dos bloques de concreto, ambos de 200 mm de espesor. Las capas superficiales en muros exteriores son 6 mm de estuco por fuera y 6 mm de yeso en la parte interna.

Las losas en techos exteriores se definieron con dos concretos monolíticos, ambos con un espesor de 100 mm. En la superficie exterior se declaró una capa de impermeabilizante asfáltico, mientras que en la superficie interior se declaró una capa de yeso. Para el suelo sobre terreno se definió una losa monolítica de concreto con una capa superficial de loseta cerámica al interior.

Todos los muros interiores se declaran con dos capas de yeso de 16 mm con una capa de aire intermedio. Los entrepisos se componen de una losa monolítica de concreto con una capa superior de loseta cerámica y por debajo una capa de aire más una capa de yeso.

**Factor B. Posición aislamiento**

El aislamiento se considera de poliestireno extruido con 25.4 mm de espesor y sólo se varía su posición, exterior e interior, tanto para losas como para muros exteriores solamente.

**Factor C. Emisividad de los cristales**

Los vidrios de baja emisividad permiten el paso de la luz visible a la vez que impiden el paso de la radiación infrarroja a través de ellos, esta característica mejora su desempeño térmico. Se definen dos tipos de vidrio, uno normal y otro de baja emisividad.

**Factor D. Ventilación nocturna**

Como parte de la estrategia de diseño con la masa térmica de la envolvente, se recomienda que la envolvente sea enfriada durante los períodos nocturnos, aprovechando el descenso de la temperatura exterior al llevar aire hacia el interior y así liberar el calor almacenado por la envolvente. Para este factor fueron definidos dos niveles, con ventilación y sin ventilación, desde las 24:00 hasta las 03:00 para todos los días.

**Factor E. Operación HVAC**

El horario durante el cuál se encuentra disponible el equipo de climatización, puede ser definido mediante un perfil de funcionamiento diurno. La definición de los dos niveles es desde las 9:00 hasta las 18:00 y desde las 09:00 hasta las 20:00, ambos de lunes a viernes solamente.

**Factor F. Infiltraciones**

La infiltración de aire exterior al interior durante los horarios que se tiene climatizado el edificio se define como una tasa constante de renovación del aire interior; los dos niveles que se evalúan son el caso sin renovación alguna y el otro con renovación del 25 % del aire.



**Factor G. Valor U cristales**

Los sistemas de acristalamiento en los muros exteriores se definen para dos opciones de valor U total del sistema, una opción se considera con una ventana con vidrio de 6 mm de espesor con marco de aluminio. La otra es una ventana doble con vidrios de 6 mm con una capa intermedia de aire y marco de aluminio.

**Factor H. Temperatura interior**

Dado que comúnmente la temperatura a la cual se fija el termostato del equipo de climatización no es la misma, se definieron dos opciones dentro de un rango que se considero apropiado, una opción de 22 °C y la otra de 24°C para el aire interior, ambos se definen para el enfriamiento solamente; si bien la variación no es muy grande, se pretende identificar en que medida impacta este comportamiento en el consumo.

La Figura F.1 muestra el resumen del diseño factorial creado con todos los factores, ahí se muestra información sobre los generadores del diseño fraccionado, la estructura de confusión y la nomenclatura empleada.

**3.3.3. Análisis de Diseños Factoriales a dos niveles**

La matriz experimental donde se presentan las combinaciones de los factores y el orden de simulación, es creada mediante un paquete para diseño y análisis de experimentos llamado Rcmdr (R commander) disponible en el lenguaje de programación para análisis estadístico R, ver Apéndice E. Una vez que se han definido los factores, sus respectivos niveles y se han generado los archivos de entrada para la simulación, se procede a realizar las simulaciones. Al terminar del proceso de simulación se obtienen las respuestas deseadas, éstas se introducen de vuelta en la matriz experimental y se importan al diseño experimental en Rcmdr para su respectivo análisis. Con las respuestas calculadas se ajusta un modelo lineal generalizado, en él, se consideran todos los factores y las interacciones de dos vías. Además, R genera las gráficas necesarias para analizar los datos experimentales, e.g. gráficas de efectos principales, gráficas de

interacción entre factores, gráficas de diagnóstico para el modelo lineal, entre otras.

Puesto que los resultados esperados serán producto de simulaciones computacionales, no se tendrán réplicas que permitan conocer el error estimado. De acuerdo a Montgomery [52], una forma de analizar factoriales no replicados es combinar las sumas de cuadrados de las interacciones de orden mayor y así poder tener un estimado del error. El principal problema que puede presentarse es, que tales interacciones sean importantes, por lo que se recomienda que se analicen los efectos mediante una gráfica de probabilidad normal o gráfica de Daniel. Los efectos despreciables tendrán una distribución normal en el gráfico y se agruparan sobre una línea recta. De esta forma, se puede refinar el modelo con sólo aquellos términos que muestren tener importancia sobre la respuesta.

Una vez que se haya realizado el análisis del diseño de experimentos, se procederá a mostrar el desempeño térmico del edificio mediante gráficos que presenten la variación de la temperatura del aire, la humedad relativa y el consumo de energía a lo largo del período de simulación. Esta información es necesaria, sobre todo para que se pueda visualizar la forma en que se establecieron las condiciones de la simulación.

## Capítulo 4

---

# Resultados

---

El análisis de los resultados para un diseño experimental factorial puede ser bastante directo si el diseño fue seleccionado adecuadamente. Una vez obtenidos los consumos anuales de las sesenta y cuatro simulaciones, se procede a representar gráficamente la información obtenida y así poder identificar que factores tienen una influencia fuerte. Además de las gráficas con el análisis estadístico, se muestran resultados detallados para aquellos casos que sean de interés y con ello poder emitir algunas conclusiones sobre este trabajo.

### 4.1. Análisis estadístico

Para determinar el orden de importancia de los factores y sus interacciones se puede observar la gráfica de Pareto de la Figura 4.1. En ella, se muestran los efectos estimados resultantes del análisis de los resultados en orden descendente. Las interacciones entre factores se indican como dos factores juntos.

En el gráfico de la Figura 4.2 se sintetizan los resultados obtenidos junto con el arreglo de factores para cada simulación. Se puede observar la dispersión de respuestas para cada tratamiento, ordenados según la importancia de los factores; además, es posible identificar los casos de mayor y menor consumo energético. En rojo, el consumo de

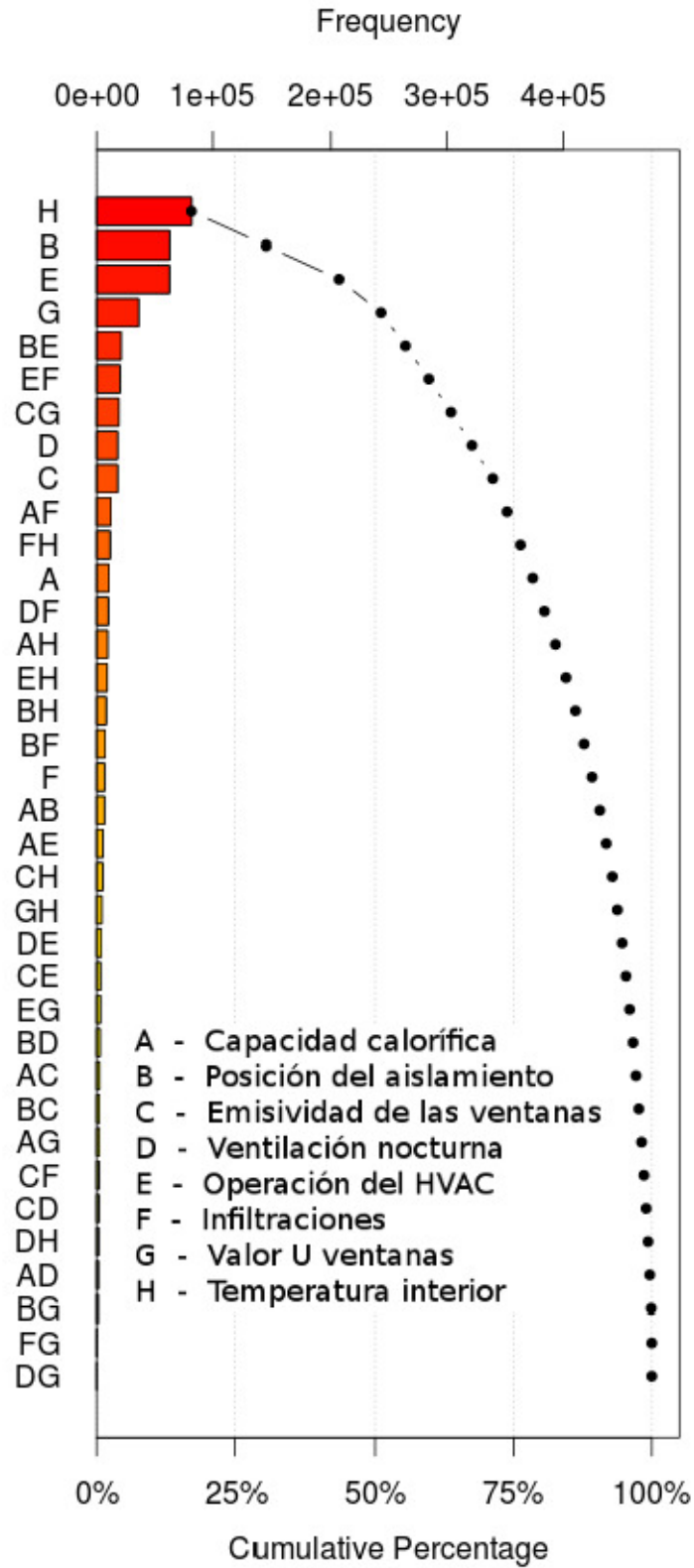


Figura 4.1: Gráfico de pareto, importancia de los factores y sus interacciones.

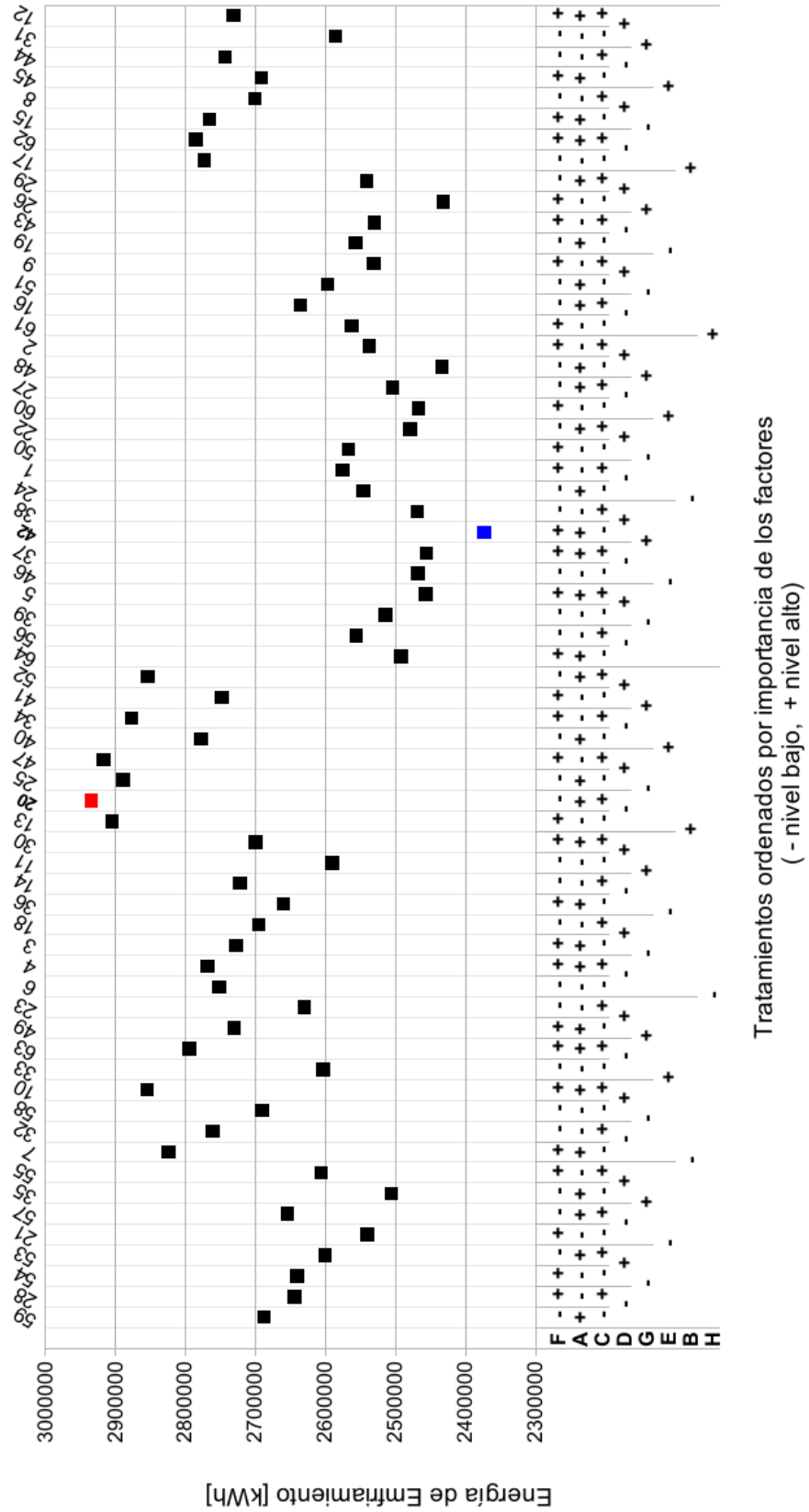


Figura 4.2: Arreglo experimental con respuestas para cada simulación.

