



UNIVERSIDAD DE CHILE
FACULTAD DE CIENCIAS FÍSICAS Y MATEMÁTICAS
DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA MECÁNICA

**CARACTERIZACIÓN TÉRMICA Y ENERGÉTICA DEL EDIFICIO DEL
MUSEO DE ARTE CONTEMPORÁNEO SEDE QUINTA NORMAL**

MEMORIA PARA OPTAR AL TÍTULO DE INGENIERO CIVIL MECÁNICO

PAULO CÉSAR CONSTANZO ESCOBAR

PROFESORA GUÍA:
MÓNICA ZAMORA ZAPATA

MIEMBROS DE LA COMISIÓN:
REYNALDO CABEZAS CIFUENTES
ÁLVARO VALENCIA MUSALEM

SANTIAGO DE CHILE
2024

CARACTERIZACIÓN TÉRMICA Y ENERGÉTICA DEL EDIFICIO DEL MUSEO DE ARTE CONTEMPORÁNEO SEDE QUINTA NORMAL

Este estudio nace desde la necesidad de conocer qué medidas de eficiencia energética pueden ser aplicadas en un edificio patrimonial construido en épocas pasadas y hacia donde estas deben focalizarse, teniendo en cuenta que la edificación presenta condiciones particulares en su status de museo. El objetivo de este análisis es describir cuantitativamente mediante simulación los consumos energéticos y condiciones térmicas del museo MAC sede Quinta Normal. Para ello hubo un levantamiento de información del edificio, se calcularon los consumos de los artefactos eléctricos y de otras fuentes como las estufas, se simuló computacionalmente las condiciones térmicas del edificio y se proponen mejoras que reduzcan los consumos y entreguen confort térmico en su interior.

El análisis comenzó con una etapa precomputacional donde luego de la recopilación de la información relevante, se procedió a hacer las simplificaciones estructurales, el ordenamiento de los datos y algunos cálculos de apoyo. Posteriormente durante la elaboración y ejecución del modelo se ingresaron valores obtenidos y supuestos necesarios. Se verificó la influencia de variables cuando estas cambian de valor con respecto a los consumos y los balances térmicos.

La simulación principal entregó un consumo total anual de 79,6 $[MWh]_e$, lo que discrepa en solo un 6,24 % con respecto a los consumos facturados. El gasto eléctrico global anualizado se divide en 4 ítems, con la iluminación interior en el primer lugar con un 55,53 %, le sigue el gasto de los artefactos con 17,79 %, luego la calefacción con 16,08 % y en último lugar la iluminación exterior con un 10,59 %. En el balance térmico destacan las pérdidas de calor debido a ventanas e infiltraciones de aire exterior de 154,21 $[MWh]_{th}$ y 134,48 $[MWh]_{th}$ al año respectivamente. La representación del edificio mostró que en su interior mantiene a sus ocupantes en niveles de desconfort debajo del 17,71 % de las horas operativas anuales, apoyado en meses de invierno con el aporte de 14,86 $[MWh]_{th}$ de la calefacción eléctrica y las estufas a gas. Las simulaciones muestran ser sensibles a la tasa de infiltración que impacta de forma directa en el consumo eléctrico por calefacción y al aforo que tiene un efecto menor, observado en las ganancias térmicas de ocupación.

Las medidas recomendadas de eficiencia energética apuntan a reforzar ventanas y rellenar cerramientos para reducir pérdidas por acristalamiento e infiltración respectivamente, y reducir el gasto por iluminación interior reemplazando los tubos fluorescentes por luminaria LED y aprovechando al máximo la luminosidad que entrega el sol hacia adentro y medidas para controlar la excesiva humidificación de recintos como la instalación de equipos móviles y con ello desacelerar el deterioro de las obras. Considerando los valores obtenidos y los supuestos utilizados, se puede afirmar que la aplicación de medidas de eficiencia energética de tipo pasivo es viable sin alterar la estética del edificio.

*Para mi hermana,
para mi mamá y mi papá
y para mis abuelos.*

*Muy cerca de mi ocaso, yo te bendigo, vida,
porque nunca me diste ni esperanza fallida,
ni trabajos injustos, ni pena inmerecida;*

*Porque veo al final de mi rudo camino
que yo fui el arquitecto de mi propio destino.*

En paz, Amado Nervo

*No importa el estadio,
no importa el marcador,
sólo me importa alentar al León.*

Los de Abajo

Agradecimientos

Ante todo y siempre gracias a Dios, siento que creer en Él me hace bien.

La tribu: Lorena, Andrés y Constanza, con quienes comparto, nos reímos, nos aguantamos, nos retamos, pelamos al mundo y por sobretodo nos mantenemos vivos, somos un complemento genial. A mi mamá le agradezco su empuje, su apego a la disciplina, su lealtad al trabajo e incondicionalidad a la familia. De mi papá admiro su temple, su mesura, su amplitud y su positivismo a todo prueba. Mi hermana es lo mejor de la galaxia, tonteamos, hablamos en clave, nos pegamos fuerte y nos queremos caleta con muchas gomitas Flipys.

De mis abuelos: su amor, sus enseñanzas, sus vivencias y la fe; mis tíos por ser diferentes, cada uno en su estilo, con sus formas, tropiezos y virtudes, aprendo de ellos cosas distintas y es muy pulento. A la familia Suárez que me ha cobijado, reservándome un puesto en la mesa familiar.

A mis amigos a lo largo del trayecto: Jorge, Felipe y Álvaro, mientras el mundo siga dando material nos seguiremos riendo. A los cabros de la Terraza y de Mecánica por el apaño, los espacios de distracción y los comentarios que aportaron al desarrollo de esta memoria. Gracias también a compañeros y profesores del Nacional, por seguir hablando las mismas imbecilidades de toda la vida y por no perder el vínculo, respectivamente (?).

Agradecer a la profe Mónica, crack atómica, disposición y paciencia infinitas, un gusto trabajar bajo su conducción. Al profe Reynaldo también por su buena onda, apoyando este trabajo siempre con una vibra tremenda. A la gente del MAC por confiar y colaborar en este trabajo sin condición alguna, Freddy, Marcel, Pamela y Claudia, todos, personas bacanes.

Por último, fuera de los nombres propios, quiero agradecer a los innumerables que me aconsejan, con quienes compartí una mesa o un trago, con quienes me río, a quienes me abren sus mundos personales, aquellos que me desean lo mejor ¡¡ gracias totales !!

Tabla de Contenido

1. Introducción	1
1.1. Motivación	1
1.2. Objetivos	2
1.2.1. Objetivo General	2
1.2.2. Objetivos Específicos	2
1.3. Alcances	2
1.4. Estado del Arte	2
1.4.1. Estudio energético de la casa central de la Universidad de Chile	2
1.4.2. Rehabilitación energética pasiva de casa del s.XIX en el Reino Unido	3
2. Antecedentes	4
2.1. Museos MAC	4
2.1.1. MAC Quinta Normal	4
2.2. Tópicos teóricos varios	7
2.2.1. Calor latente, sensible y total	7
2.2.2. Eficiencia de un equipo	8
2.2.3. Transferencia térmica	8
2.2.3.1. Conducción	8
2.2.3.2. Convección	9
2.2.3.3. Radiación	10
2.2.4. Metabolismo humano	11
2.2.5. Ventilación ambiental	12
2.2.5.1. Infiltración	13
2.3. Equipamiento	14
2.3.1. Artefactos genéricos	14
2.3.2. Luces y focos	15
2.3.2.1. Tipos de luminaria	16
2.3.2.2. Ganancias de iluminación	17
2.4. Parámetros de estudio	18
2.4.1. Confort térmico	18
2.4.1.1. Método de Fanger	19
2.4.1.2. Confort según ASHRAE	20
2.4.1.3. Calidad de aire	21
2.4.2. Eficiencia Energética	22
2.4.3. Iluminación mínima	23
2.4.4. Estándares de conservación de obras	24
2.5. Clima	26

2.5.1.	Radiación solar	26
2.6.	Simulación mediante software	28
2.6.1.	DesignBuilder y EnergyPlus	30
3.	Metodología	32
3.1.	Levantamiento global de información	32
3.1.1.	Planimetría	32
3.1.2.	Inventario de equipos y luminaria	34
3.1.3.	Aforos fijos y visitantes	34
3.1.4.	Cuentas de electricidad y agua	36
3.2.	Cálculos energéticos	38
3.2.1.	Línea base	38
3.2.2.	Casos especiales	40
3.3.	Modelamiento e ingreso de información	41
3.3.1.	Conformación estructural	42
3.3.2.	Puertas, ventanas y techumbre	46
3.3.3.	Ítems de consumo	47
3.3.4.	Zonificación de interiores	49
3.3.5.	Data climatológica	53
3.4.	Simulación por periodos	53
3.5.	Otros parámetros de simulación	54
4.	Resultados	55
4.1.	Simulación principal	55
4.1.1.	Consumo eléctrico	55
4.1.2.	Ganancias térmicas	57
4.1.3.	Balance de calor	58
4.1.4.	Confort interior	59
4.2.	Simulación en periodos reducidos	61
4.2.1.	Resultados por zona	61
4.2.2.	Días específicos	63
4.2.2.1.	13 de julio	63
4.2.2.2.	16 de enero	65
4.3.	Análisis de sensibilidad	67
4.3.1.	Cantidad de visitantes	67
4.3.2.	Tasa de infiltración	68
4.4.	Iluminación Natural	70
5.	Análisis y Discusión	75
5.1.	Recomendaciones de eficiencia energética	77
5.2.	Recomendaciones de deshumidificación	78
6.	Síntesis y Conclusiones	80
6.1.	Trabajo futuro	81
	Bibliografía	82
	Anexos	85

A.	Carta sicrométrica	85
B.	Detalle ecuaciones	86
	B.1. Parámetros de Fanger	86
	B.2. Ecuación para línea base	87
C.	Renderizados	88
D.	Muros y aberturas	91
E.	Tipificación de ventanas	94
F.	Tablas de resultados	96
	F.1. Planilla de cálculo línea base	96
	F.2. Planillas simulación principal	97
	F.2.1. Consumos eléctricos	97
	F.2.2. Cargas térmicas	98
	F.2.3. Balance térmico	99
	F.2.4. Confort Ambiental	100
G.	Gráficos adicionales	101
	G.1. Condiciones ambientales de habitaciones para simulación día	101
	G.2. Consumos eléctricos según tasa de renovación	108
	G.3. Balances térmicos según tasa de renovación	109

Índice de Tablas

2.1.	Cuantificación superficial de las plantas del museo.	6
2.2.	Valores de tasa metabólica para actividades comunes. Adaptado de [6].	12
2.3.	Valores de densidad normalizada para tipos de foco más usuales. Fuente: Software <i>Design Builder</i>	17
2.4.	Ganancias de iluminación según disposición. Fuente: Software <i>Design Builder</i>	17
2.5.	Escala de sensación térmica. [11].	19
2.6.	Recomendación de renovaciones horarias basado en la norma DIN 1946. [12].	22
2.7.	Recomendaciones de iluminancia.[14].	24
3.1.	Inventario de artefactos en el edificio.	34
3.2.	Inventario de focos en el edificio.	34
3.3.	Desglose de ocupantes fijos en el edificio.	35
3.4.	Resumen aforos según caso.	36
3.5.	Resumen consumos 2022 y 2023.	36
3.6.	Distribución de consumos según mes en base a lo entregado por ENEL.	37
3.7.	Resumen de consumo de agua año 2023.	38
3.8.	Consumo en <i>on</i> y factores de uso para los artefactos considerados en el cálculo de la línea base.	39
3.9.	Consumo en <i>on</i> y factores de uso de los distintos focos en el cálculo de la línea base.	39
3.10.	Desglose del cálculo de la línea base.	40
3.11.	Distancias verticales del edificio y sus pisos.	44
3.12.	Resumen de materiales estructurales.	45
3.13.	Resumen propiedades de las puertas del modelo.	46
3.14.	Resumen propiedades de las ventanas del modelo.	46
3.15.	Resumen propiedades de los materiales de cristalería.	47
3.16.	Resumen propiedades de la techumbre.	47
3.17.	Fracciones de energía para cada ítem de consumo.	48
3.18.	Asignación de los equipos a las categorías de consumo de <i>DesignBuilder</i>	48
3.19.	Cuadro resumen de las zonas del museo.	49
3.20.	Cuadro resumen zonificación subterráneo del museo.	50
3.21.	Cuadro resumen zonificación piso 1 del museo.	50
3.22.	Cuadro resumen zonificación piso 2 del museo.	51
3.23.	Densidad de personas según zonificación.	51
3.24.	Valores de iluminancia mínimo para cada recinto según uso.	52
3.25.	Vestimenta y tasa metabólica de los ocupantes.	52
3.26.	Densidades de potencia por ítem y por zona.	53
3.27.	Resumen de consignas de temperatura para ejecutar la simulación.	54