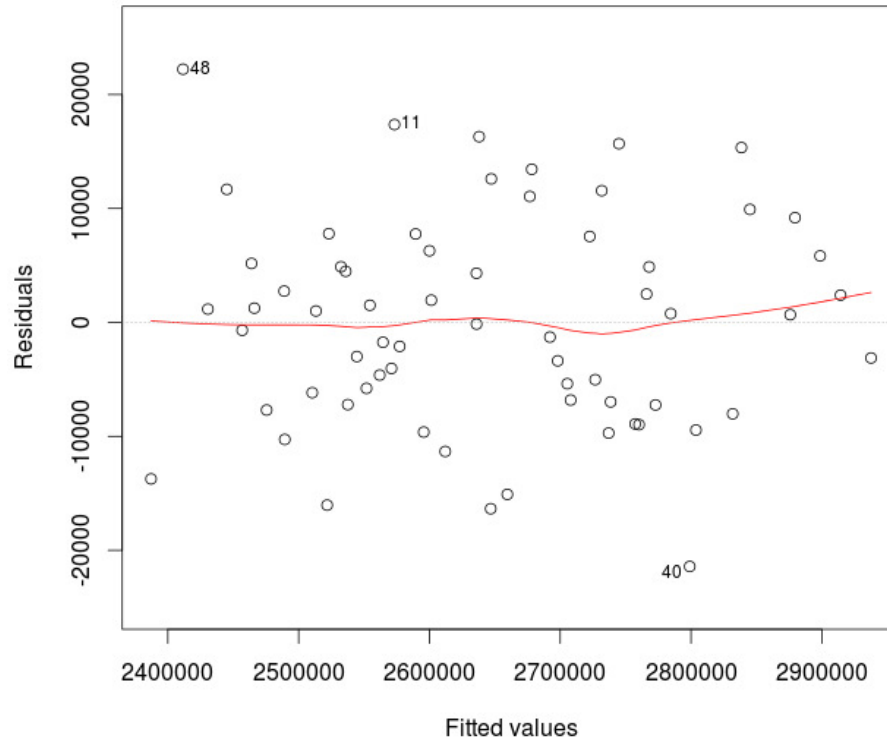
energía por enfriamiento más elevado; en azul, el consumo mínimo calculado. El arreglo correspondiente a la menor respuesta es aquel con la envolvente de mayor masa térmica con aislamiento al interior, ventanas dobles con vidrios de baja emisividad, ventilación nocturna, infiltraciones y acondicionamiento de aire durante nueve horas a 24°C.

De acuerdo con este resultado y el planteamiento de diseño, i.e. la combinación de la masa térmica con la ventilación nocturna para mantener temperaturas menores en el interior; se puede observar que la estrategia de diseño resulta ser efectiva. Por otra parte, se observa que el aislamiento interior resulta más favorable, contrario a lo reportado en la mayoría de los artículos revisados sobre la instalación de sistemas EIFS. En este sistema de construcción se sugiere colocar el aislamiento al exterior; una razón para esta discrepancia podría ser que la temperatura interior en este estudio, se controla de forma periódica; mientras que en los artículos sobre EIFS la temperatura al interior permanece constante o sin control alguno e.g. el caso sin climatización. Esto sugiere que el sistema EIFS debe tener colocado el aislamiento en la parte interior del muro cuando se trata de edificios climatizados. No obstante, es conveniente evaluar más a detalle los resultados obtenidos para poder emitir una recomendación objetiva, esto se muestra a continuación.

#### 4.1.1. Modelo de regresión lineal

El análisis de la información obtenida con las simulaciones se facilita si se presenta en forma de una ecuación matemática, tal expresión se conoce como regresión lineal o modelo lineal. La forma general de este tipo de expresiones se presenta en la ecuación 4.1.

$$Y = \beta_0 + \sum_{i=1}^p \beta_i X_i + \epsilon \quad (4.1)$$

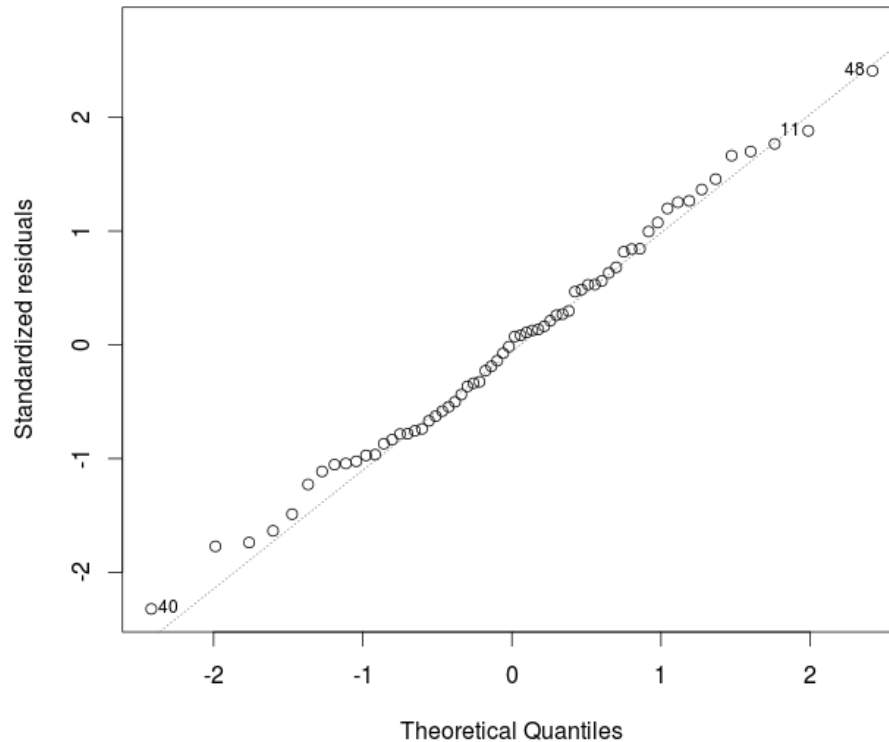


**Figura 4.3:** Residuales contra valores ajustados por el modelo lineal.

donde  $p$  es el número de factores e interacciones entre ellos  $X$ 's que definen la respuesta  $Y$ ; los coeficientes  $\beta_i$ 's son las pendientes del modelo y el coeficiente  $\beta$  es la ordenada al origen llamado comúnmente intercepto. En el Apéndice F se muestra la salida obtenida en R del modelo lineal para las respuestas obtenidas.

Para evaluar la validez del modelo lineal obtenido, se presentan las gráficas de las Figuras 4.3 - 4.5.

La primera gráfica, Figura 4.3, muestra la dispersión de las respuestas y el modelo lineal de ajuste. Puesto que el modelo lineal se basa en supuestos de independencia y normalidad de los valores muestrales, en este caso las respuestas a cada tratamiento; no deben de existir patrones o agrupamientos notables en la dispersión de esta gráfica.

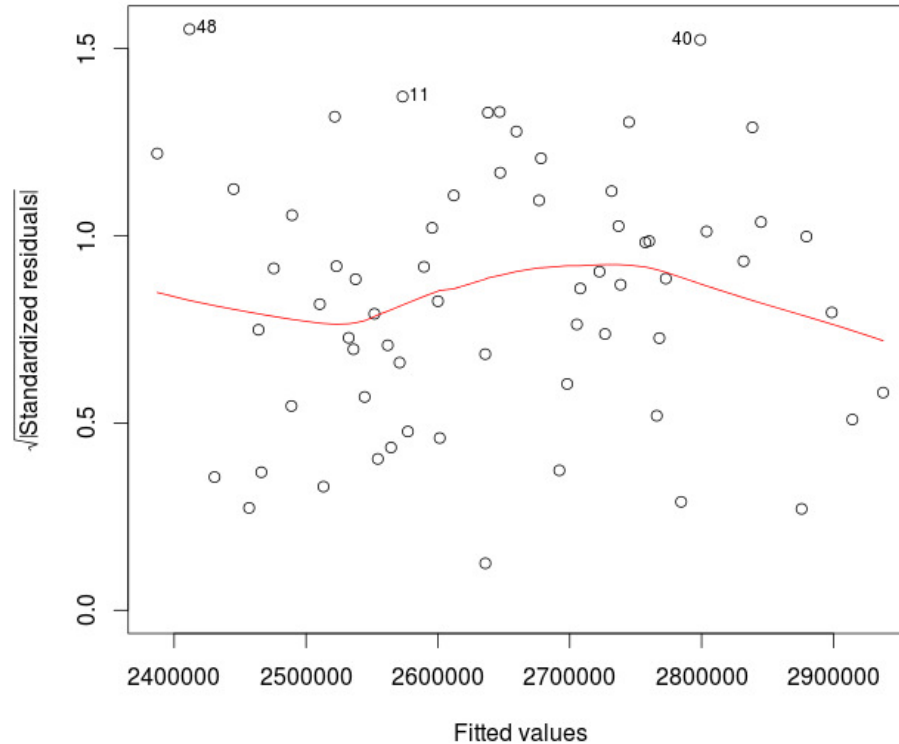


**Figura 4.4:** Residuales contra cuantiles teóricos para el modelo lineal.

La segunda gráfica de diagnóstico, Figura 4.4, muestra los residuales del ajuste contra los cuantiles teóricos; con esta gráfica es posible determinar si la dispersión de los residuales se ajusta a una distribución normal, uno de los supuestos que deben cumplirse para validar el análisis.

La última gráfica de diagnóstico, Figura 4.5, muestra los residuales estandarizados contra los valores de ajuste del modelo lineal, de manera similar a la primera gráfica de diagnóstico, es importante observar que la dispersión no obedece a ningún patrón en particular, los puntos rotulados en las gráficas se consideran como posibles valores atípicos. Una forma de determinar si estos puntos tienen influencia sobre el modelo es mediante la distancia de Cook. Si este valor es menor de la unidad se considera que no tiene una influencia fuerte sobre el modelo. El punto marcado con el número 48 tiene la mayor distancia de Cook observada; con un valor de 0.214 tal que es posible decir que estos puntos no tienden a influenciar fuertemente en la regresión lineal obtenida.





**Figura 4.5:** Residuales estandarizados contra valores ajustados por el modelo lineal.

### 4.1.2. Factores principales

Si se procediera a analizar los resultados caso a caso detalladamente, aumentaría el tiempo y el esfuerzo de forma indeseable. De tal manera que es más conveniente trabajar directamente sobre los factores, gráficos de las Figuras 4.6 y 4.7. En estas gráficas se identifican aspectos subyacentes sobre los factores bajo estudio y cómo influyen en el consumo energético evaluado. Los puntos rotulados, de acuerdo al análisis de Lenth, son considerados estadísticamente significativos en un 95 %, o bien  $\alpha = 0.05$ .

La lectura de la Figura 4.6 resalta aquellos factores, o bien interacciones cuyo efecto es mayor en el consumo energético. Los factores e interacciones que se agrupan sobre una línea recta, tienen poca o nula participación en la estimación de la respuesta. Entre mayor sea la distancia que se desprenda algún factor, mayor es su impacto. Resulta evidente que mantener condiciones de temperatura más bajas al interior del edificio elevará el consumo energético; siendo aquí el caso donde una temperatura de

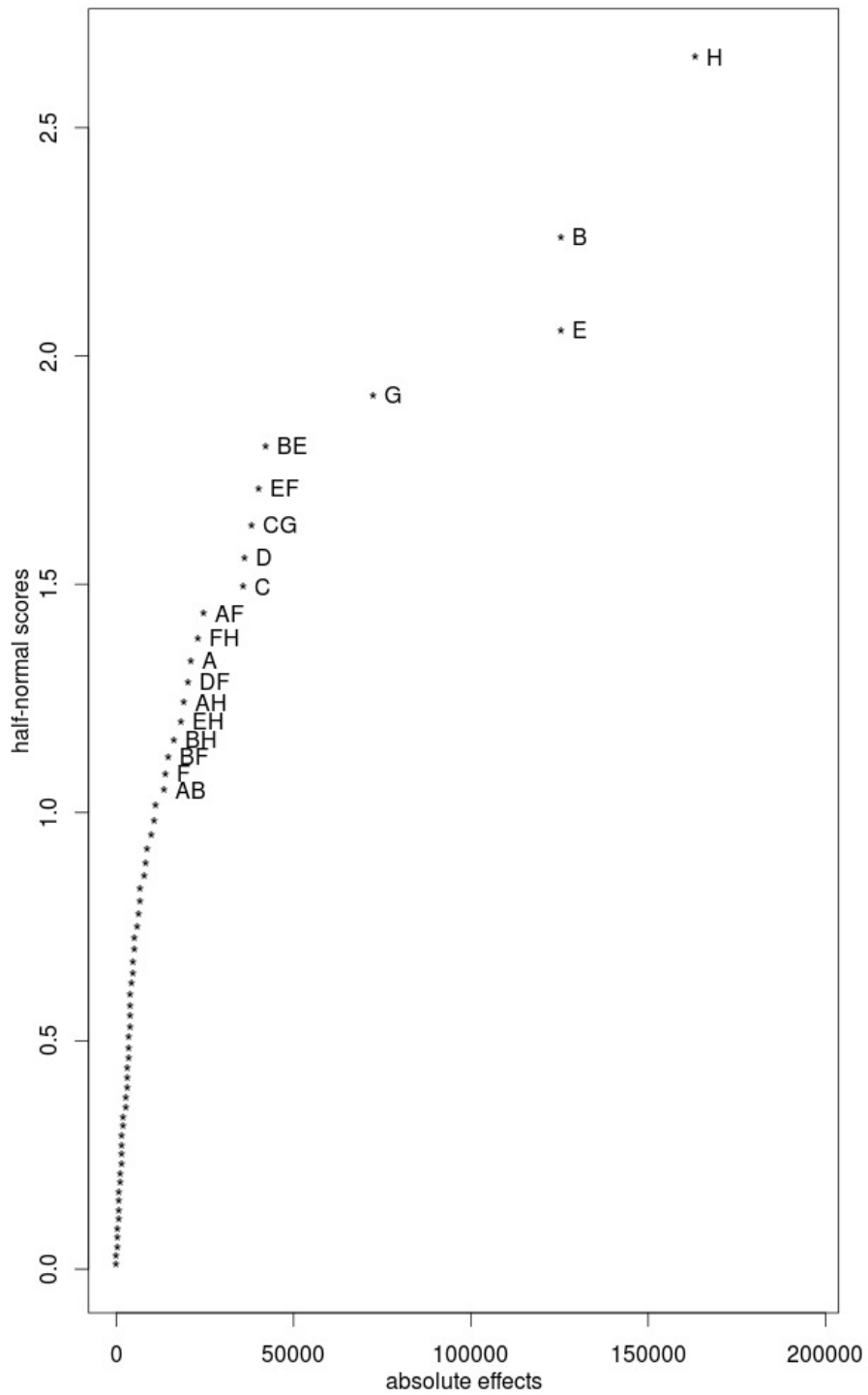


Figura 4.6: Gráfica semi-Normal para Energía.Enfriamiento.  $\alpha = 0.05$

22°C, dos grados centígrados menos que el nivel superior, posiciona a la temperatura interior H como la más determinante entre los demás factores estudiados.

Se aprecian dos factores con efectos similares, aunque la posición del aislamiento es ligeramente superior al horario de operación del equipo de climatización. Este último es un resultado esperado debido a que incide directamente en el tiempo que se controla la temperatura. Con respecto a la posición del aislamiento, se observa su importancia aunque no es posible identificar qué nivel es el más adecuado para reducir el consumo, para ello se hace referencia a la gráfica de efectos principales mostrada más adelante.

El valor U de las ventanas determina el flujo de calor por conducción a través de ellas, y puesto que cerca del 40 % de la superficie de la envolvente son ventanas, resulta que este factor tiene una importante participación en el consumo energético. El nivel que tenga el menor valor U debe estar asociado a una menor respuesta, i.e. las ventanas de doble vidrio propuestas.

Algunas interacciones entre factores parecen tener importancia en la respuesta, por el momento es conveniente seguir discutiendo solamente a los factores principales, aunque es conveniente volver a ellas más adelante para analizar detalladamente que representan o si es que en realidad pueda existir tal interacción. La gráfica mostrada en la Figura 4.7 muestra más claramente a la emisividad de las ventanas y a la ventilación nocturna; el hecho de que estos factores estén situados en extremos opuestos se interpreta como una diferencia de signos en la pendiente que tienen asociada, lo cuál es más fácil de apreciar en la gráfica de efectos principales mostrada en la Figura 4.8.

La gráfica de efectos principales, Figura 4.8, cuya nomenclatura se muestra en la Tabla 4.1 muestra todos los factores y las respuestas medias que se obtienen para cada nivel. La magnitud de la pendiente determina la importancia del factor y además se facilita la identificación del nivel al cual se obtiene la respuesta deseada. Al buscar el menor consumo de energía, se trata de seleccionar aquellos niveles que tengan el valor

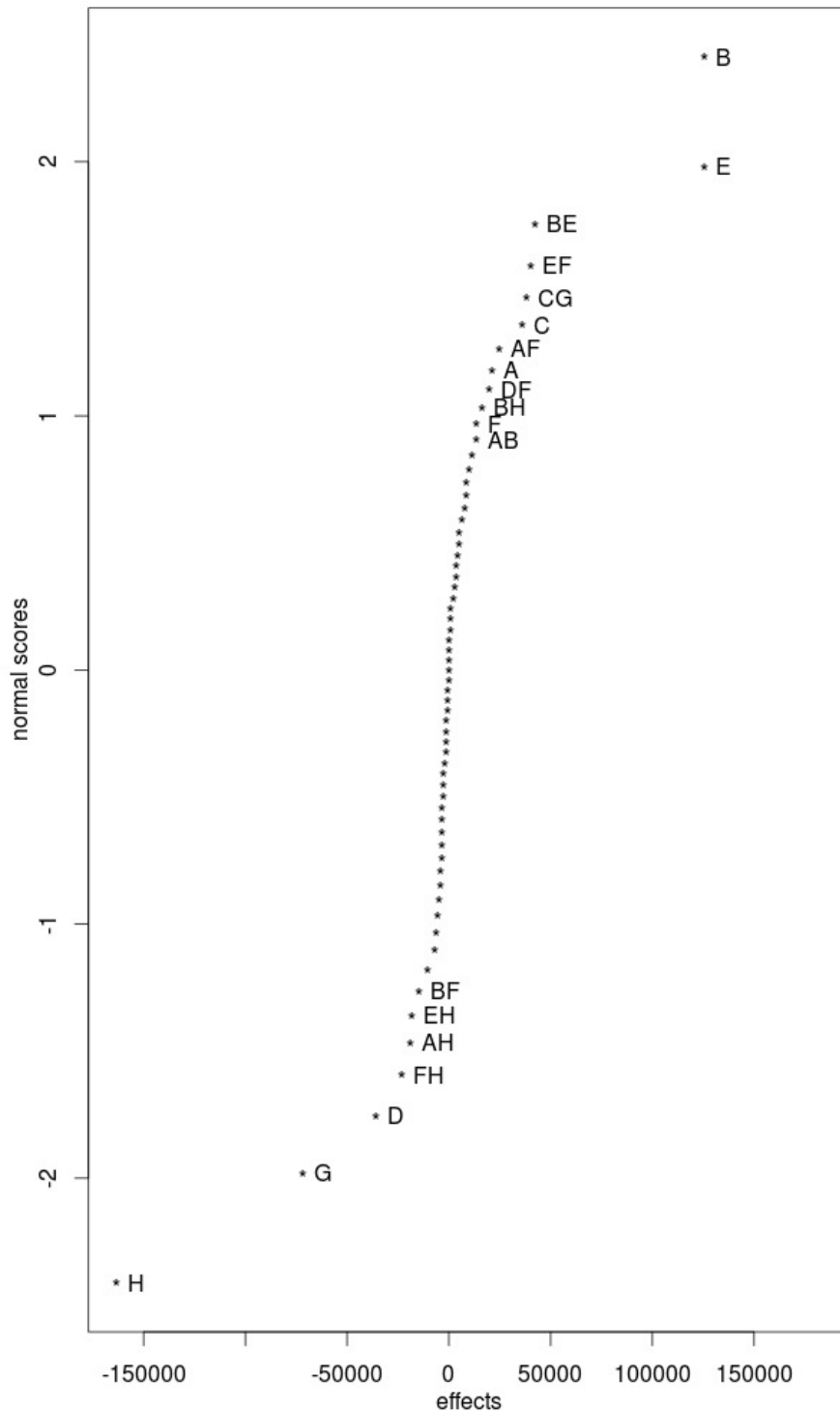


Figura 4.7: Gráfica Normal para Energía.Enfriamiento.  $\alpha = 0.05$

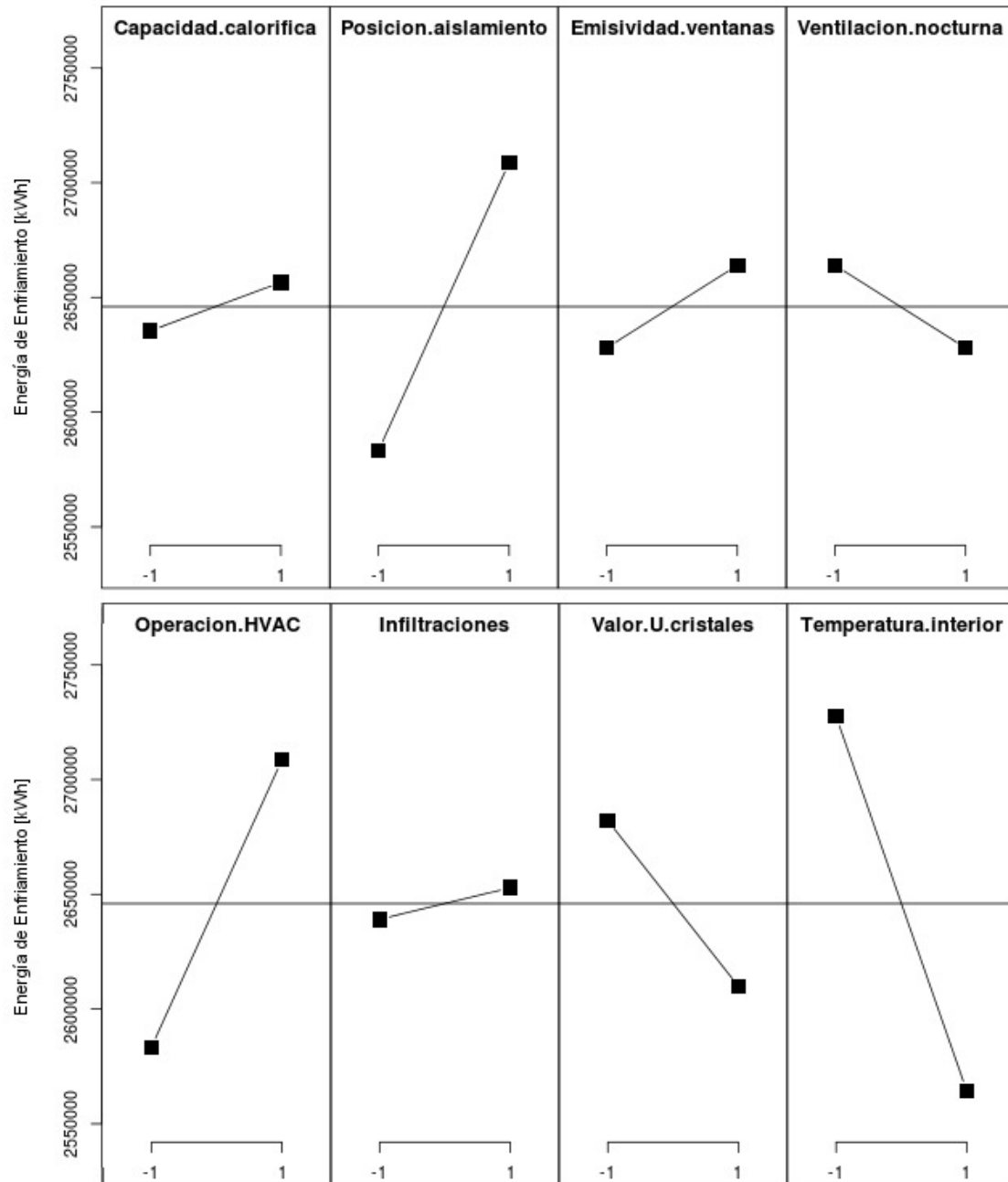
mínimo. De tal manera que incluir la estrategia de ventilación nocturna ofrece una disminución en el consumo al igual que la instalación de ventanas de baja emisividad.

ID	Factor	Nivel -1	Nivel +1
A	Capacidad calorífica	Envolvente ligera	Envolvente pesada
B	Posición del aislamiento	Dentro	Fuera
C	Emisividad de los cristales	Baja	Alta
D	Ventilación nocturna	Sin ventilación	Con ventilación
E	Operación HVAC	Horario corto	Horario largo
F	Infiltraciones	Sin infiltraciones	Con infiltraciones
G	Valor U cristales	Ventana sencilla	Ventana doble
H	Temperatura interior	22 °C	24 °C

**Tabla 4.1:** *Nomenclatura de los niveles de estudio.*

Es en este punto que se puede apreciar la participación de los factores restantes, la capacidad calorífica de la envolvente y la infiltración de aire al interior. El resultado observado para la capacidad calorífica es, en general, contrario a lo que se plantea en la hipótesis de este trabajo. Por una parte la orientación de la pendiente sugiere que la envolvente ligera es la opción más adecuada; en lo que respecta a la magnitud, se podría expresar que no existe una diferencia significativa entre los niveles. Aunque hay que recordar que los resultados son consumos anuales y por ello una reducción por mínima que parezca tendría sentido en términos económicos.

Antes de continuar, es importante destacar que la envolvente ligera seleccionada para los muros, es un sistema de construcción que se ha adoptado en los últimos años llamado EIFS (*External Insulation Finishing System*), que combina la disminución en el peso junto con el efecto aislante del sistema constructivo cuyo valor R es mayor al de los muros de bloque de concreto típicamente usados, teniendo además una reducción en el costo de construcción. Posiblemente la desventaja principal de estos sistemas frente a las construcciones típicas es el costo de mantenimiento para mantener el sistema constructivo libre de humedad.



**Figura 4.8:** Efectos principales de cada factor experimental.

Retomando el tema de la posición del aislamiento y tras observar la gráfica de efectos principales, se puede enunciar que la posición interior ofrece mejores resultados. De esta manera se puede confirmar que la recomendación general de ubicar el aislamiento al exterior no es necesariamente aplicable en todos los casos. Ciertamente es

interesante observar que bajo determinadas condiciones de operación en un edificio, se pueden esperar recomendaciones específicas para su diseño.

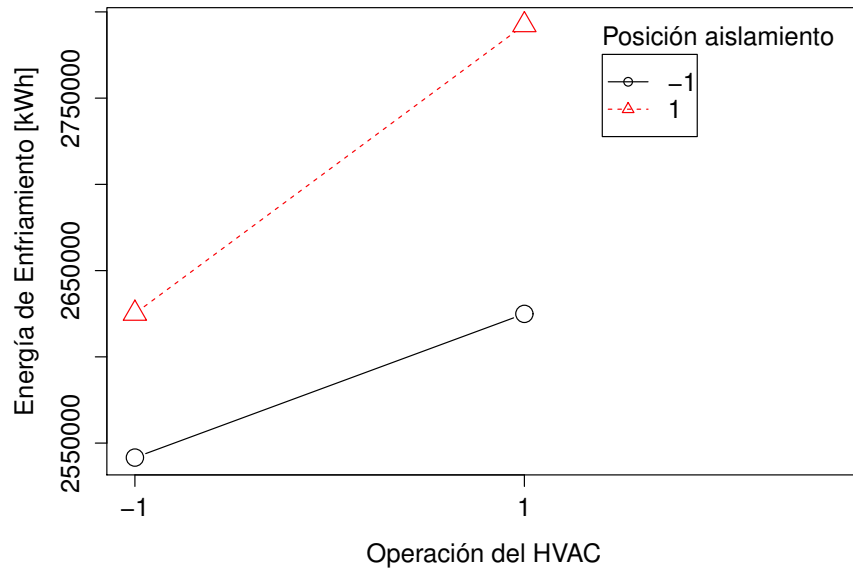
Al analizar los factores solamente, se puede llegar a algunas recomendaciones, sin embargo es importante analizar las interacciones entre ellos, específicamente aquellas que están integradas por factores cuyos efectos sean de importancia.

### 4.1.3. Interacciones entre factores

Antes de continuar, es conveniente presentar una breve explicación para interpretar una gráfica de interacciones; si las líneas de los factores mantienen un paralelismo, se puede decir que no existe una interacción entre los factores. De tal manera que cuando se tenga una tendencia a la intersección entre ellas, es que existe una interacción. La fuerza de la interacción será máxima cuando se encuentren completamente perpendiculares ambas líneas.

La posición del aislamiento y el horario de control de temperatura interactúan como se muestra en la Figura 4.9, se aprecia que al mantener el aislamiento ubicado al exterior, el consumo tiende a ser mayor; nótese que al restringir el horario a nueve horas de funcionamiento, se observa un consumo similar al que se tendría combinando once horas de operación con aislamiento al interior. Por supuesto que la opción de aislar interiormente y restringir el horario ofrece un mayor ahorro, aunque en términos de funcionamiento y aprovechamiento de las instalaciones puede no ser la opción deseada.