4.1.	Comparación entre los consumos simulados y lo entregado por ENEL en la figura 3.5.	57
4.2.	Signo del flujo de calor según mes del año, + indica ganancia y – fuga/pérdida.	59
4.3.	Condiciones ambientales promedio de las zonas del piso 1 durante julio.	62
4.4.	Condiciones ambientales promedio de las zonas del piso 2 y del subterráneo durante julio.	63
F.1.	Planilla cálculo para los artefactos.	96
F.2.	Planilla cálculo para las luces.	96
F.3.	Planilla consumos eléctricos mensuales.	97
F.4.	Planilla resumen consumos eléctricos.	97
F.5.	Planilla cargas térmicas mensuales.	98
F.6.	Planilla resumen cargas térmicas.	98
F.7.	Planilla balances térmicos mensuales.	99
F.8.	Planilla resumen balances térmicos.	99
F.9.	Planilla condiciones de confort mensuales.	100
F.10.	Planilla resumen condiciones de confort.	100

Índice de Ilustraciones

2.1.	Localización de edificio del MAC sede Quinta Normal en el límite de la comuna de Quinta Normal con Santiago Centro, señalado con un pin rojo. Fuente: Google Maps.	5
2.2.	Vista satelital del edificio del MAC sede Quinta Normal. Fuente: Google Earth.	5
2.3.	Vista oblicua del frontis del MAC. Captura de [3].	6
2.4.	Procesos para un punto cualquiera en la carta sicrométrica [4]	7
2.5.	Representación como resistencias de una configuración de capas 1, 2 y 3. Elaboración propia.	9
2.6.	Perfiles de velocidad y temperatura cuando ocurre convección [5]	9
2.7.	Representación del coeficiente global de transferencia de calor U . Elaboración propia.	10
2.8.	Esquema general de transferencia térmica por radiación entre una superficie y su alrededor [5]	11
2.9.	Sistema genérico de ventilación. Adaptado de [7].	12
2.10.	Relación entre magnitudes con Ω : ángulo sólido del flujo luminoso, $A_L \cos(\epsilon)$: área visible de la fuente que emite el flujo y ρ reflectancia de la superficie. [8].	16
2.11.	Clasificación general de la luminaria. Adaptado de [9].	16
2.12.	Disposiciones de iluminación según la tabla 2.4. Fuente: Software <i>Design Builder</i>	18
2.13.	PPD en función del valor del PMV. Modificado de [11].	19
2.14.	Zona de confort según ASHRAE variando el grado de vestimenta: a la izquierda para 1, 0 <i>clo</i> y la derecha para 0, 5 <i>clo</i> [11].	21
2.15.	Diagrama de flujo que muestra la aplicación de un SGE en el quehacer de la organización. Adaptado de [13].	23
2.16.	Combinaciones de temperatura-humedad relativa que definen zonas de riesgo en la conservación. [16].	24
2.17.	Tiempos de vida contantes para distintos materiales. Modificado de [16].	25
2.18.	Zonas climáticas de Chile según la ASHRAE [17].	26
2.19.	Radiación ultravioleta de onda corta e infrarroja de onda larga en la atmósfera [18].	27
2.20.	Ángulos solares para superficies verticales y horizontales [11].	28
2.21.	Planteo general del método de Balance de Calor para un volumen de control.	29
2.22.	Esquema general del método de Balance de Calor para una pared o cerramiento genérico. Adaptado de [7].	29
2.23.	Organización modular de <i>DesignBuilder</i> con todas sus aplicaciones. Adaptado de [20]	30
3.1.	Plano general del subterráneo. Gentileza: Claudia Vergara, arquitecta encargada MAC.	32
3.2.	Plano general del piso 1. Gentileza: Claudia Vergara, arquitecta encargada MAC.	33

3.3.	Plano general del piso 2. Gentileza: Claudia Vergara, arquitecta encargada MAC.	33
3.4.	Perfil de visitantes y nivel promedio diario según segmento horario y afluencia.	35
3.5.	Consumos registrados por ENEL para los años 2022 y 2023.	36
3.6.	Consumos de agua registrado por Aguas Andinas para el 2023.	37
3.7.	Tipos de componentes estructurales establecidos por <i>DesignBuilder</i> . [20]	42
3.8.	División interna de zonas para el piso 1.	43
3.9.	División interna de zonas para el piso 2.	43
3.10.	División interna de zonas para el subterráneo.	44
3.11.	Entrepisos en achurado, con respecto al contorno del piso 1.	45
3.12.	Vista isométrica computacional del edificio.	47
3.13.	Diagrama de la radiación solar que recibe el edificio según hora del día y mes.	53
4.1.	Consumos eléctricos simulados para cada mes.	55
4.2.	Distribución de consumos para un total anual simulado de 79,6 [MWh].	56
4.3.	Distribución porcentual mensual de consumos simulados.	56
4.4.	Desglose de ganancias anuales por ítem.	57
4.5.	Ganancias totales mensuales.	58
4.6.	Balance térmico por ítem anual.	58
4.7.	Balances térmicos mensuales netos.	59
4.8.	Temperatura operativa y Humedad relativa, ambas promedios mensuales para todo el edificio.	60
4.9.	Parámetros PPD y PMV de Fanger para confort térmico.	60
4.10.	Fracción de tiempo de desconfort para un mes de 328 horas operativas.	61
4.11.	Registro ambiental horario de todo el museo para día de invierno.	64
4.12.	Registro ambiental horario del piso 1 para día de invierno.	64
4.13.	Registro ambiental horario del piso 2 para día de invierno.	64
4.14.	Registro ambiental horario del subterráneo para día de invierno.	65
4.15.	Registro ambiental horario de todo el museo para día de verano.	65
4.16.	Registro ambiental horario del piso 1 para día de verano.	66
4.17.	Registro ambiental horario del piso 2 para día de verano.	66
4.18.	Registro ambiental horario del subterráneo para día de verano.	66
4.19.	Desglose de cargas térmicas por ítem caso afluencia estándar.	67
4.20.	Comparación entre cargas térmicas producidas por el cambio de densidad de ocupación visitante.	68
4.21.	Comparación entre los consumos para tasa de renovación variables.	68
4.22.	Cargas de calefacción totales para tasas de renovación variables.	69
4.23.	Línea de tendencia entre las pérdidas por infiltración y las tasas de renovación.	69
4.24.	Línea de tendencia entre los balances térmicos netos anuales y las tasas de renovación.	70
4.25.	Mapeo de iluminancia promedio natural para el edificio.	71
4.26.	Mapeo de iluminancia promedio para el piso 1.	71
4.27.	Mapeo de iluminancia promedio para el piso 2.	72
4.28.	Detalle grilla de simulación con <i>Radiance</i>	72
4.29.	Mapeo de iluminancia sobre 50 [lux] para el edificio.	73
4.30.	Mapeo de iluminancia sobre 50 [lux] para el piso 1.	73
4.31.	Mapeo de iluminancia sobre 50 [lux] para el piso 2.	74
A.1.	Detalle general de una carta sicrométrica en SI. [22].	85
C.1.	Vista en planta renderizada del edificio modelado.	88

C.2.	Vista oblicua renderizada de la cara posterior edificio.	89
C.3.	Vista oblicua renderizada de la cara frontal del edificio.	89
C.4.	Vista oblicua renderizada desde el terreno hacia el edificio.	90
D.1.	Distribución de muros, aberturas y puertas piso 1.	91
D.2.	Distribución de muros, aberturas y puertas piso 2.	92
D.3.	Distribución de muros, aberturas y puertas subterráneo.	93
E.1.	Tipos de ventanas piso 1.	94
E.2.	Tipos de ventanas piso 2.	95
G.1.	Temperatura y humedad relativa de Bodega 1, piso 1 para día de invierno. . .	101
G.2.	Temperatura y humedad relativa de Bodega 2, piso 1 para día de invierno. . .	101
G.3.	Temperatura y humedad relativa de Documentación, piso 1 para día de invierno.	102
G.4.	Temperatura y humedad relativa de Comodato, piso 1 para día de invierno. . .	102
G.5.	Temperatura y humedad relativa de Conservación, piso 1 para día de invierno.	102
G.6.	Temperatura y humedad relativa de Bodega Administración MAC, piso 1 para día de invierno.	103
G.7.	Temperatura y humedad relativa de Bodega Violeta Parra, piso 1 para día de invierno.	103
G.8.	Temperatura y humedad relativa de Bodega 3, piso 2 para día de invierno. . .	103
G.9.	Temperatura y humedad relativa de Bodega 4, piso 2 para día de invierno. . .	104
G.10.	Temperatura y humedad relativa de Taller Fermín Vivaceta, subterráneo para día de invierno.	104
G.11.	Temperatura y humedad relativa de Bodega 1, piso 1 para día de verano. . . .	104
G.12.	Temperatura y humedad relativa de Bodega 2, piso 1 para día de verano. . . .	105
G.13.	Temperatura y humedad relativa de Documentación, piso 1 para día de verano.	105
G.14.	Temperatura y humedad relativa de Comodato, piso 1 para día de verano. . .	105
G.15.	Temperatura y humedad relativa de Conservación, piso 1 para día de verano. .	106
G.16.	Temperatura y humedad relativa de Bodega Administración MAC, piso 1 para día de verano.	106
G.17.	Temperatura y humedad relativa de Bodega Violeta Parra, piso 1 para día de verano.	106
G.18.	Temperatura y humedad relativa de Bodega 3, piso 2 para día de verano. . . .	107
G.19.	Temperatura y humedad relativa de Bodega 4, piso 2 para día de verano. . . .	107
G.20.	Temperatura y humedad relativa de Taller Fermín Vivaceta, subterráneo para día de verano.	107
G.21.	Consumo eléctrico para 0,5 [ren/hr].	108
G.22.	Consumo eléctrico para 1,25 [ren/hr].	108
G.23.	Consumo eléctrico para 2,75 [ren/hr].	108
G.24.	Consumo eléctrico para 4,25 [ren/hr].	109
G.25.	Consumo eléctrico para 5,0 [ren/hr].	109
G.26.	Balance térmico para 0,5 [ren/hr].	109
G.27.	Balance térmico para 1,25 [ren/hr].	110
G.28.	Balance térmico para 2,75 [ren/hr].	110
G.29.	Balance térmico para 4,25 [ren/hr].	110
G.30.	Balance térmico para 5,0 [ren/hr].	111

Capítulo 1

Introducción

1.1. Motivación

La eficiencia energética se ha posicionado a nivel mundial como una discusión necesaria, empujada por los impactos medioambientales que produce el uso de combustibles fósiles, la disponibilidad limitada de estos para el futuro, la inestabilidad de los mercados y el incremento de los costos. Ante esto, organismos internacionales han fijado objetivos y por consiguiente estrategias para redefinir la obtención y la gestión de la energía.