La siguiente interacción con un efecto considerable es, entre el horario de control de la temperatura y la infiltración del aire. Sirve recordar que la infiltración en este estudio se definió como una tasa constante de 0.24 ca/h y que el nivel inferior fue definido sin infiltración alguna. Ciertamente no es viable que un edificio esté libre de infiltraciones y además, el no tener renovación del aire al interior acarrea problemas sanitarios. En realidad se debe de satisfacer una tasa de renovación de aire de acuerdo al número de personas y actividad que se realice en cada zona, tal renovación de aire es usualmente

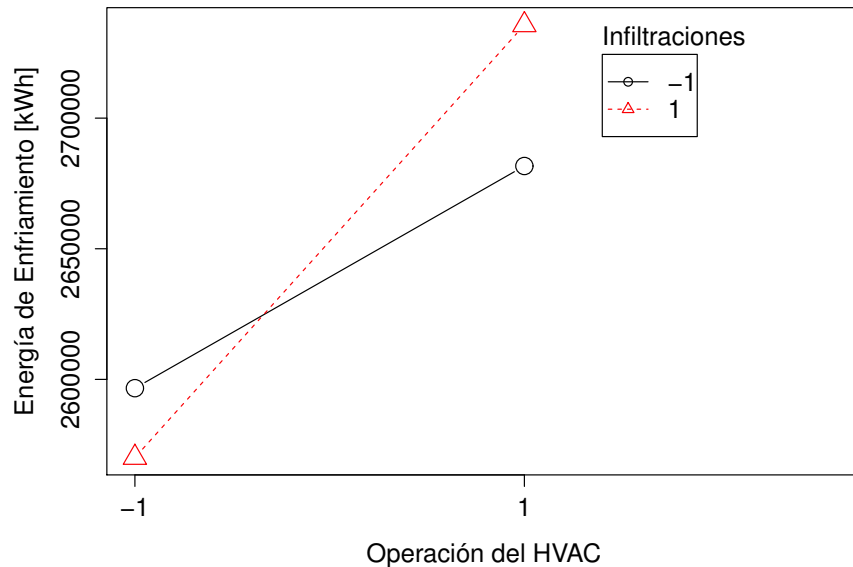


**Figura 4.9:** Interacción entre la posición del aislamiento y la operación del equipo de climatización.

mayor al límite del nivel superior usado en este estudio. Por ahora, resulta suficiente considerar que las infiltraciones aumentan el consumo energético por lo que restringir el horario de funcionamiento vuelve a aparecer como una opción para mitigar este efecto.

La determinación de un valor de infiltración en un edificio usualmente surge a partir de recomendaciones, o bien, mediante mediciones en el sitio, para las cuales el edificio debe estar construido completamente. En la etapa de diseño la última alternativa no es posible por lo que sería más adecuado enfocar la atención hacia el diseño de la ventilación, labor que puede ser realizada con ayuda de otra herramienta numérica, la dinámica de fluidos computacional, la cuál es un área de estudio complementaria que puede ofrecer un panorama mucho más detallado acerca de la distribución de temperaturas al interior y de los patrones de flujo de aire desde el exterior hacia el interior y entre zonas. Por ahora y teniendo en cuenta que uno de los objetivos es alcanzar un diseño preliminar, basta con llegar a la certeza de que se han tomado



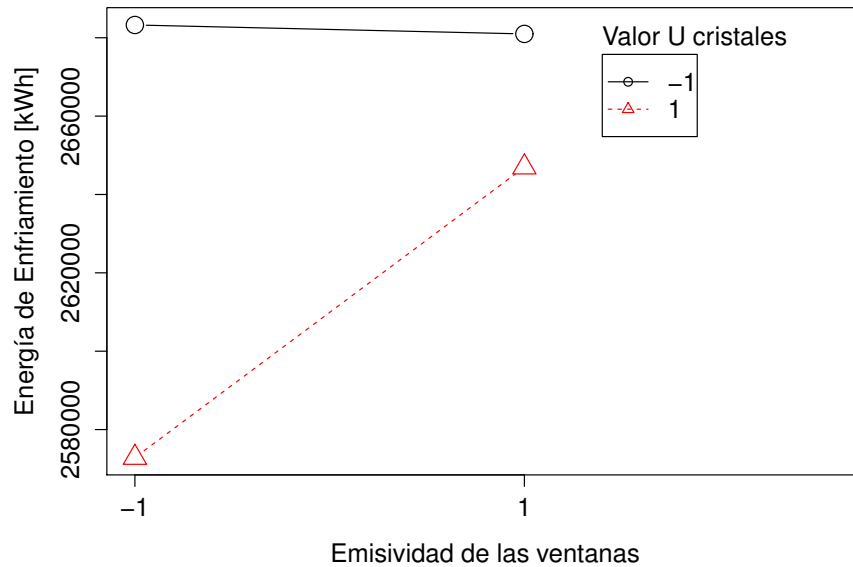


**Figura 4.10:** Interacción entre la operación del equipo de climatización y la infiltración de aire.

decisiones correctas.

Una interacción interesante se puede apreciar en gráfica de la Figura 4.11, en ella, se aprecia la utilidad de emplear ventanas de doble panel. El uso de un vidrio de baja emisividad en acristalamientos sencillos no parece ofrecer resultados que justifiquen su instalación. Sin embargo, el considerar este tipo de vidrio junto con ventanas de doble panel se logra reducir el consumo de manera importante.

Cabe destacar que los sistemas de doble acristalamiento suelen estar llenos de gas argón o kriptón y ello incrementa su costo, mientras que el sistema definido en este trabajo tiene aire al interior. Algunos sistemas evacuados al vacío, suelen ser más económicos, aunque algunos causan que se forme una curvatura en la superficie de los cristales, este fenómeno puede resultar en que la radiación reflejada se concentre en un área focal, provocando molestias al entorno exterior, por ello, este aspecto debe ser considerado cuidadosamente al momento de tomar una decisión sobre los



**Figura 4.11:** Interacción entre la emisividad y el valor  $U$  de las ventanas.

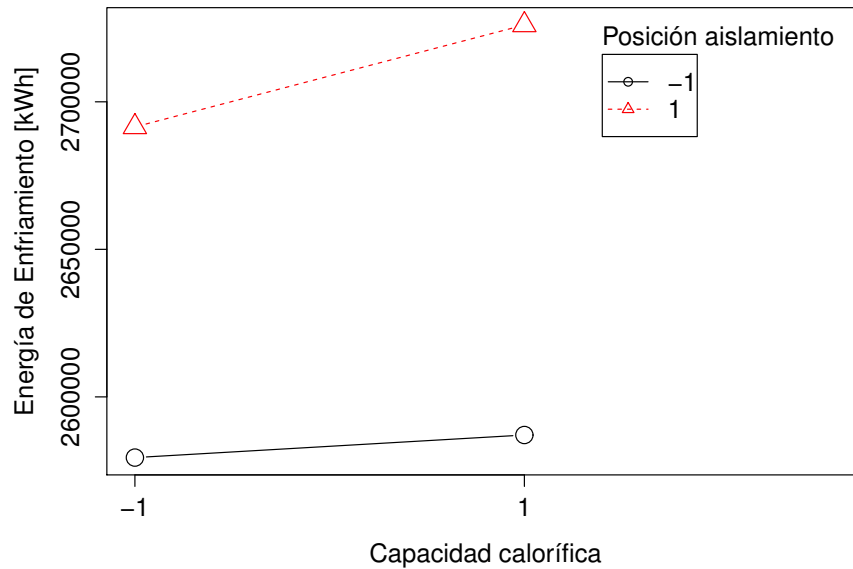
acristalamientos.

Hasta este momento, se han podido identificar las configuraciones más favorables para el diseño del edificio, sin embargo, aún queda pendiente definir qué tipo de envolvente es la más adecuada para alcanzar el menor consumo de energía. A continuación se presenta el análisis enfocado únicamente sobre la capacidad calorífica de la envolvente.

#### 4.1.4. Capacidad calorífica

Es conveniente seguir analizando las interacciones que este factor tiene con los demás para determinar si la opción de mayor masa térmica es superior a la envolvente ligera, como lo sugiere el caso con el menor consumo de energía mostrado en la Figura 4.2. Los factores que ya han sido identificados como importantes, sirven para poder reducir la selección hacia los casos de interés, que serán presentados más adelante.

Al considerar solamente la posición interior para la capa de material aislante, la menor respuesta se ve asociada al uso de la envolvente ligera, sin embargo, la magnitud de



**Figura 4.12:** Interacción entre la capacidad calorífica y la posición del aislamiento.

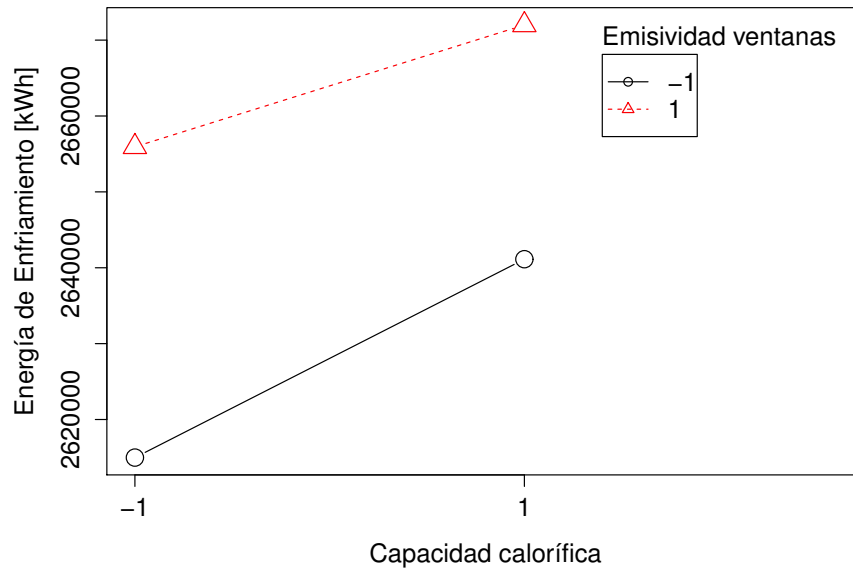
la pendiente de la gráfica de la Figura 4.12, no muestra un cambio importante entre una opción y otra.

### Interacción con la emisividad de las ventanas

Es evidente que estos dos factores no guardan una relación directa, por lo que no debe existir una interacción importante entre ellos; simplemente se trata de observar que al considerar vidrios de baja emisividad, la envolvente ligera vuelve a mostrar ligeramente mejores resultados.

### Interacción con la ventilación nocturna

El uso de la ventilación nocturna, como se menciona en el primer capítulo, es una de las estrategias de diseño que, en combinación con envolventes de gran masa térmica, ayudan a lograr condiciones de confort al interior de edificios ubicados en zonas cálidas. No obstante, en la gráfica de la Figura 4.14 se observa que la ventilación ayudar a disminuir el consumo también con la envolvente ligera.

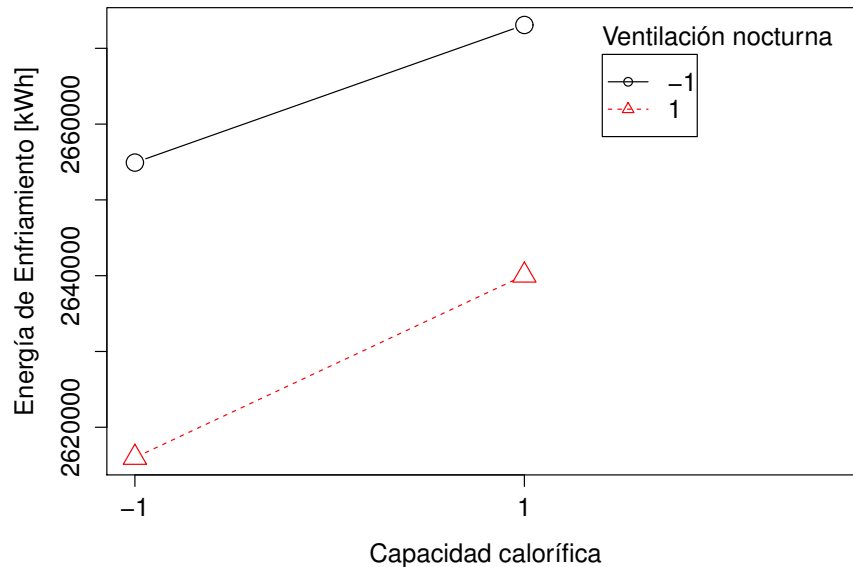


**Figura 4.13:** *Interacción entre la capacidad calorífica y la emisividad de las ventanas.*

De hecho es claro que se logra reducir más el consumo de climatización si se impone la ventilación nocturna. Por otra parte, brindar la renovación de aire por medios mecánicos acarrea, necesariamente, un aumento en el consumo energético total. Este dilema abre nuevamente la puerta a la búsqueda de una solución al diseño de la ventilación del edificio.

### **Interacción con la operación del HVAC**

El horario de operación del equipo de climatización es uno de los factores de mayor importancia, por lo que no se espera que tenga interacciones significativas con ningún otro factor. En este sentido y como se observa en la gráfica de la Figura 4.15, no existe una diferencia significativa entre seleccionar una u otra envolvente, en términos de esta interacción solamente.