Una de las líneas de acción apunta a evaluar los consumos de los estamentos productivo, gubernamental y residencial, restringiendo al máximo posible las fugas y los desperdicios energéticos en cualquiera de sus formas con tal de ajustar los gastos a valores más bajos. Muestra de esto es la elaboración y promoción de la norma ISO 50001 que entrega directrices para la eficiencia energética en toda la cadena de suministro, su verificación continua y selección de nuevas tecnologías, entre otros elementos.

Por otro lado, el confort de los espacios es la sensación de que los ocupantes perciben agradable su entorno, condicionado principalmente por la temperatura y la humedad relativa circundante. Resulta evidente afirmar que la inyección o extracción de calor, según las necesidades del contexto puntual, alteran convenientemente aquellos parámetros, por lo cual se debe velar para que haya estabilidad térmica dentro del espacio en cuestión y así no incurrir en consumos de energía innecesarios.

Dentro de las construcciones que presentan ocupación frecuente en la ciudad, están los llamados edificios patrimoniales, estos fueron ideados en épocas donde los compromisos de eficiencia energética actuales no figuraban como estándares constructivos, solamente la estética y la solvencia ante sismos eran las exigencias a satisfacer. Concretamente los museos que generalmente son edificios patrimoniales, presentan el desafío adicional de asegurar condiciones adecuadas para la exhibición de las obras y para los visitantes que frecuentan las exposiciones.

1.2. Objetivos

1.2.1. Objetivo General

Caracterizar mediante simulación las condiciones térmicas y gastos energéticos asociados del museo de Arte Contemporáneo MAC sede Quinta Normal, con el fin de elaborar propuestas para la reducción de consumos.

1.2.2. Objetivos Específicos

- Recopilar antecedentes e información propios del edificio.
- Auditar de manera realista el consumo eléctrico del edificio, añadiendo el consumo de gas en calefacción.
- Simular el comportamiento térmico del edificio a lo largo de un año calendario y en periodos puntuales.
- Proponer mejoras que reduzcan los consumos considerando la conservación del edificio en su carácter patrimonial y su condición de museo para el almacenaje de pinturas, esculturas y representaciones artísticas varias.

1.3. Alcances

A continuación una delimitación general de lo que pretende este trabajo:

- Se representa computacionalmente el edificio de manera gruesa, vale decir, se dejan fuera los detalles ornamentales y geometrías difíciles como escaleras. Se considera que lo esencial son las dimensiones de los espacios internos, su materialidad junto con la presencia y distribución de ventanas y puertas. Se ignoran el entretecho presente por ausencia de información sobre este y los entresijos por ser difíciles de incorporar al modelo y su escasa ocupación. Tampoco se incluye la tabiquería ni los biombos separadores.
- Se recopila la información de los equipos que consumen electricidad y gas en balón, principalmente calefacción, luminaria y computadores y sus correspondientes horarios de utilización. Por otro lado se registra la cantidad de personas que hace uso del edificio tanto personal estable como visitantes.
- Se incorporan elementos complementarios como la vestimenta de los ocupantes, la localización geográfica, historial climático, la apertura de las puertas y ventanas para lograr un análisis más realista.

1.4. Estado del Arte

A continuación se mencionarán un par de trabajos referenciales:

1.4.1. Estudio energético de la casa central de la Universidad de Chile

El antecedente directo de este trabajo es la memoria de Macarena Muñoz [1] alumna del DIMEC Universidad de Chile. Ella simuló los consumos energéticos del edificio de Casa Cen-

tral de la Universidad de Chile en *EnergyPlus*, a partir de la recopilación de la información general que consideró estructura, red de climatización y artefactos eléctricos varios. Casa Central también corresponde a un edificio patrimonial por lo que la metodología es extensible para el estudio en otras construcciones de la misma categoría.

En base a las variaciones climáticas de un año calendario, en su simulación se representaron los 12 meses, diferenciando el comportamiento en los meses de verano e invierno. También realizó simulaciones en meses representativos como Julio con paso de cada una hora, en el cual pudo establecer el día-hora de mayor gasto energético anual.

Casa Central es un edificio en donde hay ocupación frecuente y ocupación flotante variable debido a los eventos, charlas y conferencias que en él se llevan a cabo, por lo cual su trabajo incluyó la caracterización del confort térmico por zonas dentro del edificio, tomando en cuenta que habían sectores acondicionados por la red de climatización y otros que no. Señalar que Muñoz realiza un análisis de sensibilidad en base a la infiltración de aire que puede presentar el edificio, el que repercute en los consumos simulados.

Si bien la diferencia entre lo simulado y lo entregado por las cuentas de la compañía fue de 13,7 % lo hecho por Muñoz sirve como base metodológica para añadir otras variables o liberar restricciones como la apertura de los cerramientos internos, la presencia de iluminación natural que reduce el ítem de alumbrado interno, elementos que en los que este estudio busca adentrarse.

1.4.2. Rehabilitación energética pasiva de casa del s.XIX en el Reino Unido

Este estudio es la evaluación del reacondicionamiento de una casa de la época victoriana [2]. Utilizando *DesignBuilder* se modela la casa, se simula el caso base y posteriormente se le implementan modificaciones estructurales tales como el reemplazo de ventanas por configuraciones de acristalamiento como doble vacío con baja emisividad o paneles de triple vacío junto con aislamiento con planchas de yeso, sellado contra corrientes de aire y sellado de rendijas de puerta.

Luego mediante *EnergyPlus* se recreó la reducción de gasto energético de estas incorporaciones, evaluándolas tanto por separado como combinadas, observando la reducción del volumen de espacio disponible, la disminución de los consumos de combustible y electricidad pero colocando énfasis en indicadores económicos como el ahorro monetario por no gasto, el costo de la adquisición y de la mano de obra y el periodo de retorno de inversión.

Se trata de un análisis cuantitativo de eficiencia energética enfocado exclusivamente en la calefacción, puesto que las condiciones ambientales del lugar son mucho más frías que las de Santiago, los ahorros por ese concepto son notoriamente más significativos que los que se pueden presentar acá.

Capítulo 2

Antecedentes

2.1. Museos MAC

El Museo de Arte Contemporáneo es una institución dependiente de la Universidad de Chile, encargada de la administración de las sedes del Museo. Su propuesta es tener una oferta cultural variada, contingente con la actualidad y dar cabida a expresiones artísticas no convencionales. El Museo se organiza en torno a las exposiciones, las cuales pueden durar entre 2-3 meses cada una, distinguiendo tres tipos de obra:

- Pintura
- Escultura
- Intervención

Esta tercera categoría agrupa la mayor parte de las obras del Museo, puesto que engloba composiciones tan variadas como montajes con artefactos domésticos, proyecciones audiovisuales, composiciones con materiales no convencionales, juegos con los espacios interiores, por mencionar los más llamativos.

Posee dos sedes, Parque Forestal y Quinta Normal, ambas con carácter de edificio patrimonial, lo que les entrega una serie de cuidados de su fachada y terminaciones interiores. Cabe señalar que estos museos además de la exposición, cuentan con depósitos y talleres de restauración para las obras que no están abiertas a público.

2.1.1. MAC Quinta Normal

La sede de Quinta Normal está ubicada en Avda. Matucana 464, dentro del perímetro del Parque Quinta Normal, posee dos pisos, un entretecho y un subterráneo, orientando su frontis hacia el Este, con una ligera desviación de 4 ° con respecto al eje N-S. El terreno circundante está medianamente cubierto por la vegetación y los árboles del parque con una altura ligeramente superior al museo lo cual cubre de sombra al edificio durante una parte del día. Es un edificio aislado por lo cual no presenta interacción térmica conductiva con otras construcciones.

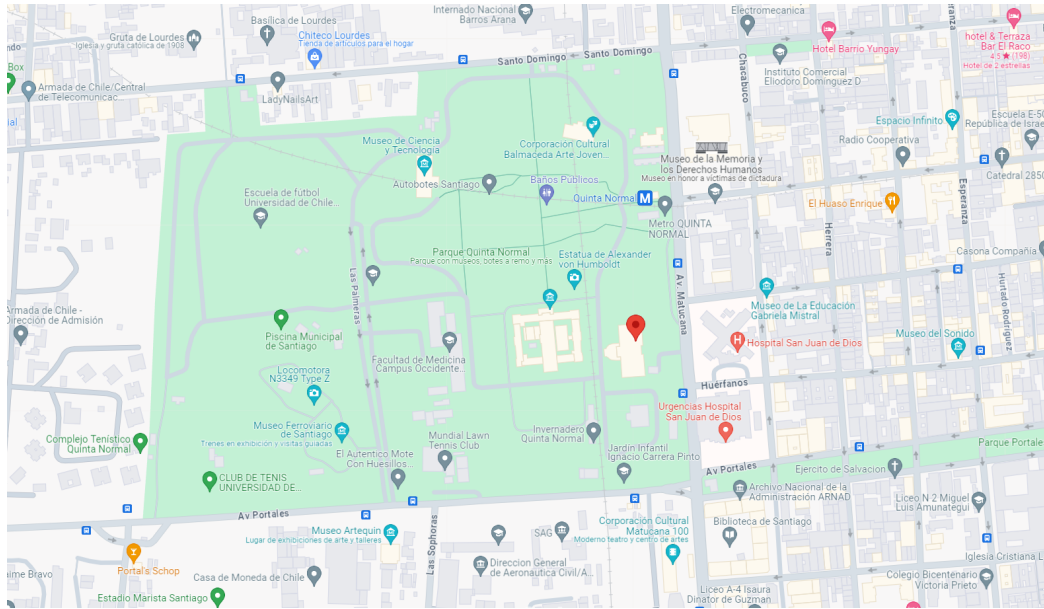


Figura 2.1: Localización de edificio del MAC sede Quinta Normal en el límite de la comuna de Quinta Normal con Santiago Centro, señalado con un pin rojo. Fuente: Google Maps.

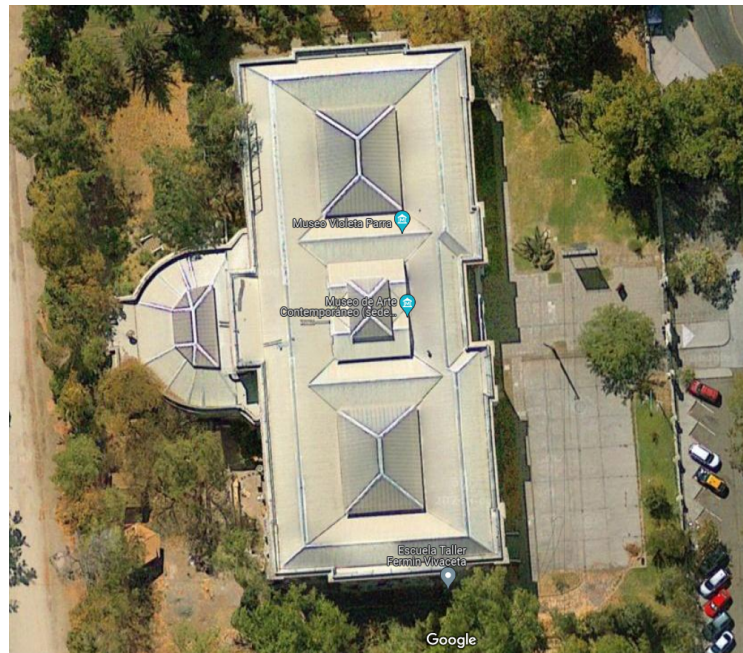


Figura 2.2: Vista satelital del edificio del MAC sede Quinta Normal. Fuente: Google Earth.



Figura 2.3: Vista oblicua del frontis del MAC. Captura de [3].

Construido entre los años 1918 y 1920, de inspiración neoclásica francesa, fue en sus comienzos el Instituto de la Sociedad de Agricultura, en 1934 es transferido a la Facultad de Agronomía de la Universidad de Chile, para luego en el 1975 convertirse en el Consultorio externo del Hospital San Juan de Dios, del cual conserva cañerías y radiadores (hoy en desuso) en sus habitaciones. En el 2005 es asignado al Museo de Arte Contemporáneo, el cual lo acondiciona para ser usado tanto como lugar de exposición como para almacenamiento. Con el pasar del tiempo ha incluido dentro de sus actividades talleres, visitas guiadas y cursos, donde cualquier interesado puede participar aprendiendo pintura y agricultura comunitaria, por mencionar algunas, todo esto llevado a cabo por Educa MAC, organización dependiente de la administración del museo.