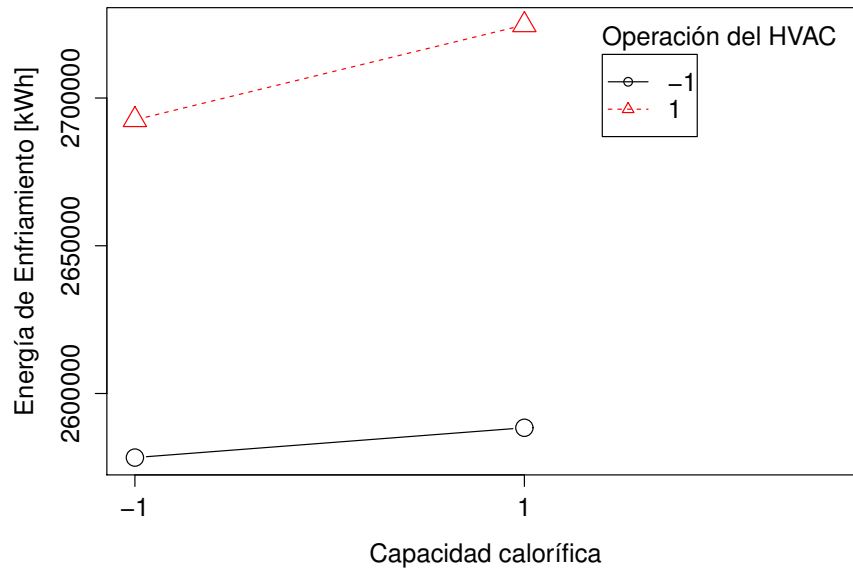


**Figura 4.14:** Interacción entre la capacidad calorífica y la ventilación nocturna.

### Interacción con la infiltración

En la gráfica de la Figura 4.16 se muestra un comportamiento no lineal en el intervalo de estos factores; los resultados de este tipo normalmente requieren conducir pruebas hacia el interior del intervalo para identificar la naturaleza de ese comportamiento. Sin embargo, se debe recordar que el nivel inferior usado para este factor, i.e. la ausencia de infiltraciones en un edificio, es prácticamente imposible, además de ser una situación no deseada. Por otro lado, en las zonas del modelo donde no se define ningún tipo de renovación de aire, generalmente se obtendrán temperaturas y humedades inusualmente altas.

Como se menciona en la documentación de EnergyPlus [54], se pueden tener problemas de convergencia en algunas zonas durante el período de arranque previo a la simulación. Esta problemática puede no afectar los resultados para períodos largos de simulación, i.e. simulaciones anuales; no así para las simulaciones cortas, ya que la solución puede no estabilizarse y arrojar resultados inadecuados que pueden llevar a



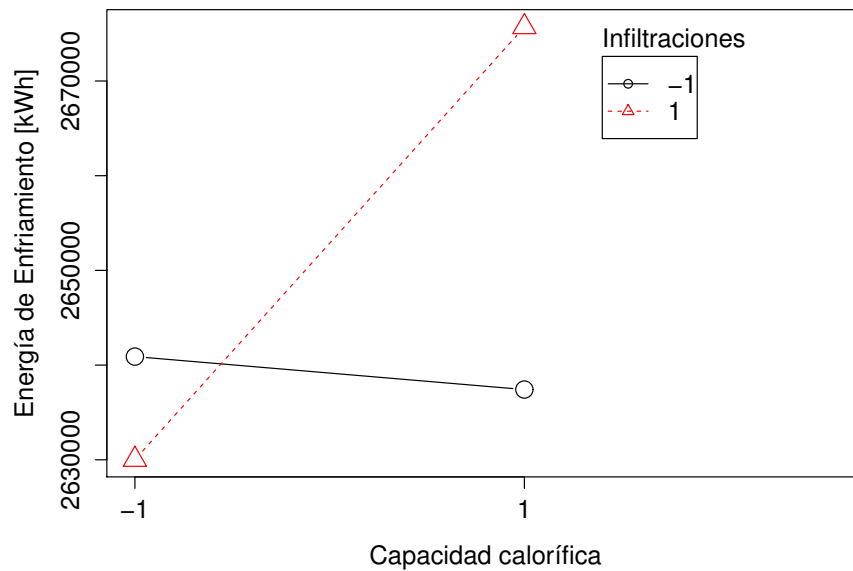
**Figura 4.15:** Interacción entre la capacidad calorífica y la operación del equipo de climatización.

un sobre-dimensionamiento de la capacidad de climatización.

### Interacción con la temperatura interior

El control de la temperatura interior ha sido identificado como el factor más importante, y efectivamente no muestra interacciones significativas con ningún otro factor. La gráfica de la Figura 4.17 termina de mostrar las interacciones de la capacidad calorífica con los demás factores. Del lado derecho, cuando la temperatura se lleva a los 24°C, no es posible apreciar una diferencia entre una u otra envolvente.

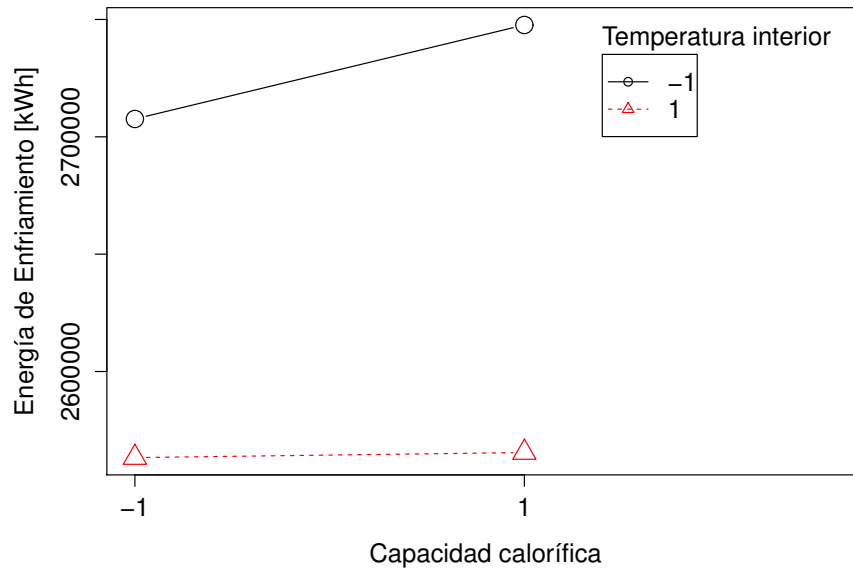
Tras la evaluación de estos resultados ha surgido una contradicción, por una parte la mejor respuesta fue alcanzada con la envolvente pesada, mientras que el análisis gráfico muestra a la envolvente ligera como una opción que reduce el consumo. Para resolver esta situación, se procede a filtrar los resultados tomando como criterios de selección los niveles que han probado ser adecuados para reducir el consumo. La gráfica de la Figura 4.18 presenta los casos filtrados; adicionalmente se incluyen un



**Figura 4.16:** *Interacción entre la capacidad calorífica y la infiltración.*

par de respuestas calculadas mediante el modelo lineal. Los casos adicionales sirven para dos propósitos: primero, destacar una respuesta obtenida mediante el modelo lineal, para un arreglo de factores idéntico al de la simulación 42. Y segundo, el caso marcado con la envolvente pesada y el horario de climatización largo.

Considerando el horario de climatización más amplio y comparando ambas envolventes, siendo el caso 60 el de la envolvente ligera contra el caso de la envolvente pesada, se observa que la envolvente ligera tiene un consumo menor. El caso número 42, muestra el menor consumo de todos los casos debido a que tiene asociado un horario de operación más corto, y no porque la envolvente pesada combinada con la ventilación mecánica pueda dar mejores resultados. Tras este análisis, se hace posible emitir una recomendación hacia el uso de la envolvente ligera. Esta opción no depende de la ventilación nocturna, lo que significa un potencial ahorro en la inversión inicial así como en posibles costos operativos y de mantenimiento. Además, se puede alcanzar un consumo aún menor mediante el control del horario de climatización.



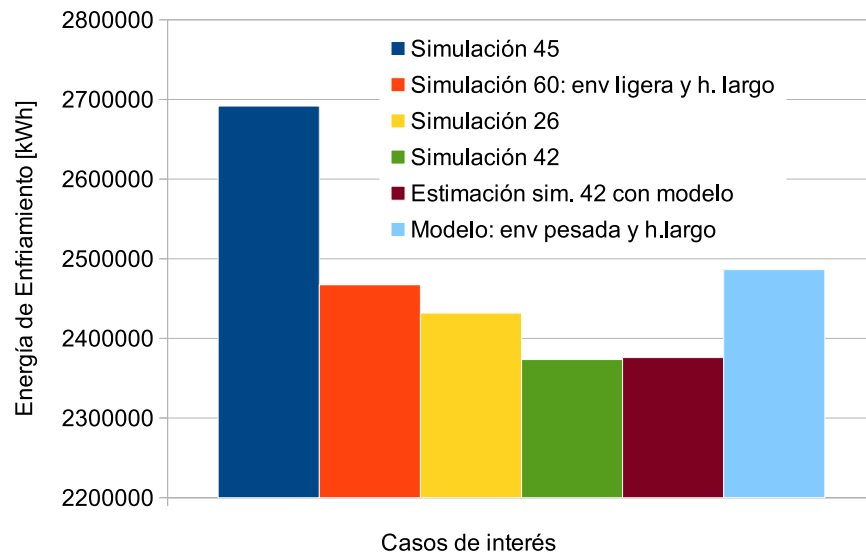
**Figura 4.17:** Interacción entre la capacidad calorífica y la temperatura interior.

## 4.2. Análisis térmico

Una vez que se ha determinado la configuración de factores adecuada, se procede a mostrar gráficas de temperatura, humedad y consumo de energía en el edificio. Puesto que el edificio estudiado está compuesto de muchas zonas térmicas, solamente se presenta la temperatura y humedad relativa para una sola zona, no obstante, las demás zonas tienen un comportamiento similar en virtud de que esas fueron las condiciones impuestas en la simulación.

La Figura 4.19 muestra claramente el horario y la temperatura a los que opera el equipo de climatización del modelo. En la Figura 4.20 se puede observar la humedad relativa del aire interior para la misma zona. Estas gráficas pueden ser generadas para cada zona y usualmente son útiles cuando se busca analizar el desempeño específico en

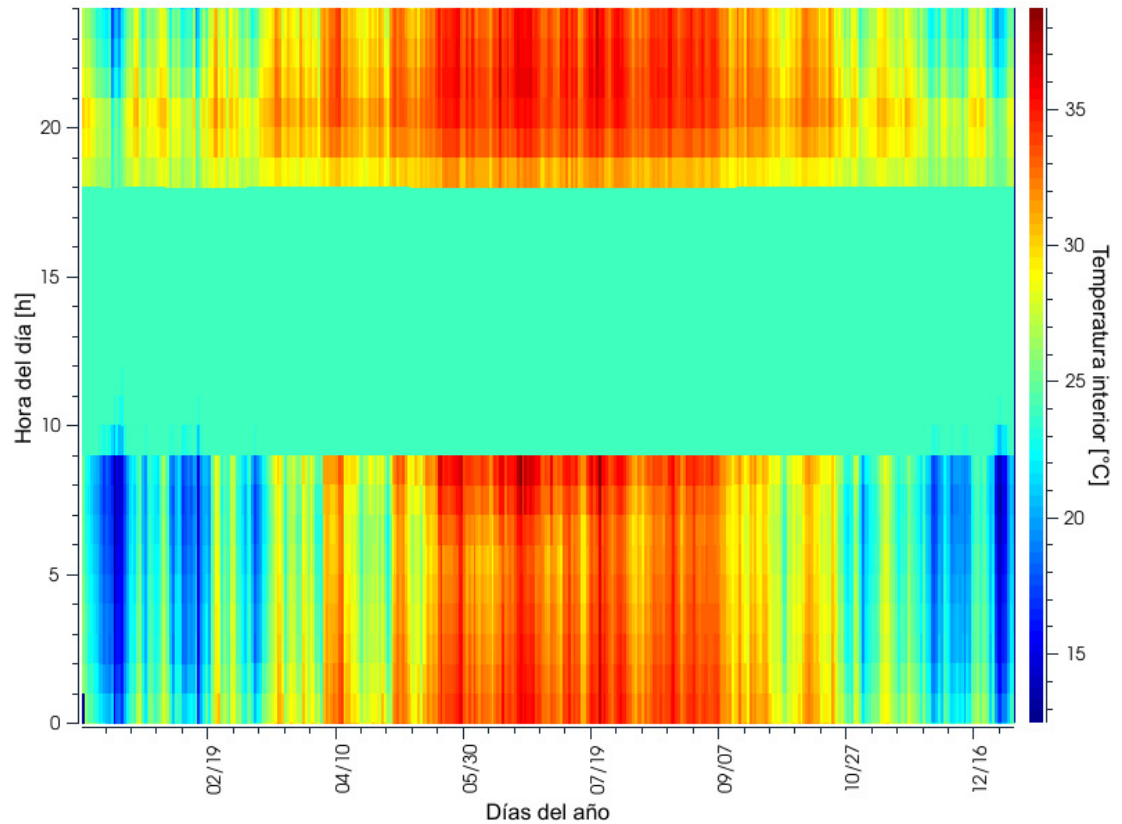




**Figura 4.18:** *Casos de interés y respuestas calculadas con el modelo lineal.*

cada zona. Por ello, este tipo de análisis puede ser realizado en etapas posteriores del proyecto; en etapas cuando se busque calibrar la simulación sobre el comportamiento detallado del edificio, e.g. horarios de operación distintos para diferentes días, perfiles de funcionamiento del equipo de climatización, representación detallada del sistema de enfriamiento, entre otros. Por ahora, es suficiente mostrar cómo fueron representadas en las simulaciones realizadas y poder mostrar las condiciones establecidas para este estudio.

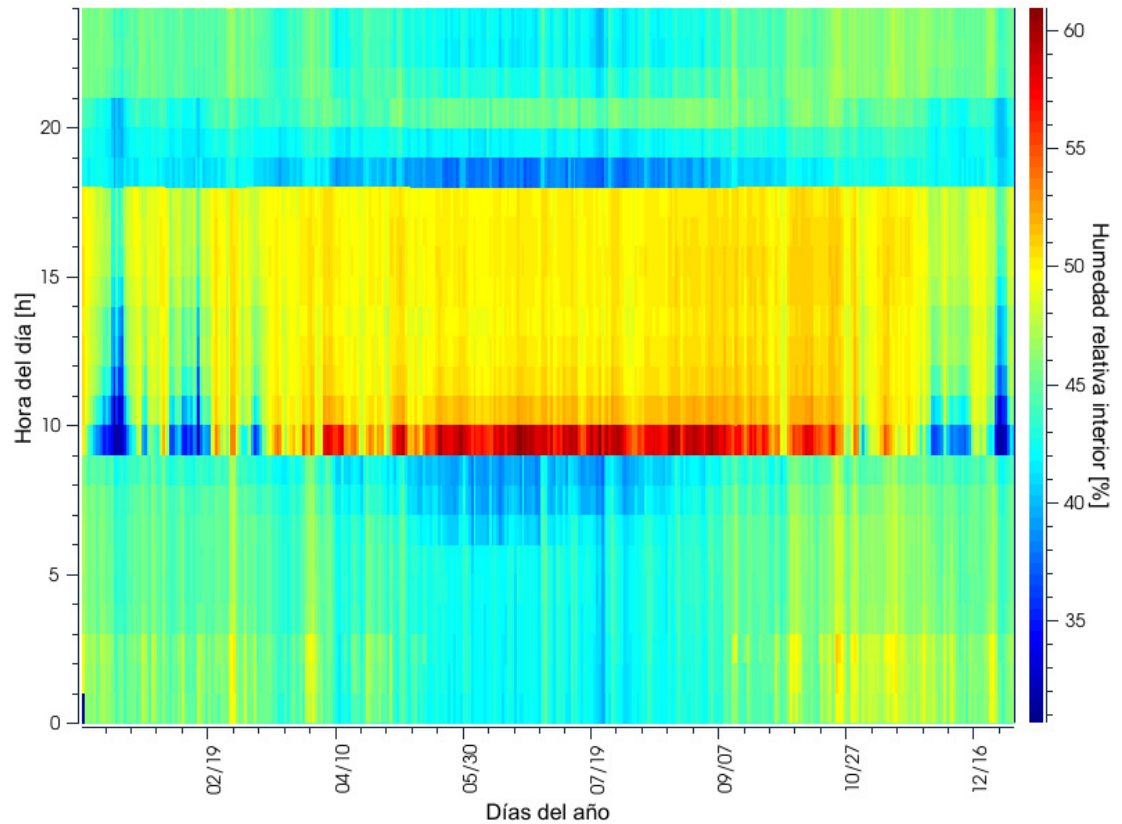
La gráfica de temperatura del aire interior demuestra el horario de control de la temperatura así como el valor al cuál se fija el control. Fuera de este horario no se impone control alguno, i.e. no opera el sistema de climatización. En lo que respecta a la gráfica de humedad relativa del aire interior, se puede apreciar que durante las horas en las que no hay ocupación del inmueble se mantienen condiciones de entre 40 y 60% de humedad relativa en el aire, lo cual es adecuado. Los valores más extremos de humedad relativa se presentan justo al inicio del período de ocupación, que coincide con el inicio del horario de climatización. Posteriormente, la humedad relativa disminuye y



**Figura 4.19:** *Temperatura del aire interior para una zona del edificio.*

se mantiene prácticamente constante para el resto del horario de operación. Para los meses de menor temperatura, se observa que la tendencia es a la baja, mientras que en el resto del año la humedad relativa aumenta. En ambos casos se percibe que la humedad relativa de la zona, es dependiente de la temperatura, lo cuál está expresado en el balance de masa de la zona A.4.

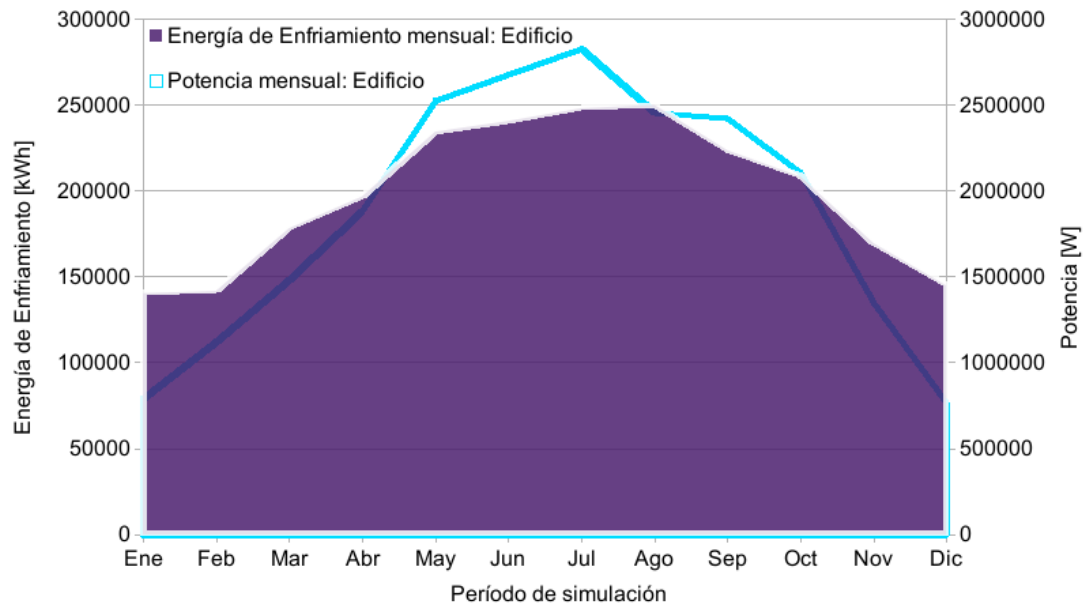
En este momento es importante recordar que la simulación computacional de edificios es una herramienta que ayuda a obtener un panorama de referencia, y que el criterio del analista es la principal habilidad que le debe de asistir al conducir un estudio. La discusión del párrafo anterior es, sobre todo, producto de las condiciones de simulación y de la capacidad de los modelos para representar la realidad. Es evidente que los patrones de operación de un edificio difícilmente son constantes o lineales, e.g la ocupación del edificio no se presenta súbitamente al 100 %, ni los equipos tienen



**Figura 4.20:** *Humedad relativa en el aire interior para una zona del edificio.*

una respuesta inmediata. Y aunque es posible realizar simulaciones más detalladas, lo primero que se debe de considerar es el criterio profesional.

Finalmente se presentan las gráficas de las Figuras 4.21 y 4.22, donde se muestra el consumo de energía mensual y el balance de calor del edificio, respectivamente. A diferencia de las gráficas anteriores, que solo consideraban una zona, éstas últimas son para todo el edificio. La gráfica del consumo mensual de energía también muestra la potencia mensual. En esta gráfica, se puede apreciar que durante los meses calurosos se eleva el consumo de energía por climatización. Además, para estos mismos meses se incrementa la potencia requerida para climatizar el edificio. Este tipo de gráficas resultan útiles para realizar comparativas entre distintos diseños, así como para calibrar las simulaciones con edificios ya existentes de los cuales se tengan registros históricos de estas variables, e.g. recibos de consumo eléctrico o datos adquiridos

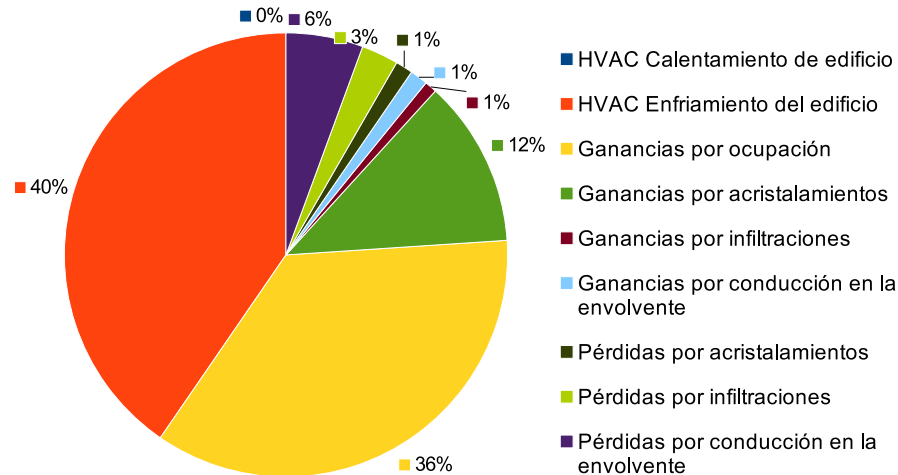


**Figura 4.21:** Consumo energético y potencia mensual para el edificio.

mediante auditorías energéticas del inmueble.

La gráfica de la Figura 4.22 muestra el balance de calor para todo el edificio, desglosado de tal forma que se pueda observar cómo está integrado el desempeño térmico de la envolvente, la ocupación y el sistema ideal de climatización.

Se observa que el aspecto más relevante de la envolvente son los acristalamientos, en específico, las ganancias por radiación solar. Esto sugiere buscar algún tipo de elemento de sombreado para obtener un mejor rendimiento energético. Por otra parte, el intercambio de calor por conducción en la envolvente es mayor cuando el edificio pierde calor, i.e. cuando la temperatura al interior es mayor que en el exterior. Esto último, junto con la poca necesidad de calefacción en el edificio durante meses de bajas temperaturas, sirve para considerar que la envolvente del edificio cumple cabalmente con el objetivo de ofrecer una reducción en el consumo de energía.



**Figura 4.22:** Desglose del balance de calor en el edificio.

En este capítulo se presentaron los resultados obtenidos en el estudio, se mostró como la metodología sirvió para identificar el efecto de la inercia térmica de la envolvente sobre la climatización del edificio. De acuerdo a los resultados se mostró que la inercia térmica, evaluada dentro de un intervalo viable en términos de materiales de construcción disponibles y económicamente competitivos, no influye de forma importante en la climatización del inmueble. De hecho existen otros factores que deben ser cuidados al diseñar y operar un edificio, factores que pueden ofrecer mejoras superiores en la reducción del consumo de energía.

En el siguiente y último capítulo, se plasman las conclusiones desprendidas a lo largo del estudio, así como algunas recomendaciones sobre trabajos futuros que pueden ofrecer un panorama más claro acerca de los alcances que se pueden lograr mediante el uso de las herramientas computacionales en el modelado energético de edificios.

## Capítulo 5

---

# Conclusiones

---

En este trabajo se mostró que existe una creciente tendencia a mejorar el desempeño térmico de los edificios en el mundo y en México. El estudio se centró en determinar que factores tienen más impacto en el consumo energético por climatización, mediante la simulación computacional de edificios. Se desatacó la importancia de representar la naturaleza dinámica de los fenómenos físicos que rigen la carga de climatización para mejorar las estimaciones, tanto del diseño como de la operación de los sistemas. El análisis fue realizado sobre solo una edificación y para determinados factores; sin embargo, la misma metodología puede ser empleada para evaluar integralmente otros aspectos en el desempeño energético del edificio, así como en otros edificios, ya que no es posible generalizar debido a la gran diversidad de diseños arquitectónicos de edificios.

Otro de los principales aspectos que se destacó, fue la importancia de que este tipo de estudios deben realizarse desde las primeras etapas del proyecto de diseño del edificio, puesto que es en este momento cuando se pueden identificar, oportunamente, los puntos fuertes o débiles del diseño que al final definirán el desempeño energético del inmueble.

Se consiguió el objetivo principal de la tesis, ya que la validez de la hipótesis planteada

fue puesta a prueba y el resultado mostró que en el caso de este edificio, bajo las condiciones de operación propuestas, no es conveniente la construcción de la envolvente de este edificio con materiales masivos, desde la perspectiva térmica, y aunque el uso de ventilación nocturna puede ayudar a reducir el consumo energético, se debe analizar detalladamente si el costo de instalar y operar este sistema podría ser justificado, o bien, buscar una alternativa mediante algún diseño de ventilación natural. A la luz de esta información, se hizo posible dar una recomendación sobre el diseño de forma objetiva.

Los resultados obtenidos para este edificio fueron consistentes con otros estudios donde se señala que la posición del aislamiento, ubicada hacia el interior puede reducir el consumo energético cuando la climatización sigue un funcionamiento periódico. También se identificó la importancia de mantener un control sobre el ajuste de la temperatura, y se mostró que una reducción de dos grados centígrados por debajo de un nivel aceptable ( $24^{\circ}\text{C}$ ) lleva a un aumento dramático en el consumo energético. Por lo que se debe de buscar que el usuario no incurra en prácticas que den lugar a este tipo de reducción en el ajuste de la temperatura. De esta forma, se amplía la participación sobre cómo deben ser operados los edificios cuando se busca reducir el consumo energético.

La implementación de una metodología estadística fue fundamental para poder dar objetividad al trabajo, y aunque el uso de las herramientas estadísticas en este trabajo fue modesto, resultó suficiente para apreciar la importancia que tiene el diseño y análisis de experimentos tanto en áreas industriales como en la investigación científica. Por lo anterior, se considera recomendable continuar el aprendizaje y la aplicación del análisis estadístico en los trabajos que a futuro se desarrollen.

Se debe de resaltar la importancia que tiene crear el modelo para EnergyPlus, ya que dicho modelo puede ser modificado y continuar evaluando aspectos del diseño. Inclusive es posible avanzar hacia la evaluación detallada del sistema de climatización

y sus componentes. El modelo geométrico también puede servir para realizar estudios de iluminación con luz natural (luz de día) y de ser necesario evaluar los patrones de flujo de aire desde el exterior hacia el interior, e.g. estrategias de ventilación natural mediante dinámica de fluidos computacional. Dentro de este apartado, cabe destacar que desde hace algún tiempo y a escala global, se han hecho esfuerzos por desarrollar un estándar que permita la inter-operabilidad entre los distintos programas de CAD y los programas de administración de la información en edificios BIM (*Building Information Management*), El estándar se conoce como gbXML y es un formato de archivo que integra una gran cantidad de información sobre el edificio, e.g. instalaciones eléctricas, tuberías, inventario de equipos instalados, entre otros. Mediante este formato, profesionales de distintas disciplinas, desde el diseño, construcción y operación de los inmuebles, podrán acceder oportunamente a la información disponible de los edificios.

## 5.1. Trabajos futuros

Una vez alcanzado el objetivo de dar una recomendación inicial al diseño, quedan disponibles otros aspectos que deben irse cubriendo en las siguientes etapas de los proyectos. Por ejemplo, se determinó el tipo de envolvente que ofrece un mejor rendimiento, así como la importancia de una operación adecuada del inmueble, en este sentido, aún quedaría pendiente establecer cuál será el tipo de sistema mecánico que brindará la climatización al edificio y saber cómo se comporta tal sistema. O bien, quizá sea posible considerar alternativas que tengan menos impacto energético, tales como los sistemas geotérmicos o sistemas de enfriamiento radiante, para que brinden la climatización necesaria al edificio. Aún más, se podría evaluar la viabilidad de realizar una integración entre distintos sistemas del edificio, de tal forma que la energía o el agua excedente en algún sistema pueda ser aprovechada por otra aplicación o servicio.