Desde el 2020 acoge dentro de sus instalaciones al Museo Violeta Parra, este posee aquí sus oficinas administrativas, un par de bodegas y una sala de exposición propias. También aloja talleres de la Escuela de Artes y Oficios Fermín Vivaceta, institución que capacita en albañilería y carpintería mediante actividades comunitarias e intervención social, esta se realiza en la fachada Oeste exterior, en donde tiene sus equipamiento y bodegas. Cabe señalar que tanto Violeta Parra como Fermín Vivaceta hacen uso de la electricidad registrada en los empalmes del edificio, por lo cual aportan en el consumo global registrado.

La siguiente tabla muestra un resumen de la superficie construida dentro del edificio.

Tabla 2.1: Cuantificación superficial de las plantas del museo.

Planta	Cantidad de zonas	Superficie [m^2]
Piso 1	26	2539,3
Piso 2	15	1756,5
Subterráneo	7	781,1
TOTAL	48	5077,0

Las oficinas administrativas y espacios de ocupación permanente se encuentran en su gran mayoría en el primer piso, aquí las personas disponen de estufas, calefactores eléctricos, cocina, ducha y el correspondiente equipamiento de oficina. Finalmente cabe señalar que el edificio no cuenta con redes de ductería para extracción y renovación mecánica de aire de los

interiores, tampoco con un sistema ramificado HVAC¹.

Los horarios de exposición a público son de Martes a Sábado de 11:00 a 17:30, 11 meses al año descontando febrero. Hay ocasiones donde funciona en horarios especiales como el Día de Los Patrimonios (último fin de semana de mayo) en el cual está abierto el domingo o jornadas extendidas de verano donde cierra a las 20:00 en vez de las 17:30.

2.2. Tópicos teóricos varios

2.2.1. Calor latente, sensible y total

Entre dos puntos 1 y 2 cualesquiera del diagrama psicrométrico existen varios procesos termodinámicos que permiten pasar de uno a otro ya sea directamente o por etapas intermedias. Estos cambios involucran calentamiento, enfriamiento, humidificación, deshumidificación del aire húmedo o combinaciones de estos, como se puede observar en la figura 2.4.

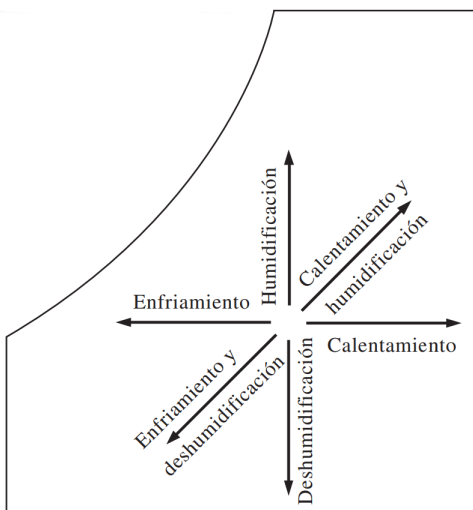


Figura 2.4: Procesos para un punto cualquiera en la carta psicrométrica [4]

Se define como *calor sensible* Q_S como el calor necesario para incrementar o bajar la temperatura de bulbo seco y *calor latente* Q_L como el calor asociado al aumento o disminución de la humedad absoluta para una masa de aire húmedo. En un cambio simultáneo de ambos aparece el *calor total* $Q_T = Q_S + Q_L$ y el *factor de calor sensible* SHR cuya expresión es:

$$SHR = \frac{Q_S}{Q_L + Q_S} = \frac{Q_S}{Q_T} \quad (2.1)$$

Para su cálculo se emplea la convención termodinámica de signos:

- $Q_S > 0$: Calentamiento
- $Q_S < 0$: Enfriamiento
- $Q_L > 0$: Humidificación
- $Q_L < 0$: Deshumidificación

¹ HVAC: De la sigla *Heating, Ventilation and AirConditioning* es todo lo relativo a calefacción, ventilación y aire acondicionado

Cuando el proceso es exclusivamente de enfriamiento o calentamiento (\leftrightarrow) se tiene $SHR = 1$ mientras que si el proceso es de humidificación/deshumidificación (\updownarrow) le corresponde $SHR = 0$.

2.2.2. Eficiencia de un equipo

También llamado rendimiento (η) o coeficiente de performance (COP) según sea el caso, es la razón entre la energía/potencia que se le suministra a un equipo y la útil que este entrega de vuelta. Deben especificarse los tipos de energía tanto en el *input* como en el *output* a la hora de plantear este ratio, ya que dependiendo del funcionamiento o utilidad de la máquina puede ser mecánica, térmica, lumínica, eléctrica o hidráulica, por mencionar las principales. De forma muy general, la eficiencia e de un equipo se expresa así:

$$e = \frac{\text{Output de energía}}{\text{Input de energía}} \quad (2.2)$$

2.2.3. Transferencia térmica

La transferencia térmica es una interacción energética ocasionada por la diferencia de temperatura entre dos volúmenes de control que se detiene cuando esta diferencia se hace cero, se distinguen tres mecanismos:

2.2.3.1. Conducción

Es el modo de transmisión de calor producido por la colisión molecular interna de las partículas de una sustancia en la interfaz con otra sustancia ambas estáticas y su correspondiente colisión molecular interna. En el caso unidimensional, se expresa así:

$$\dot{Q}_x = kA \frac{\Delta T}{\Delta x} = \frac{kA}{L} \cdot \Delta T \ [W] \quad (2.3)$$

Vinculando el flujo de calor a la corriente eléctrica $I \rightarrow \dot{Q}$, la diferencia de voltaje a la diferencia de temperatura $\Delta V \rightarrow \Delta T$, la “resistencia térmica” vendría a ser $\frac{L}{kA} \rightarrow R$ en $[\frac{K}{W}]$. Resulta útil para agrupar resistencias en serie y en paralelo en el caso térmico tal cual como se hace para el análisis eléctrico, realizando los cálculos de manera análoga.

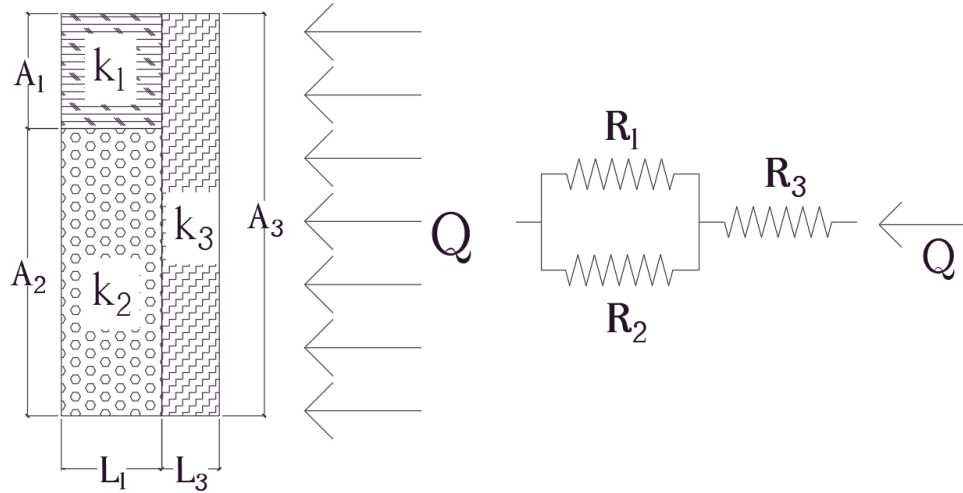


Figura 2.5: Representación como resistencias de una configuración de capas 1, 2 y 3. Elaboración propia.

En un ensamblaje de capas, se presenta el llamado *punte térmico* que es la resistencia térmica en paralelo de menor valor, por donde se fuga la mayor parte del calor. Por ejemplo en la figura 2.5, si $R_2 \ll R_1$ entonces el calor por conducción fluirá mayoritariamente por el material con conductividad k_2 , en lugar de la capa con k_1 . En la práctica ventanas y puertas, junto a sus respectivos marcos, son la muestra de puentes térmicos, los que resultan perjudiciales si lo que se pretende es minimizar los gastos en calefacción, puesto que estos puentes serán atajos donde el calor saldrá de la estructura hacia el exterior vía conducción pasando por alto las otras capas.

2.2.3.2. Convección

Consiste en la transferencia térmica que ocurre entre un sólido y un fluido en contacto cuando éste último está en movimiento.

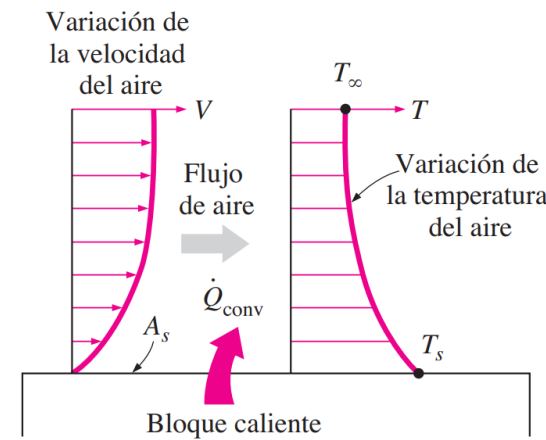


Figura 2.6: Perfiles de velocidad y temperatura cuando ocurre convección [5]

Siguiendo la analogía de las resistencias térmicas, se puede incorporar la presencia de la convección, mediante la resistencia convectiva:

$$\dot{Q} = hA(T_{sup} - T_{\infty}) \quad \longrightarrow \quad R_{conv} = \frac{1}{hA} \left[\frac{K}{W} \right] \quad (2.4)$$

En terminología de construcción, para caracterizar el comportamiento de una pared por concepto de conducción y convección, se menciona el coeficiente global de transferencia de calor U , cuyo caso más sencillo es convección externa-conducción-convección interna (figura 2.7) y con esto se obtiene el flujo térmico que viaja a través del cerramiento dado un ΔT :

$$U = R_{eq}^{-1} = \left(\frac{1}{h_{out}A} + \frac{L}{kA} + \frac{1}{h_{in}A} \right)^{-1} \left[\frac{W}{K} \right] \quad \longrightarrow \quad \dot{Q} = U \cdot \Delta T [W] \quad (2.5)$$

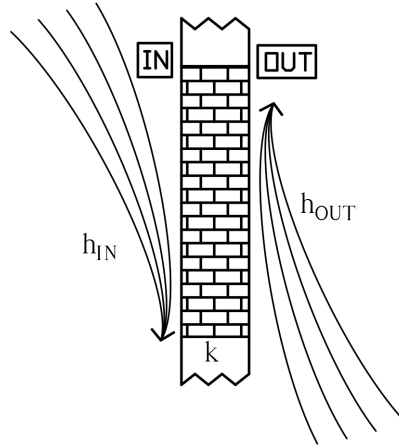


Figura 2.7: Representación del coeficiente global de transferencia de calor U . Elaboración propia.

2.2.3.3. Radiación

Es la energía intercambiada por medio de ondas electromagnéticas entre dos cuerpos a T_1 y T_2 , teniendo cada uno y sus superficies externas emisividades ε y absorptividades α , características. El máximo flujo emitido por un cuerpo a través de radiación es:

$$\dot{Q}_{emit,max} = \sigma \cdot A(T_2^4 - T_1^4) [W] \quad (2.6)$$

donde $\sigma = 5,67 \cdot 10^{-8} \left[\frac{W}{m^2 \cdot K^4} \right]$ y se le conoce la *constante de Stefan-Boltzmann*.