Considerando un enfoque distinto, se pudo apreciar que para la elaboración de este



trabajo se utilizaron distintas herramientas, i.e. cálculo, diseño, estadística y elaboración de gráficos. Y aunque cada una tiene su respectiva curva de aprendizaje, el proceso para realizar este tipo de evaluaciones se vuelve más rápido en la medida que se incrementa la frecuencia de uso. Además, las herramientas empleadas son distribuidas abiertamente, lo que favorece en gran medida la viabilidad para llevar a cabo este tipo de trabajos. En contraste, el alto costo de las licencias para algunos programas, es un factor de declinación cuando se pone a consideración la opción de realizar evaluaciones como la presentada en este trabajo. Por ello, y efectivamente, el continuo desarrollo de programas de código abierto es el factor determinante que ha hecho posible que esa limitante sea cada vez menor. El crecimiento de la industria de la construcción en la dirección del ahorro energético, vuelve atractivo el incursionar activamente en el desarrollo y la extensión de las herramientas computacionales que marcan esta diferencia.

Desde una perspectiva práctica y si bien la simulación computacional es una herramienta de alto valor, la naturaleza dinámica de los fenómenos térmicos que afectan a los edificios es, pocas veces, completamente representada por los modelos que ocupan los programas de simulación. Esto dicta que se deben realizar pruebas experimentales sobre los elementos constructivos y preferentemente sobre las edificaciones mismas. Estas pruebas deben cumplir cabalmente con las condiciones reales de operación. Por esta razón, se debe de tener conocimiento de las técnicas experimentales y de medida, que mejor se ajusten a dichas condiciones. Además, es crucial el manejo de la instrumentación y los equipos de control fundamentales para representar adecuadamente los fenómenos de estudio en instalaciones experimentales.

La generación, uso y aprovechamiento de la energía son y serán áreas de primordial importancia en los próximos años, la oportunidad económica que representa es evidente. La investigación y el desarrollo de tecnología, desde la academia, el gobierno y la industria, debe enfocarse en resolver los problemas que se presenten en estas áreas. Aunque la inversión económica necesaria sea elevada, parece ser que el

principal desafío a vencer es formar personas que tengan conocimientos altamente especializados y la disposición a estar desarrollando, continuamente, nuevas habilidades.

---

# Bibliografía

---

- [1] Energyplus v7.1 reference data set: moisture materials data set.
- [2] Energyplus v7.1 reference data set: windows glass materials data set.
- [3] <http://apps1.eere.energy.gov/buildings/energyplus/>.
- [4] <http://meteonorm.com/>.
- [5] <http://sag01.iie.org.mx/eolicosolar/Default.aspx>.
- [6] [http://tech.groups.yahoo.com/group/EnergyPlus\\_Support/](http://tech.groups.yahoo.com/group/EnergyPlus_Support/).
- [7] <http://www.blender.org/>.
- [8] [http://www.cfe.gob.mx/ConoceCFE/1\\_AcercadeCFE/Estadisticas/Paginas/Generacion.aspx](http://www.cfe.gob.mx/ConoceCFE/1_AcercadeCFE/Estadisticas/Paginas/Generacion.aspx).
- [9] <http://www.energy-design-tools.aud.ucla.edu/>.
- [10] <http://www.iea.org>.
- [11] <http://www.ods-engineering.com/ODS-Studio/>.
- [12] <http://www.openfoam.org/>.
- [13] <http://www.python.org/>.
- [14] <http://www.radiance-online.org/>.
- [15] <http://www.sketchup.com/>.

- [16] M. V. Swami A.A. Kerestecioglu and A. A. Kamel. Theoretical and computational investigation of simultaneous heat and moisture transfer in buildings : Effective penetration depth theory. *ASHRAE Trans.* 96, 1989.
- [17] International Energy Agency. Technology roadmap. energy-efficient buildings: Heating and cooling equipment. Technical report, OECD/IEA, 2011.
- [18] Sami A. Al-Sanea and M.F. Zedan. Improving thermal performance of building walls by optimizing insulation layer distribution and thickness for same thermal mass. *Applied Energy*, 88(9):3113 – 3124, 2011.
- [19] Sami A. Al-Sanea, M.F. Zedan, and S.N. Al-Hussain. Effect of thermal mass on performance of insulated building walls and the concept of energy savings potential. *Applied Energy*, 89(1):430 – 442, 2012. Special issue on Thermal Energy Management in the Process Industries.
- [20] American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers, Inc., 1791 Tullie Circle, N.E. Atlanta, GA 30329. *Advanced energy design guide for small warehouses and self-storage buildings*, 2008.
- [21] American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers, Inc., 1791 Tullie Circle, N.E. Atlanta, GA 30329. *Advanced energy design guide for highway lodging*, 2009.
- [22] American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers, Inc., 1791 Tullie Circle, N.E. Atlanta, GA 30329. *Advanced energy design guide for K-12 school buildings*, 2011.
- [23] American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers, Inc., 1791 Tullie Circle, N.E. Atlanta, GA 30329. *Advanced energy design guide for medium to big box retail buildings*, 2011.
- [24] American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers, Inc., 1791 Tullie Circle, N.E. Atlanta, GA 30329. *Advanced energy design guide for small to medium office buildings*, 2011.

- [25] American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers, Inc., 1791 Tullie Circle, N.E. Atlanta, GA 30329. *Advanced energy design guide for large hospitals*, 2012.
- [26] H. Asan. Numerical computation of time lags and decrement factors for different building materials. *Building and Environment*, 41(5):615 – 620, 2006.
- [27] H. Asan and Y.S. Sancaktar. Effects of wall's thermophysical properties on time lag and decrement factor. *Energy and Buildings*, 28(2):159 – 166, 1998.
- [28] Niccolò Aste, Adriana Angelotti, and Michela Buzzetti. The influence of the external walls thermal inertia on the energy performance of well insulated buildings. *Energy and Buildings*, 41(11):1181 – 1187, 2009.
- [29] CCA. Edificación sustentable en américa del norte. Technical report, Comisión para la Cooperación Ambiental, 393, rue St-Jacques Ouest, bureau 200 Montreal (Quebec), Canadá, H2Y 1N9, 2008.
- [30] Fadi Chlela, Ahmad Husaunndee, Christian Inard, and Peter Riederer. A new methodology for the design of low energy buildings. *Energy and Buildings*, 41(9):982 – 990, 2009.
- [31] CIBSE. *Environmental Design. Guide A*. Chartered Institute of Building Services, United Kingdom.
- [32] J. Clarke. *Energy Simulation in Building Design*. Taylor & Francis, 2012.
- [33] D. B. Crawley, J. W. Hand, M. Kummert, and B. T. Griffith. Contrasting the capabilities of building energy performance simulation programs. *Building and Environment*, 43(4):661–673, 2008.
- [34] Odón de Buen R. Greenhouse gas emission baselines and reduction potentials from buildings in mexico. Technical report, UNEP, 2009.
- [35] Odón de Buen; Stephen Selkowitz; Martin Adelaar. Documento de referencia uno - escenarios energéticos de la edificación sustentable para 2030. Technical report, Comisión para la Cooperación Ambiental, 393, rue St-Jacques Ouest, bureau 200 Montreal (Quebec), Canadá, H2Y 1N9, 2008.

- [36] Secretaria de Energía. Boletín de prensa 082.2011, 2011.
- [37] P. O. Fanger. *Thermal comfort*. McGraw Hill, 1972.
- [38] Sila Filffi. *Optimisation batiment/systeme pour minimiser les consommations dues a la climatisation*. PhD thesis, Mines Paris, 2006.
- [39] J. Fox. The r commander: A basic statistics graphical user interface to r. *Journal of Statistical Software*, 14(9):1–42, 2005.
- [40] J. Fox. Extending the r commander by 'plug in' packages. *R News*, 7(3):46–52, 2007.
- [41] C.P. Underwood F.W.H. Yik. *Modelling Methods for Energy in Buildings*. Blackwell, 2004.
- [42] Baruch Givoni. *Man, climate and architecture*. Elsevier, 1969.
- [43] Baruch Givoni. *Climate considerations in building and urban design*. John Wiley & Sons, Inc., 1998.
- [44] Ulrike Grömping. Tutorial for designing experiments using the r package rcmdrplugin.doe. *Reports in Mathematics, Physics and Chemistry, Beuth Hochschule Für Technik Berlin*, April 2011.
- [45] Ceylan H.T. and Myers G.T. Long-time solutions to heat conduction transients with time-dependent inputs. *ASME Journal of Heat Transfer*, 102(1), 1980.
- [46] George E. P. Box; J. Stuart Hunter; William G. Hunter. *Estadística para investigadores: Diseño, innovación y descubrimiento*. Reverte, 2008.
- [47] International Energy Agency, Aalborg, Denmark. *Ventilation of Large Spaces in Buildings, Analysis and Prediction Techniques*, 1998.
- [48] Hartwig M. Künzle. *Simultaneous Heat and Moisture Transport in Building Components*. Verlag, 1995.
- [49] Lazaros Elias Mavromatidis, Mohamed EL Mankibi, Pierre Michel, and Mat Santamouris. Numerical estimation of time lags and decrement factors for wall complexes including multilayer thermal insulation, in two different climatic zones. *Applied Energy*, 92(0):480 – 491, 2012.

- [50] Lazaros Elias Mavromatidis, Pierre Michel, Mohamed Mankibi, and Mat Santamouris. Study on transient heat transfer through multilayer thermal insulation: Numerical analysis and experimental investigation. *Building Simulation*, 3:279–294, 2010.
- [51] METEOTEST. *Meteonorm Version 6 Handbook*. Fabrikstrasse 14, CH-3012 Bern, Switzerland, Swiss Federal Office of Energy, CH-3003 Bern,, 2010.
- [52] Douglas C. Montgomery. *Design and analysis of experiments*. John Wiley and Sons Inc., 2001.
- [53] Kerestecioglu A.; Swami M.; Dabir R.; Razzaq N.; and Fairey. Theoretical and computational investigation of algorithms for simultaneous heat and moisture transport in buildings. *FSEC-CR-191-88*, 1988.
- [54] The Board of Trustees of the University of Illinois and the Regents of the University of California through the Ernest Orlando Lawrence Berkeley National Laboratory. *Engineering Reference*. EnergyPlus, October 2011.
- [55] The Board of Trustees of the University of Illinois and the Regents of the University of California through the Ernest Orlando Lawrence Berkeley National Laboratory. *Input Output Reference*. EnergyPlus, October 2011.
- [56] Victor Olgyay. *Arquitectura y clima*. Gustavo Gili, 1998.
- [57] Kunze Ouyang and Fariborz Haghighat. A procedure for calculating thermal response factors of multi-layer walls-state space method. *Building and Environment*, 26(2):173 – 177, 1991.
- [58] Meral Ozel. Thermal performance and optimum insulation thickness of building walls with different structure materials. *Applied Thermal Engineering*, 31(17-18):3854 – 3863, 2011. 2010 Special Issue.
- [59] R. Parsons. *Fundamentals: 2005 Ashrae Handbook : SI & IP Editions*. ASHRAE, 2005.
- [60] Louis A. Pipes. Matrix analysis of heat transfer problems. *Journal of the Franklin Institute*, 263(3):195 – 206, 1957.
- [61] R Core Team. *R: A Language and Environment for Statistical Computing*. R Foundation for Statistical Computing, Vienna, Austria, 2012. ISBN 3-900051-07-0.

- [62] Suzi Camey Renan Cortes, Isaias Prestes. Rcmdr 'plug-in' based on qcc package. *RcmdrPlugin.qcc*, 2009.
- [63] John R. Howell Robert Siegel. *Thermal Radiation Heat Transfer*. Taylor & Francis, 4 edition, 2002.
- [64] Kottek; Grieser; Beck; Rudolf; Rubel. World map of the köppen-geiger climate classification updated. *Meteorologische Zeitschrift*, 15(3), 2006.
- [65] J.E. Seem. *Modeling of Heat Transfer in Buildings*. PhD thesis, University of Wisconsin, Madison, WI, 1987.



# Apéndice

## Apéndice A

---

# Descripción de EnergyPlus

---

EnergyPlus [3], surge de la combinación de dos programas antecesores: el DOE y el BLAST, cuyo desarrollo viene desde la década de los 80's. El Departamento de Energía de los Estados Unidos, es responsable de su desarrollo y lo proporciona al público en general sin costo alguno. Los usuarios con interés en modificar o expandir las capacidades del programa pueden adquirir el código fuente, con costo, junto con el compromiso de que cualquier adición al código se integre al mismo en futuras emisiones. En la documentación que acompaña al programa, se brindan las referencias correspondientes al funcionamiento y las características de los modelos que emplea.

El programa utiliza una solución en series de tiempo, el Factor de Respuesta, ecuación A.1; el cuál, asocia el flujo de calor en una superficie, con una serie infinita del historial de temperaturas tanto de la superficie externa como de la interna.

$$q_e'' = \sum_{j=0}^{\infty} X_j T_{e,t-j\delta} - \sum_{j=0}^{\infty} Y_j T_{i,t-j\delta} \quad (\text{A.1})$$

Dado que la serie infinita vuelve prohibitiva la solución exacta, los desarrolladores optaron por emplear una solución mediante Funciones de Transferencia de Conducción (CTF's), ecuación A.2, lo cuál simplifica en buena medida el esfuerzo computacional,

ya que sólo se deben calcular los coeficientes CTF una sola vez para cada elemento constructivo.

$$q_e'' = -Y_0 T_{i,t} - \sum_{j=1}^{nz} Y_j T_{i,t-j\delta} + X_0 T_{e,t} + \sum_{j=1}^{nz} X_j T_{e,t-j\delta} + \sum_{j=1}^{nq} \Phi_j q_{e,t-j\delta}'' \quad (\text{A.2})$$

El cálculo de las CTF's se hace mediante el método de espacio de estados, Ceylan y Myers [45], Seem [65], Ouyang y Haghghat [57]. La descripción y una discusión sobre las ventajas de éste sobre otros métodos, se encuentra en la guía de referencia de EnergyPlus [54].