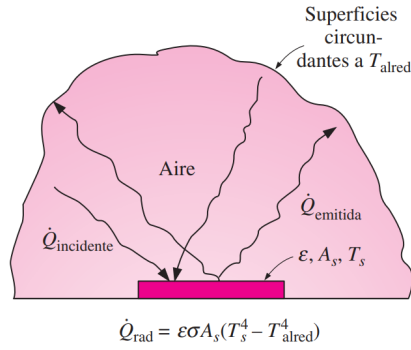


Figura 2.8: Esquema general de transferencia térmica por radiación entre una superficie y su alrededor [5]

Un cuerpo rodeado por un fluido que no interfiere con la radiación, transfiere a su entorno un flujo térmico \dot{Q}_{tot} que se divide en convección y radiación:

$$\begin{aligned}\dot{Q}_{tot} &= \dot{Q}_{conv} + \dot{Q}_{rad} = h_{conv}A(T_{sup} - T_{\infty}) + \varepsilon\sigma A(T_{sup}^4 - T_{\infty}^4) \\ &= h_{combinado}A(T_{sup} - T_{\infty})\end{aligned}\quad (2.7)$$

De esta forma se define el coeficiente combinado de transferencia de calor:

$$h_{combinado} = h_{conv} + h_{rad} = h_{conv} + \varepsilon\sigma(T_{sup} + T_{\infty})(T_{sup}^2 + T_{\infty}^2)\quad (2.8)$$

En situaciones de convección forzada, la radiación es despreciable pero adquiere relevancia cuando se trata de convección natural o bien cuando el fluido que circula, lo hace a bajas velocidades.

2.2.4. Metabolismo humano

La ocupación humana dentro de un recinto implica la generación de calor por parte de las personas. La tasa metabólica es el gasto de energía que posee un individuo estándar con superficie corporal de $1,8 \text{ m}^2$ para el funcionamiento de los procesos corporales internos tales como respiración, circulación sanguínea, actividad cerebral, entre otros. Se mide en $[W/m^2]$ o alternativamente en met con $1 \text{ met}=58,15 \text{ W/m}^2$. Depende fuertemente del tipo de actividad que realiza la persona, como se muestra en la tabla a continuación.

Tabla 2.2: Valores de tasa metabólica para actividades comunes. Adaptado de [6].

ACTIVIDAD		TASA METABÓLICA	
		[W/m ²]	[met]
Reposo	Tendido	46	0,8
	Sentado	58	1
Actividad sedentaria: escuela, universidad, oficina, etc.		70	1,2
Actividad ligera, de pie: de compras, etc.		93	1,6
Actividad media, de pie: cocinar, tareas domésticas, etc.		116	2
Caminata en planicie	0,5 [m/s]	104	1,8
	1 [m/s]	157	2,7
	2 [m/s]	263	4,5
	3 [m/s]	369	6,3

Con esto determinado el aporte térmico de cada uno de los ocupantes de un lugar se contabiliza dentro de las ganancias internas que poseen las habitaciones a estudiar.

2.2.5. Ventilación ambiental

El aire es la solución gaseosa que constituye la atmósfera, que dentro de sus componentes se encuentra el oxígeno, requisito esencial para el desarrollo de la vida terrestre. La ventilación consiste en la inyección de aire exterior limpio a un espacio cerrado para la respiración de los ocupantes y la reducción de contaminantes, diluyendo la concentración de estos a valores tolerables. Los contaminantes más comunes se clasifican en:

- Dióxido de carbono y otros gases
- Partículas suspendidas
- Compuestos orgánicos volátiles

De forma muy general el esquema de ventilación en un sistema HVAC para un espacio cerrado se muestra en la figura 2.9

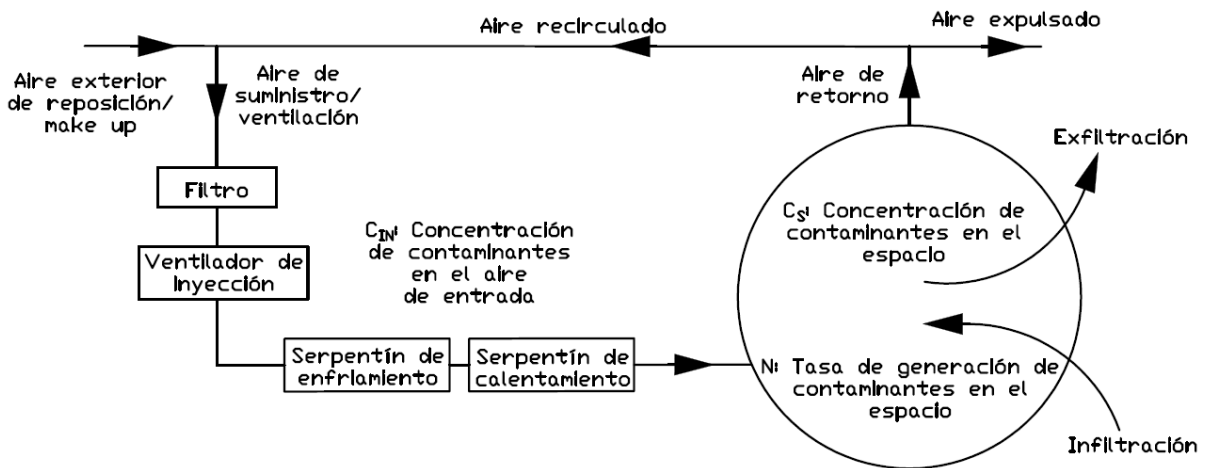


Figura 2.9: Sistema genérico de ventilación. Adaptado de [7].

En un espacio determinado, ilustrado como círculo en la figura anterior, el balance de caudales volumétricos de aire se expresa en la siguiente igualdad:

$$\begin{aligned}\dot{V}_{air} &= \text{Caudal de aire de suministro} + \text{Caudal de infiltración} \\ &= \text{Caudal de aire de retorno} + \text{Caudal de exfiltración}\end{aligned}\quad (2.9)$$

Para ese espacio además, se plantea el balance másico para un contaminante y a partir del que se puede calcular el caudal necesario de aire \dot{V}_{air} para sus ocupantes:

$$\dot{V}_{air}C_{IN} + \dot{N} = \dot{V}_{air}C_S \quad (2.10)$$

Con C_{IN} la concentración de contaminante en el aire de entrada y C_S la concentración de contaminante en el espacio cerrado. Por ejemplo, para el dióxido de carbono que es el contaminante por excelencia, se pueden fijar valores de la siguiente forma: una persona que exhala CO_2 a una tasa de 0,25 [L/min] en la ciudad, cuya concentración en el ambiente está en torno a los 450 ppm (0,045 %). Para un espacio interior, se considera aceptable un nivel de dióxido de carbono por debajo de los 1000 ppm (0,1 %), reuniendo todo esto, el caudal volumétrico mínimo necesario para este caso resulta ser:

$$\dot{V}_{air} = \frac{\dot{N}_{CO_2}}{C_S - C_{IN}} = \frac{0,25[\frac{L}{min}]}{(0,001 - 0,00045) \cdot [\frac{60\ s}{1\ min}]} = 7,6[\frac{L}{s \cdot pers}] = 27,4[\frac{m^3}{hr \cdot pers}] \quad (2.11)$$

Es así como según las particularidades del recinto y de los ocupantes en su interior, se pueden obtener valores de V_{air} apropiados que garanticen el bienestar y correcto ejercicio de las actividades de aquellas personas.

2.2.5.1. Infiltración

En ausencia de un sistema de ductería y ventiladores que mecánicamente inyecten y extraigan aire de los interiores, el balance de aire mostrado en la figura 2.9 y en la ecuación 2.9 se limita solamente a la infiltración y la exfiltración, producto de la apertura de puertas y ventanas y de la cantidad de rendijas y grietas que presente el edificio hacia el exterior. De manera conjunta ambos flujos se denominan infiltración pudiendo ser de origen térmico o bien producidos por gradientes de presión.

Este escape de aire implica una fuga térmica debido a que el aire del exterior, de temperatura menor a la temperatura interior, tiene que calentarse hasta alcanzar el equilibrio térmico. Considerando que no hay diferencias de humedad significativas entre el exterior y el interior (solamente flujo de calor sensible) la potencia de pérdida térmica a causa de la infiltración es:

$$\dot{Q} = \rho \dot{V} c_P (T_{in} - T_{out}) [W] \quad (2.12)$$

donde:

- ρ, c_P : Densidad y capacidad calorífica del aire respectivamente en [kg/m³] y [J/kg°C].
- \dot{V} : Flujo volumétrico del aire de infiltración en [m³/s]

Resulta más conveniente medir este caudal de aire en renovaciones de aire por hora [*ren/hr*], vale decir cuántas veces se recambia el aire contenido en el volumen de espacio por dicha unidad de tiempo. Este valor se conoce como *ACH*².

$$\dot{V} = \frac{(ACH) \cdot V}{3600} \quad (2.13)$$

Siendo *V* el volumen del recinto. Cabe señalar que este estudio no profundizará en la ventilación como objeto de análisis, sino que lo tratará como una covariable que tiene repercusión en la demanda energética.

2.3. Equipamiento

De forma muy general, el equipamiento está conformado por todos aquellos dispositivos que consumen energía, en cualquier de sus formas cotidianas, como electricidad, gas licuado de petróleo (GLP), diésel, parafina, leña o energía solar. Un criterio de ordenamiento es dividir a los equipos según su función:

1. *Equipos de oficina y computación:* cargadores de teléfono, impresoras multifuncionales, monitores, CPUs, notebooks, terminales de fibra, módems.
2. *Equipos de cocina:* microondas, hornos eléctricos, cocinas por inducción, hervidores de agua caliente, refrigeradores, coolers, licuadoras, batidoras, campanas de extracción.
3. *Equipos de proceso estructural y limpieza:* bombas de distribución de agua para baños, ascensores, sistemas de regadío, máquinas de cortar pasto, grupos electrógenos, sistemas de accesibilidad asistida, aspiradoras y trapeadores eléctricos.
4. *Equipos de baño:* secadores de pelo, alisadores y encrespadores de pelo, afeitadoras. Para efectos de análisis se añadirán en esta familia a los termotanques para agua caliente sanitaria (ACS) junto con lavadoras y secadoras de ropa.
5. *Equipos de construcción:* taladros, máquinas de soldar, sierras y esmeriles angulares, serruchos y betoneras eléctricas, motores.
6. *Equipos de climatización y ventilación:* estufas de todo tipo, termoventiladores, ventiladores de pedestal, aire acondicionado portátiles (“pingüinos”).
7. *Equipos de audio y amplificación acústica:* radios, parlantes, mesas controladoras, mixers.
8. *Equipos de iluminación y proyección lumínica.*

2.3.1. Artefactos genéricos

En esta categoría caen la mayoría de los equipos. Su perfil de gasto energético se divide cuando son usados directamente y cuando no, ya que muchos de los artefactos no son enchufados durante el resto del tiempo como cargadores, hervidores, entre otros, existiendo un consumo denominado como “consumo vampiro”.

² ACH:Air Changes per Hour

Para esto se incluye un factor de uso f que relaciona los periodos para *on* y *off*, por ejemplo un refrigerador tiene factor $f = 24$ [horas/día] porque no está apagado en ningún momento. Mientras que un hervidor de agua, que es ocupado unas 8 veces en el día, con 3 minutos en cada ciclo de calentamiento de agua, tendrá:

$$f = \frac{8 \cdot 3 \text{ minutos}}{24 \text{ horas}} = 0,4 \left[\frac{hr}{día} \right] \quad (2.14)$$

Por otro lado, estos artefactos aportan calor al entorno durante su actividad, este flujo térmico se divide en un componente convectivo y otro radiante para los N equipos presentes.

$$\dot{q}_{eq} = \sum_i^N (f_{conv,i} + f_{rad,i}) \dot{C}_{eq,i} \left[\frac{W}{m^2} \right] \quad (2.15)$$

2.3.2. Luces y focos

Los equipos de iluminación se analizan aparte ya que poseen particularidades en su funcionamiento. Como introducción a su estudio, es relevante indicar que el fenómeno físico de la luz involucra las siguientes 4 magnitudes:

- *Flujo luminoso ϕ* : Cuantifica la cantidad de energía en el rango de luz visible emitida por una fuente. Se mide en Lumen [lm].
- *Intensidad luminosa I* : Consiste en en la cantidad de luz irradiada en una dirección en particular teniendo en cuenta que una misma fuente puede tener una distribución espacial variable de intensidad luminosa. Se mide en Candela [cd].
- *Iluminancia E* : Es la cantidad de flujo luminoso que incide sobre una superficie; decrece siguiendo la ley del inverso al cuadrado con respecto a la distancia con la fuente emisora. Los estándares de iluminación se establecen en base valores de esta magnitud. Se mide en Lux [lx].
- *Luminancia L* : También llamado brillo fotométrico, es la intensidad luminosa percibida por el ojo en una superficie considerando el ángulo tridimensional (Ω) que barre el flujo luminoso en su incidencia. Depende de la reflectancia lumínica de la superficie. Se mide en Nit [$nt = cd/m^2$].

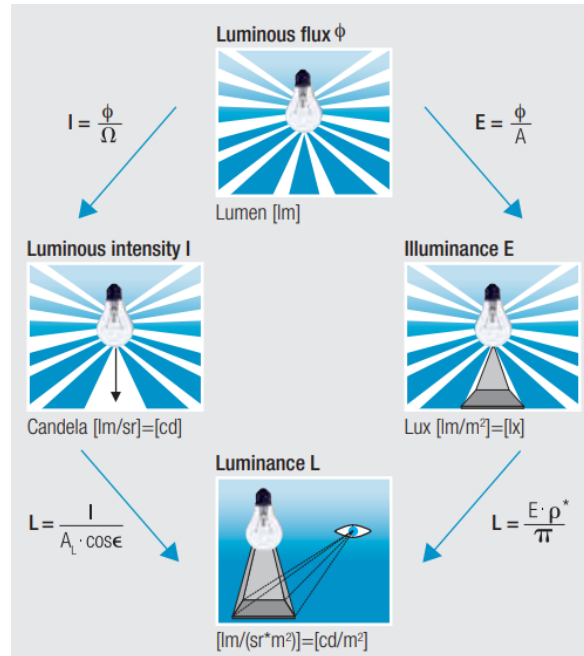


Figura 2.10: Relación entre magnitudes con Ω : ángulo sólido del flujo luminoso, $A_L \cos(\epsilon)$: área visible de la fuente que emite el flujo y ρ reflectancia de la superficie. [8].

2.3.2.1. Tipos de luminaria

De manera general, los focos se clasifican según el mecanismo fisicoquímico con el cual se genera la luminosidad, que a su vez se divide en diferentes tipos de focos, como muestra la figura 2.11

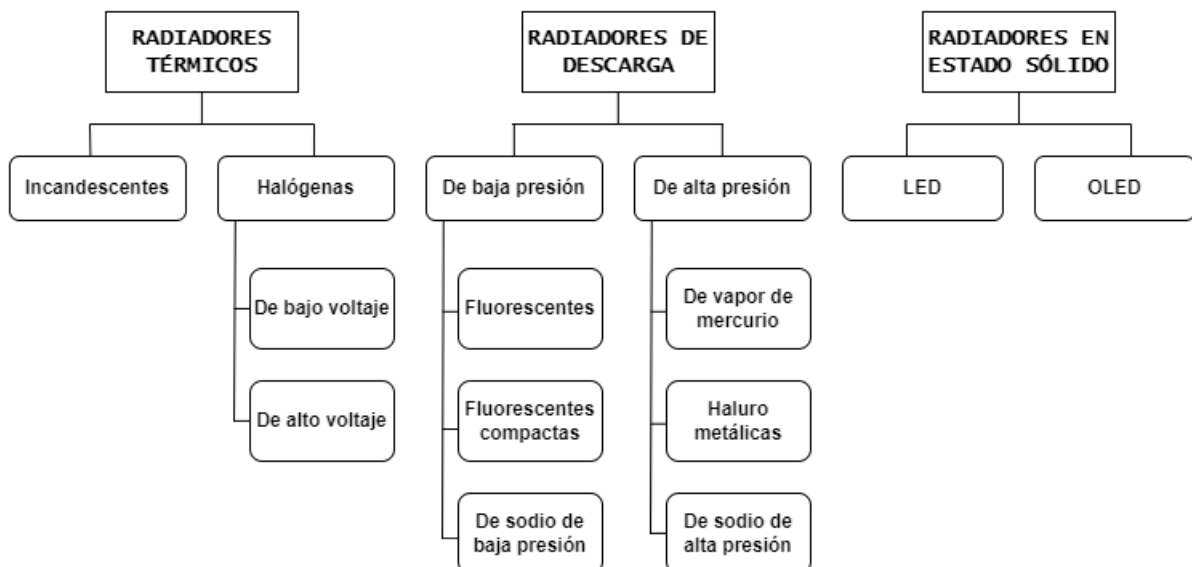


Figura 2.11: Clasificación general de la luminaria. Adaptado de [9].

El NPD³ es un valor característico de cada tipo de foco que muestra la potencia neces-

³ Normalized Power Density

ria para iluminar una superficie proporcionando un determinado nivel de iluminancia. Por ejemplo los LED poseen bajos NPD y las incandescentes, altos. A continuación se muestran algunos valores de densidades de potencia luminosa:

Tabla 2.3: Valores de densidad normalizada para tipos de foco más usuales. Fuente: Software *Design Builder*.

Tecnología del foco	NPD [$W/m^2 \cdot 100 lux$]
LED	2,5
Fluorescente	3,3
Fluorescente compacta	5
Lámpara de tungsteno	28

2.3.2.2. Ganancias de iluminación

No toda la energía que recibe un foco es ocupada para iluminar, este input se fracciona de la siguiente forma:

$$f_{vis} + f_{conv} + f_{rad} + f_{ret} = 1 \quad (2.16)$$

Cada una de estas fracciones no depende del tipo de foco sino de la disposición espacial (ángulo, geometría, distancia con respecto al cielo) de este. A continuación se detalla cada uno de estos factores:

- *Fracción visible* f_{vis} : es la energía efectiva que destina el foco para iluminar.
- *Fracción convectiva* f_{conv} : es la energía térmica que el foco transmite al entorno por efecto de la convección.
- *Fracción radiante* f_{rad} : es la energía térmica que se transmite al entorno por efecto de la radiación.
- *Fracción de retorno* f_{ret} : es la energía térmica absorbida por el sistema de ventilación acoplada a la luminaria que posteriormente es reinyectada al entorno. Generalmente es cero.

Cada una de estas fracciones se muestra en la siguiente tabla:

Tabla 2.4: Ganancias de iluminación según disposición. Fuente: Software *Design Builder*.

Disposición espacial del foco	FRACCIONES			
	Retorno	Radiante	Visible	Convectiva
1. Suspendido	0	0,40-0,45	0,15-0,20	0,4
2. Superficial	0	0,70-0,75	0,15-0,20	0,1
3. Empotrado	0	0,35-0,40	0,15-0,20	0,45
4. Techo luminoso de rejillas	0	0,35-0,40	0,15-0,20	0,45
5. Ventilado por ducto	0,54	0,15-0,20	0,15-0,20	0,1

Esquemáticamente, cada una de estas disposiciones (con respecto al cielo) se muestra en la siguiente figura:

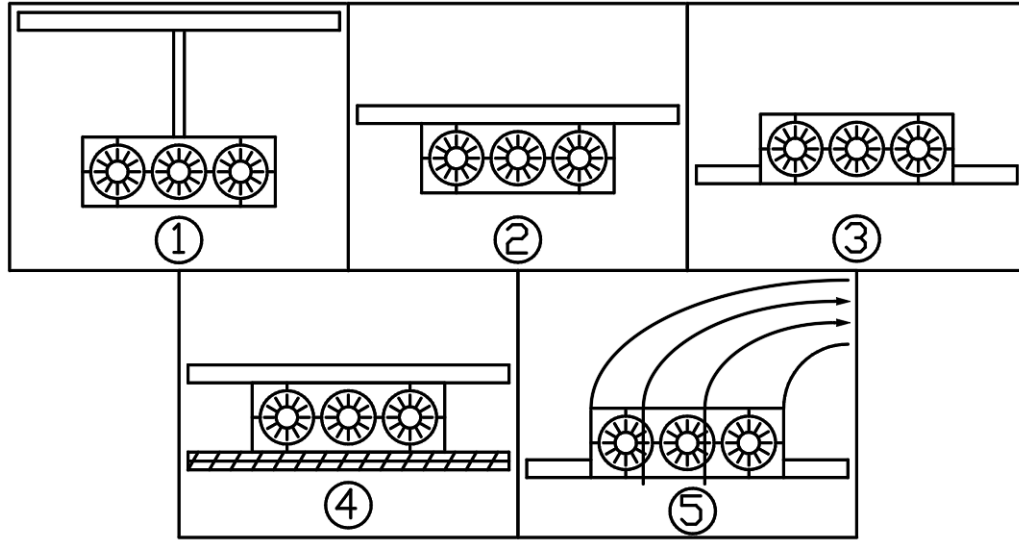


Figura 2.12: Disposiciones de iluminación según la tabla 2.4. Fuente: Software *Design Builder*.

Con esto el aporte térmico de la luminaria considerando convección y radiación es:

$$\dot{q}_{luz} = (f_{conv} + f_{rad})(NPD)E_{min} \left[\frac{W}{m^2} \right] \quad (2.17)$$

donde E_{min} es el nivel de iluminancia mínimo medido en *lux* requerido para un determinado tipo de recinto.

2.4. Parámetros de estudio

2.4.1. Confort térmico

El interés por cuantificar el grado de comodidad que experimenta una persona dentro de un espacio cerrado aparece en el s.XX con el auge de las tecnologías de aire acondicionado cuyos desarrolladores, en su afán de alcanzar el mejor ambiente posible, buscaban precisar la capacidad de los equipos, su tiempo de uso y el gasto energético que conllevaba su accionar.

El ISP define el confort térmico como “*El estado mental de una persona en términos de percibir un ambiente demasiado caluroso o demasiado frío. Por otro lado también se puede definir como una manifestación subjetiva de conformidad o satisfacción entre el trabajador con el ambiente térmico existente*” [10]. Si bien esta definición se enmarca para ambientes laborales, es extensible a todos los espacios con ocupación humana, independiente de la actividad que en estos se lleve a cabo.

Puesto que se trata de una evaluación sujeta a la percepción de los ocupantes, evaluar el confort térmico no es una labor sencilla por lo que han surgido diferentes metodologías para su cuantificación, en base a elementos objetivos como temperaturas, presencia de humedad,

generación de calor metabólico, entre otras.

2.4.1.1. Método de Fanger

La metodología que hoy cuenta con mayor reconocimiento es la propuesta por el ingeniero danés Povl Ole Fanger (1934-2006) llamada el método Fanger y en la cual se basan la norma UNE-EN-ISO-7730 y la ASHRAE⁴ la incorpora en su Standard 55. La base de este método es el equilibrio térmico entre el calor ganado tanto por generación fisiológica y el que proviene del entorno menos el calor perdido por diferentes mecanismos, Fanger realizó ensayos en ambientes controlados con 1300 individuos en donde se variaba los factores enumerados en el párrafo anterior. Finalmente sintetizó su trabajo en la obtención de dos índices:

- PMV (*Predicted Mean Vote*) Voto Medio Previsto: Representa la opinión promedio de un grupo de individuos con respecto a una escala cualitativa de sensación térmica cuyos valores se muestran en la siguiente tabla:

Tabla 2.5: Escala de sensación térmica. [11].