Además, para el cálculo de la temperatura y de la humedad del aire, EnergyPlus realiza un balance de energía, ecuación A.3, y un balance de masa, ecuación A.4, para cada zona que tenga el edificio.

$$\begin{aligned} \rho C_p \frac{dT_z}{dt} = & \sum_{i=1}^{N_{sup}} h_i A_i (T_{si} - T_z) + \sum_{i=1}^{N_{zonas}} \dot{m}_i C_p (T_{zi} - T_z) + \sum_{i=1}^{N_{cp}} \dot{Q}_i \\ & + \dot{m}_{inf} C_p (T_{ext} - T_z) + \dot{Q}_{sis} \end{aligned} \quad (\text{A.3})$$

En la ecuación A.3, el término del lado izquierdo considera la energía almacenada en el aire de la zona, el primer término del lado derecho considera el intercambio de calor entre el aire y las superficies, el segundo término es el intercambio entre el aire de diferentes zonas, el tercer término considera las cargas programadas, el cuarto término toma en cuenta las infiltraciones y el último término es la carga del sistema de aire acondicionado.

$$\begin{aligned} \rho V_z C_W \frac{dW_z}{dt} = & \sum_{i=1}^{N_{sup}} A_i h_{mi} \rho (W_{sup} - W_z^t) + \sum_{i=1}^{N_{zonas}} \dot{m}_i (W_{zi} - W_z^t) + \sum_{i=1}^{N_{cp}} \dot{m}_i \\ & + \dot{m}_{inf} (W_{ext} - W_z^t) + \dot{m}_{sis} (W_{sum} - W_z^t) \end{aligned} \quad (\text{A.4})$$

De manera análoga al balance de energía, EnergyPlus hace el balance de masa en las zonas, dónde el término del lado izquierdo en la ecuación A.4 es la humedad almacenada en el aire de la zona, el primer término de lado derecho es el intercambio de humedad entre el aire y las superficies, el segundo término considera el intercambio de humedad entre zonas, el tercer término son las cargas programadas, el cuarto término considera las infiltraciones y el último término considera la humedad que suministra el sistema de aire acondicionado.

El programa puede ser utilizado para representar sistemas completos, e.g. sistemas conformados por compresores, evaporadores, ventiladores, deshumidificadores, etc. También pueden incluirse controles más específicos para monitorear y limitar la demanda de energía, lo que es útil para diseñar estrategias de operación y así evitar consumos en horarios cuando el costo de la energía es más elevado.

Las capacidades de EnergyPlus y los beneficios que ofrece al diseño de edificios son muy grandes, sin embargo la falta de una interfaz gráfica propia hace que su uso sea reducido. Y aunque existen algunos programas que brindan la interfaz para crear la geometría, e.g. SketchUp [15], generalmente no es posible definir todos los parámetros dentro de esas herramientas, lo que se hace necesario que los usuarios tengan experiencia directa con los archivos de entrada.

## Apéndice B

---

# Descripción de Blender

---

Blender [7] es un programa de diseño y animación 3D multi-plataforma de código abierto y distribución gratuita que puede instalarse en FreeBSD, Linux, Windows y Mac OS. Su interfaz gráfica funciona mediante OpenGL, esto le permite trabajar con diseños complejos y renderizar imágenes de alta calidad. La forma de dibujar es distinta a lo que se acostumbra emplear en programas de CAD; no obstante, las capacidades de modelado en Blender son bastante potentes una vez que se aprende a usarlo, además es posible ocultar y mostrar capas donde se tienen distintas partes del modelo, lo que ayuda a mantener un orden al trabajar con modelos muy grandes.

Otra característica importante es que Blender es un programa bastante ligero, tanto en tamaño de instalación como al momento de trabajar en el área de modelado. Esto ayuda a que pueda ejecutarse en equipos de cómputo personales, siempre y cuando la tarjeta de gráficos cumpla con las especificaciones de OpenGL.

Las capacidades de Blender pueden ser ampliadas mediante scripts escritos en Python y ya que los elementos de la interfaz gráfica son accesibles de la misma forma, los complementos creados tienen una integración completa dentro de Blender.

## Apéndice C

---

# Descripción de ODS-Studio

---

ODS-Studio [11] es un complemento para el programa Blender [7] que permite integrar tres herramientas de gran utilidad para el diseño y evaluación energética de edificios: la simulación energética de edificios mediante EnergyPlus, la capacidad de analizar el flujo de aire al interior y exterior de los edificios con dinámica de fluidos computacional mediante OpenFoam [12] y realizar análisis de iluminación mediante Radiance [14]. Todos los anteriores son programas computacionales que se distribuyen gratuitamente y son de código abierto. Los módulos básicos de ODS-Studio pueden ser descargados desde la página web <http://www.ods-engineering.com/> mediante un registro previo. La herramienta esta aún en desarrollo por lo que sus capacidades están en crecimiento.

Blender cuenta con una consola Python [13] de forma interna, esto permite ejecutar scripts elaborados en este lenguaje para expandir el programa o agilizar la definición de algunos parámetros de forma automática. En la página de ODS Engineering se muestran algunos vídeos donde se realizan ejemplos de estas funciones. Una de las principales motivaciones para el desarrollo de ODS-Studio, es brindar la oportunidad de realizar estudios especializados en edificaciones, puesto que muchas veces estos no se realizan, principalmente debido al alto costo que significa tener una licencia por cada programa que realice alguna de las funciones que se mencionan arriba.

## Apéndice D

---

# Descripción de Meteonorm 6

---

Los datos climáticos necesarios para realizar una simulación en EnergyPlus pueden ser obtenidos por medio de Meteonorm [4], el cuál es un programa computacional comercial creado para generar los datos climáticos mediante interpolaciones entre datos climáticos de estaciones meteorológicas y estimaciones estadísticas. Si bien es preferible que los datos climáticos sean obtenidos a partir de datos reales y promediados en largos períodos de tiempo, muchas veces esto no es posible y la siguiente mejor alternativa es usar datos generados de la forma que lo hace Meteonorm. En el manual de uso de Meteonorm [51], se presentan las bases sobre las cuales se realizan los cálculos, de tal manera que los usuarios puedan juzgar sobre la validez de los datos. Una forma de poder comparar los datos climáticos generados es confrontarlos contra los datos disponibles del Sistema Meteorológico Nacional. Puesto que los datos de radiación solar se calculan mediante ecuaciones solares basadas en la posición geográfica, también es posible comparar estos datos con mapas de radiación solar para la República Mexicana, como los presentados en la página del Instituto de Investigaciones Eléctricas [5].

Los archivos de salida pueden ser generados directamente en el formato necesario para EnergyPlus, o bien, como simples archivos de texto para posteriormente crear archivos de datos personalizados.

## Apéndice E

---

# Descripción de R y Rcmdr

---

El sistema R [61] integra, entre otras cosas, un lenguaje de programación y funciones para la elaboración de gráficos. Gracias a la contribución de muchas personas continúa extendiendo sus capacidades. R se distribuye de manera gratuita bajo la Licencia Pública General GNU. R es un lenguaje no compilado y se ejecuta desde la terminal o línea de comandos; consiste de una colección de paquetes que sirven funciones específicas. La extensa documentación que lo acompaña facilita el uso y el aprovechamiento de sus capacidades. Dentro de las ventajas de R se resalta el hecho de que puede ser utilizado tanto por usuarios sin mucha experiencia en programación que sólo buscan utilizar las funciones disponibles, e.g. el autor de este trabajo; o bien, por aquellos usuarios que deseen implementar sus propias funciones para sacar mayor provecho de las capacidades de R.

### **Rcmdr**

Rcmdr [39] es un paquete de R que permite trabajar desde una interfaz gráfica. Dentro de Rcmdr existen distintos complementos [40] que han sido creados para satisfacer necesidades específicas. En este trabajo se emplearon los complementos para análisis y diseño de experimentos RcmdrPlugin.DoE [44] y para control de calidad RcmdrPlugin.qcc [62].



## Apéndice F

---

## Salidas de comandos en R

---

```

Rcmdr> summary( DoE.01 , brief = TRUE)
Call:
FrF2(nruns = NULL, nfactores = 8, blocks = 1, alias.block.2fis = FALSE,
     ncenter = 0, hard = NULL, generators = NULL, design = "8-2.1",
     replications = 1, repeat.only = FALSE, randomize = TRUE,
     seed = 27968, factor.names = list(Capacidad.calorifica = c(-1,
     1), Posicion.aislamiento = c(-1, 1), Emisividad.ventanas = c(-1,
     1), Ventilacion.nocturna = c(-1, 1), Operacion.HVAC = c(-1,
     1), Infiltraciones = c(-1, 1), Valor.U.cristales = c(-1,
     1), Temperatura.interior = c(-1, 1)), select.catlg = catlg)

Experimental design of type FrF2
64 runs

Factor settings (scale ends):
  Capacidad.calorifica Posicion.aislamiento Emisividad.ventanas
1                      -1                    -1                    -1
2                      1                     1                     1
  Ventilacion.nocturna Operacion.HVAC Infiltraciones Valor.U.cristales
1                      -1                    -1                    -1
2                      1                     1                     1
  Temperatura.interior
1                      -1
2                      1

Design generating information:
$legend
[1] A=Capacidad.calorifica B=Posicion.aislamiento C=Emisividad.ventanas
[4] D=Ventilacion.nocturna E=Operacion.HVAC F=Infiltraciones
[7] G=Valor.U.cristales H=Temperatura.interior

$generators
[1] G=ABCD H=ABEF

Alias structure:
[[1]]
[1] no aliasing among main effects and 2fis

```

**Figura F.1:** Salida en R del resumen para el diseño factorial empleado.

Residuals:

Min 1Q Median 3Q Max  
 -21420.3 -7034.2 265.6 5950.3 22223.7

	Estimate	Std. Error	t value	Pr(> t )
(Intercept)	2646010.22	1775.63	1490.178	< 2e-16 ***
Capacidad.calorifica	10551.03	1775.63	5.942	2.46e-06 ***
Posicion.aislamiento	62756	1775.63	35.343	< 2e-16 ***
Emisividad.ventanas	17956.28	1775.63	10.113	1.12e-10 ***
Ventilacion.nocturna	-17990.66	1775.63	-10.132	1.07e-10 ***
Operacion.HVAC	62655.61	1775.63	35.286	< 2e-16 ***
Infiltraciones	6852.46	1775.63	3.859	0.000642 ***
Valor.U.cristales	-36107.15	1775.63	-20.335	< 2e-16 ***
Temperatura.interior	-81615.81	1775.63	-45.964	< 2e-16 ***
Capacidad.calorifica:Posicion.aislamiento	6724.31	1775.63	3.787	0.000775 ***
Capacidad.calorifica:Emisividad.ventanas	-2521.41	1775.63	-1.42	0.167051
Capacidad.calorifica:Ventilacion.nocturna	1471.65	1775.63	0.829	0.414483
Capacidad.calorifica:Operacion.HVAC	5506.66	1775.63	3.101	0.004476 **
Capacidad.calorifica:Infiltraciones	12290.39	1775.63	6.922	1.94e-07 ***
Capacidad.calorifica:Valor.U.cristales	2403.99	1775.63	1.354	0.187
Capacidad.calorifica:Temperatura.interior	-9476.39	1775.63	-5.337	1.23e-05 ***
Posicion.aislamiento:Emisividad.ventanas	2450.09	1775.63	1.38	0.178957
Posicion.aislamiento:Ventilacion.nocturna	-2882.66	1775.63	-1.623	0.116112
Posicion.aislamiento:Operacion.HVAC	20992.64	1775.63	11.823	3.49e-12 ***
Posicion.aislamiento:Infiltraciones	-7369.63	1775.63	-4.15	0.000297 ***
Posicion.aislamiento:Valor.U.cristales	-1258.94	1775.63	-0.709	0.484395
Posicion.aislamiento:Temperatura.interior	8178.81	1775.63	4.606	8.78e-05 ***
Emisividad.ventanas:Ventilacion.nocturna	-1886.29	1775.63	-1.062	0.2975
Emisividad.ventanas:Operacion.HVAC	3336.62	1775.63	1.879	0.071064 .
Emisividad.ventanas:Infiltraciones	2021.08	1775.63	1.138	0.265023
Emisividad.ventanas:Valor.U.cristales	19099.33	1775.63	10.756	2.90e-11 ***
Emisividad.ventanas:Temperatura.interior	-5233.67	1775.63	-2.947	0.006532 **
Ventilacion.nocturna:Operacion.HVAC	4062.2	1775.63	2.288	0.030209 *
Ventilacion.nocturna:Infiltraciones	10034.15	1775.63	5.651	5.33e-06 ***
Ventilacion.nocturna:Valor.U.cristales	-22.51	1775.63	-0.013	0.989979
Ventilacion.nocturna:Temperatura.interior	-1618.56	1775.63	-0.912	0.370078
Operacion.HVAC:Infiltraciones	20138.44	1775.63	11.342	8.93e-12 ***
Operacion.HVAC:Valor.U.cristales	-3175.23	1775.63	-1.788	0.084969 .
Operacion.HVAC:Temperatura.interior	-9074.52	1775.63	-5.111	2.26e-05 ***
Infiltraciones:Valor.U.cristales	482.23	1775.63	0.272	0.78801
Infiltraciones:Temperatura.interior	-11574.29	1775.63	-6.518	5.46e-07 ***
Valor.U.cristales:Temperatura.interior	4394.88	1775.63	2.475	0.019889 *

Signif. codes: 0 '\*\*\*' 0.001 '\*\*' 0.01 '\*' 0.05 '.' 0.1 ' ' 1

Residual standard error: 14210 on 27 degrees of freedom  
 Multiple R-squared: 0.9955, Adjusted R-squared: 0.9894  
 F-statistic: 165 on 36 and 27 DF, p-value: < 2.2e-16

**Figura F.2:** Modelo lineal general ajustado a las respuestas.

```

Rcmdr> summary(LinearModel.2, cor=FALSE)

Call:
lm.default(formula = Energía.Enfriamiento ~ (Posicion.aislamiento +
  Operacion.HVAC + Valor.U.cristales + Temperatura.interior),
  data = Resultados_DoE.01)

Residuals:
    Min       1Q   Median       3Q      Max
-121261  -37639    3336   39850  102931

Coefficients:
                Estimate Std. Error t value Pr(>|t|)
(Intercept)      2646010     7107 372.299 < 2e-16 ***
Posicion.aislamiento1    62756     7107   8.830 2.20e-12 ***
Operacion.HVAC1         62656     7107   8.816 2.32e-12 ***
Valor.U.cristales1     -36107     7107  -5.080 4.06e-06 ***
Temperatura.interior1  -81616     7107 -11.483 < 2e-16 ***
---
Signif. codes:  0 '***' 0.001 '**' 0.01 '*' 0.05 '.' 0.1 ' ' 1

Residual standard error: 56860 on 59 degrees of freedom
Multiple R-squared:  0.8416, Adjusted R-squared:  0.8308
F-statistic: 78.34 on 4 and 59 DF,  p-value: < 2.2e-16

```

**Figura F.3:** Modelo lineal reducido ajustado a las respuestas.