Valor del índice	Opinión
+3	Caluroso
+2	Cálido
+1	Ligeramente cálido
0	Neutro
-1	Ligeramente fresco
-2	Fresco
-3	Frio

- PPD (*Predicted Percentage Dissatisfied*) Porcentaje Previsto de Insatisfechos: Este índice señala el porcentaje de personas que considerarán como desagradable/no confortable la sensación térmica obtenida de PMV. La figura 2.13 muestra gráficamente la relación entre ambos índices:

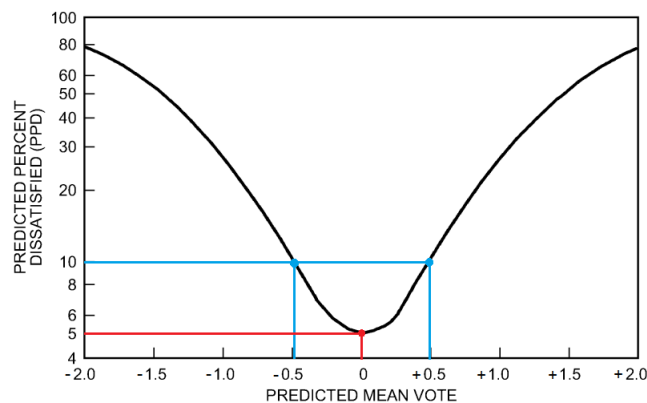


Figura 2.13: PPD en función del valor del PMV. Modificado de [11].

⁴ ASHRAE: Sociedad Estadounidense de Calefacción, Refrigeración y Aire Acondicionado

Como se puede apreciar, para un $PMV = \pm 0,5$ le corresponde un $PPD = 10\%$ inclusive para $PMV = 0$ se tiene un $PPD = 5\%$.

De estos índices se desprende que en la realidad no es posible alcanzar condiciones ambientales que satisfagan a todos los ocupantes de un espacio, pero si a un porcentaje mayoritario de estos. Para obtener estos índices se hace uso de las ecuaciones de Confort de Fanger:

$$PMV = (0,303 \cdot e^{-0,036M} + 0,028) \cdot \left\{ \underbrace{(M - W) - 3,05 \cdot 10^{-3} \cdot [5733 - 6,99 \cdot (M - W) - p_v]}_{(1)} \right. \\ \left. - \underbrace{0,42 \cdot [(M - W) - 58,15]}_{(2)} - \underbrace{1,73 \cdot 10^{-5} \cdot M(5867 - p_v)}_{(3)} - \underbrace{0,0014 \cdot M(34 - T_a)}_{(4)} \right. \\ \left. - \underbrace{3,96 \cdot 10^{-8} \cdot f_{cl}[(T_{cl} + 273,15)^4 - (T_{rm} + 273,15)^4]}_{(5)} - \underbrace{f_{cl} \cdot h_c \cdot (T_{cl} - T_a)}_{(6)} \right\} \quad (2.18)$$

$$PPD = 100 - 95 \cdot \exp(-0,03353 \cdot PMV^4 - 0,2179 \cdot PMV^2) \quad (2.19)$$

Donde la ecuación 2.19 es la expresión analítica de la figura 2.13.

Los términos encerrados en la ecuación 2.18 con llave corresponden a las pérdidas térmicas corporales:

- (1) Por difusión a través de la piel
- (2) Por sudoración
- (3) De calor latente por respiración
- (4) De calor sensible por respiración
- (5) Por radiación
- (6) Por convección

El desglose de los parámetros se muestra en el Anexo B.1. Es así cómo se llega a los índices PMV y PPD que ponderan numéricamente la sensación de confort percibida por los ocupantes de un recinto.

2.4.1.2. Confort según ASHRAE

Observando el método de Fanger y enmarcado en la carta sicrométrica, ASHRAE define un rango establecido de temperatura y humedad absoluta para una persona que realiza actividades sedentarias ($\leq 1,1$ [met]) en interiores (velocidad del aire $\leq 0,2$ [m/s]).

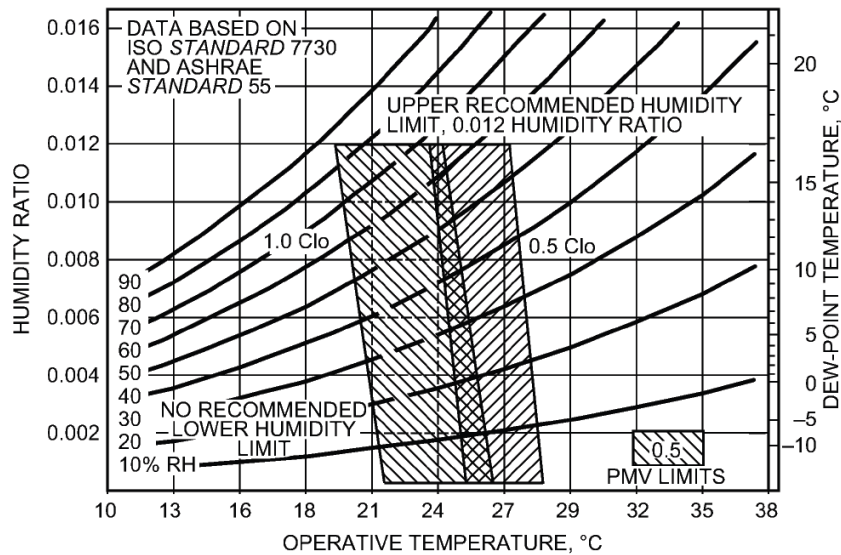


Figura 2.14: Zona de confort según ASHRAE variando el grado de vestimenta: a la izquierda para 1,0 clo y la derecha para 0,5 clo [11].

Si bien la carta sicrométrica incluye muchas variables (como se puede apreciar en el anexo A), fijando valores para dos variables se puede delimitar rangos de confort térmico. En caso de variar alguno de estos parámetros, este intervalo puede cambiar, para aquello resulta útil la siguiente página <https://comfort.cbe.berkeley.edu/>, que además incorpora los parámetros de Fanger y otras normas internacionales.

2.4.1.3. Calidad de aire

Según la actividad que desarrollen los ocupantes de un recinto, la demanda de aire, la calidad del aire necesario y la generación de contaminantes son también variables, por ejemplo en un gimnasio o lugar deportivo cerrado la necesidad de recambio de aire es mayor por la actividad metabólica, en comparación a por ejemplo una oficina. A partir de ecuación 2.11 que entrega un caudal de V_{air} mínimo y fijando C_{IN} (la calidad del aire de inyección) se pueden determinar valores de ACH apropiados.

Los valores de ACH necesarios están tabulados según la actividad de los ocupantes dentro del recinto. A continuación se muestran rangos de valores para algunos recintos no industriales recurrentes.

Tabla 2.6: Recomendación de renovaciones horarias basado en la norma DIN 1946. [12].

Tipo de Recinto	ACH [ren/hr]
Iglesias	1-2
Escuelas	2-3
Bibliotecas	4-5
Gimnasios	4-6
Oficinas genéricas	4-8
Hospitales	5-6
Teatros y Cines	5-8
Salas de reunión	5-10
Restaurantes	8-12
Discoteques	10-12
Sala para fumadores	15-18
Cocina industrial	15-20
Baños (con inodoro y ducha)	15-25

2.4.2. Eficiencia Energética

La eficiencia energética es la filosofía que promueve el uso racional y eficiente de la energía a nivel individual y organizacional permitiendo a las entidades disminuir sus costos, sin mermar la productividad y la calidad de esta, siendo extensible a diversos rubros y sectores de la economía.

En Chile la Ley de Eficiencia Energética 21305 promulgada en febrero del 2021, si bien está fuertemente orientada al sector industrial y de transportes, establece parámetros para la calificación energética de las edificaciones y también fija horizontes de tiempo para la reevaluación de los estándares locales, bajo la lógica que con el pasar del tiempo las normativas internacionales se tornen más exigentes.

La Auditoría Energética (AE) es una metodología cuya finalidad es determinar el uso de la energía, analizando las potenciales mejoras y cuantificando los ahorros asociados a su implementación. Comienza con un diagnóstico de entrada conocido como Auditoría Energética Inicial (AEI) donde se obtiene el perfil del consumo y se identifican las oportunidades de ahorro para luego dar paso a la Auditoría Energética Rutinaria (AER) en donde se monitorea el funcionamiento de los equipos y se registra cómo el deterioro de estos ocasiona pérdidas de eficiencia y gastos crecientes en el tiempo.

El plan general de Auditoría Energética contempla los siguientes pasos:

- Conocimiento del proceso
- Conocimiento de la demanda energética inicial real
- Plan de mediciones
- Análisis de datos recopilados
- Detección de fugas y desperdicios de energía

Atendiendo a las variables físicas que conlleva un análisis energético, el auditor necesitará contar con herramientas apropiadas para emitir un diagnóstico preciso de los consumos. Entre estas herramientas están principalmente:

- Analizador de redes con pinzas para corriente y voltaje
- Cronómetros
- Termómetros y pirómetros ópticos
- Luxómetros
- Anenómetros
- Instrumentos varios para medición lineal
- Higrómetros para distintos niveles de temperatura

Mundialmente, la norma internacional ISO 50001, publicada en el 2011, pretende servir de referencia a las organizaciones que se fijan como meta mejorar su rendimiento en la gestión de la energía y con esto mitigar los impactos de su consumo principalmente con respecto a la emisión de gases de efecto invernadero. Esta norma establece la secuencia de trabajo de un Sistema de Gestión Energética, que consiste en una política a nivel administrativo dentro de la organización, que establece las atribuciones y recursos para el mantenimiento del SGE como una línea acoplada al desarrollo habitual de la entidad.

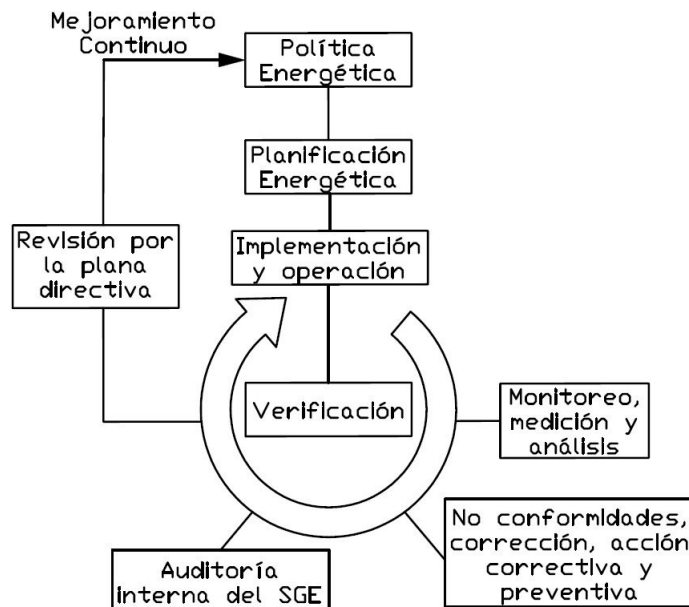


Figura 2.15: Diagrama de flujo que muestra la aplicación de un SGE en el quehacer de la organización. Adaptado de [13].

2.4.3. Iluminación mínima

Existen recomendaciones oficiales que fijan valores de iluminancia mínimos E_{min} en lux según el recinto de modo que se asegure el bienestar de los ocupantes y garantice la correcta realización de la actividad propia. A continuación una basada en la norma UNE 12464.1:

Tabla 2.7: Recomendaciones de iluminancia.[14].

Espacio/Actividad	$E_{min}[lx]$	Espacio/Actividad	$E_{min}[lx]$
Oficina	300	Sala de clases	400
Cafetería	200	Auditorio	500
Baños	100	Biblioteca	300
Pasillo	50	Escalera	100
Supermercado	500	Recepción	200
Restaurant	200	Museos, salas de exposición	300

2.4.4. Estándares de conservación de obras

Los museos son edificios que no solamente exhiben obras sino que las almacenan y también prestan espacio para su restauración, es por esto que las características ambientales de los lugares de repositorio deben ser las óptimos.

ASHRAE Handbook-HVAC Applications en su capítulo 24 especifica los agentes de deterioro en el manejo de colecciones artísticas, ignorando las que no son objeto de este estudio, se menciona la temperatura y sobretodo la humedad relativa como factor de daño químico y de proliferación biológica, como por ejemplo “polillas de la ropa” que afectan cuadros principalmente.

Por ejemplo la figura 2.16 establece una zona de seguridad y otra de riesgo para la aparición de moho variando temperatura y humedad relativa en lienzos de distintos materiales.

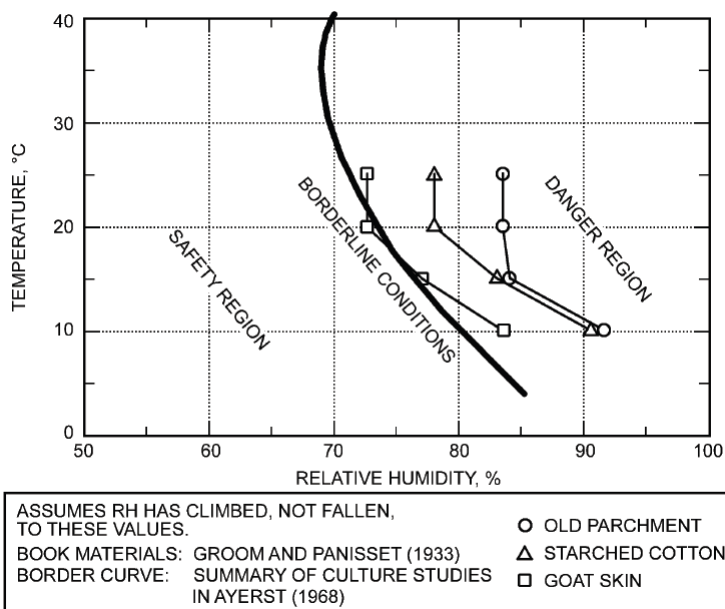


Figura 2.16: Combinaciones de temperatura-humedad relativa que definen zonas de riesgo en la conservación. [16].

La temperatura debe ser controlada ya que actúa como acelerador de daño químico (si-

guiendo una ley de Arrhenius) reduciendo el tiempo de vida de las obras hechas de papeles, fotografías y materiales celulósicos. La figura 2.17 muestra isopermas (*lifetimes* constantes L_r con respecto a tiempos de vida para $T=20$ [°C] y $HR = 50\%$) enmarcadas en una carta sicrométrica según modelos para distintos materiales.

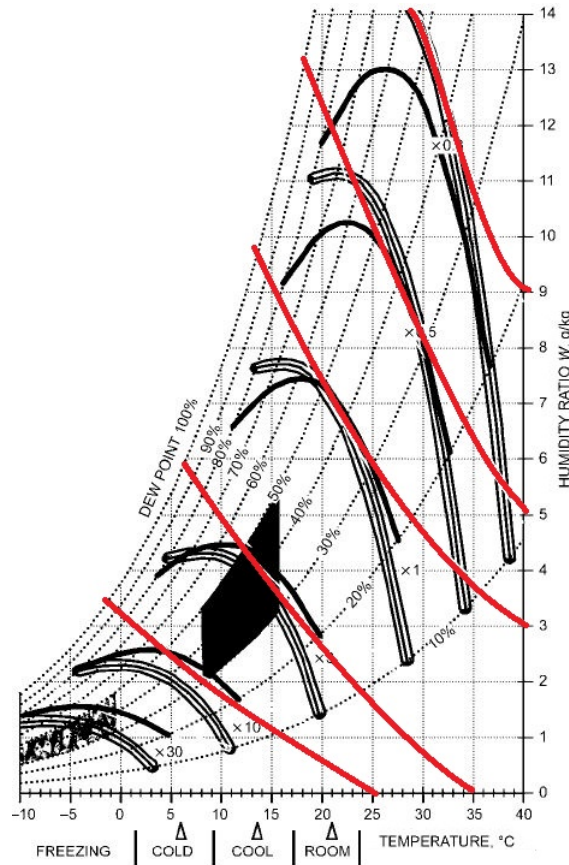


Figura 2.17: Tiempos de vida contantes para distintos materiales. Modificado de [16].

Se toma el modelo de Michalski (líneas rojas) para colecciones mixtas de papel, películas tinturadas y componentes orgánicos.

$$L_r = 6,17 \cdot 10^{-19} \exp \left(\left(\frac{10^5}{8,314 \cdot T} \right) (100HR)^{-1,3} \right) \quad (2.20)$$

Con T en grados Kelvin y HR en porcentaje. Por ejemplo, para $T=13$ [°C] y $HR = 72\%$, se tiene:

$$L_r = 6,17 \cdot 10^{-19} \exp \left(\left(\frac{10^5}{8,314 \cdot 286,15} \right) (72)^{-1,3} \right) = 1,176 \quad (2.21)$$

Es decir, para esas condiciones ambientales, el tiempo de vida para las obras es 1,18 veces mayor lifetime de referencia.

2.5. Clima

El factor que condiciona y determina los periodos de refrigeración y calefacción es el clima. La data climática empleada consiste en una planilla que especifica las variables físicas medidas minuto a minuto para un año calendario. Especifica valores para la temperatura de bulbo seco y húmedo exterior, la radiación solar, la velocidad y dirección del viento, entre los datos más destacados.

Según la clasificación climática de la ASHRAE en su Standard 169-2020 al edificio MAC sede Quinta Normal le corresponde zona 3B de clima cálido seco, ligado a la estación Santiago-Quinta Normal WMO 855770 (Latitud -33.445° , Longitud $-70,683^\circ$).

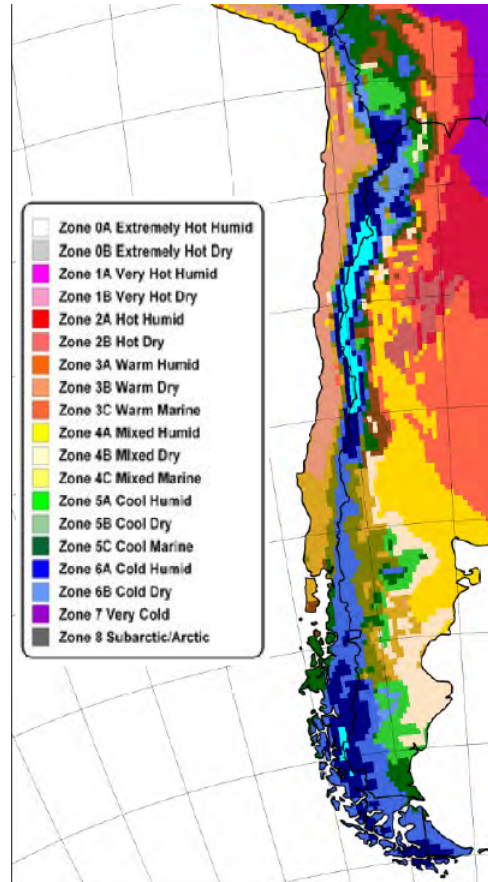


Figura 2.18: Zonas climáticas de Chile según la ASHRAE [17].

2.5.1. Radiación solar

La radiación solar incidente es la energía en forma de onda electromagnética que proviene del sol y que calienta los cuerpos, que posteriormente liberan dicho calor mediante radiación o convección. La radiación solar que entra a la atmósfera es la llamada *radiación de onda corta* debido a su bajo valor de longitud de onda, por consiguiente alta frecuencia, cuyo rango de valores se superpone con la luz visible por el ojo humano (entre 0,1 y $0,4[\mu\text{m}]$), mientras que la radiación emitida por los cuerpos es *radiación de onda larga* que proviene del calentamiento de los cuerpos, fenómeno descrito en el ítem 2.2.3.3.

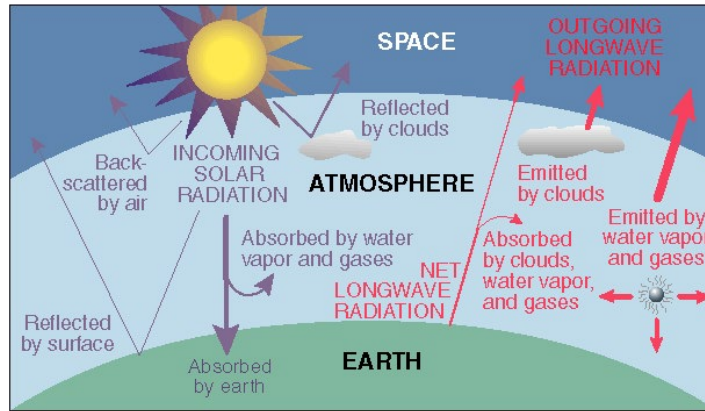


Figura 2.19: Radiación ultravioleta de onda corta e infrarroja de onda larga en la atmósfera [18].

Parte de esta energía irradiada se pierde debido a la absorción y a la dispersión del medio material de las capas atmosféricas. Ante estos obstáculos, la radiación solar incidente que llega a la superficie se separa entre radiación difusa E_d y radiación directa E_b de acuerdo a la interferencia que tuvo esta en su trayectoria.

$$E_t = E_b + E_d \quad (2.22)$$

El modelo de cielo claro de la ASHRAE considera el efecto provocado por la atmósfera a la radiación incidente relacionando ambas radiaciones, introduciendo constantes específicas a través de cálculos extensos y complejos. De forma breve tanto E_b como E_d son valores que dependen principalmente de:

- Ubicación geográfica: latitud, propiedades físicas y ópticas del aire local, presencia de nubosidad.
- Tiempo: hora del día, día del año.
- Otras: orientación espacial de la superficie receptora, etc.

Cabe señalar que el sol varía su trayectoria para un determinado lugar durante el año, por lo cual la radiación incidente tendrá diferentes ángulos de incidencia (ver figura 2.20) e intensidad durante el ciclo de traslación.

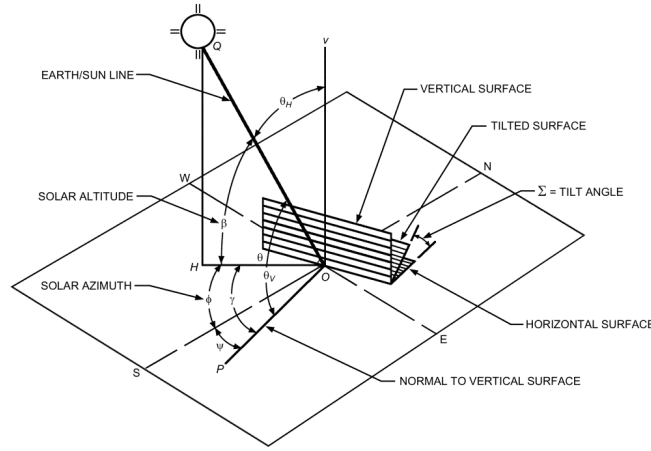


Figura 2.20: Ángulos solares para superficies verticales y horizontales [11].

En un edificio la presencia de ventanas, tragaluces y techos acristalados hace que esta radiación entre al edificio proporcionando luz natural y ganancias de calor. Ignorando la reflexión y la absorción, para cada tipo de material translúcido se define el $SHGC^5$, que representa la fracción neta de energía por radiación solar que ingresa al interior traspassando la ventana, de modo tal que el flujo térmico es:

$$\dot{q}_{sol} = E_t \cdot SHGC \left[\frac{W}{m^2} \right] \quad (2.23)$$

2.6. Simulación mediante software

Para simular computacionalmente primero debe detallarse el algoritmo ocupado. El principal método de simulación es el *Método del Balance de Calor (HBM⁶)* cuya base es la primera Ley de la Termodinámica aplicada a un volumen de control con ganancias tanto externas como de generación interna y las pérdidas térmicas en cada una de sus caras. Para un edificio, esto se replica en todos sus espacios interiores dando lugar a múltiples ecuaciones lineales (o bien linealizadas) lo que genera matrices de grandes dimensiones.

⁵ Solar Heat Gain Coefficient.

⁶ Heat Balance Method.

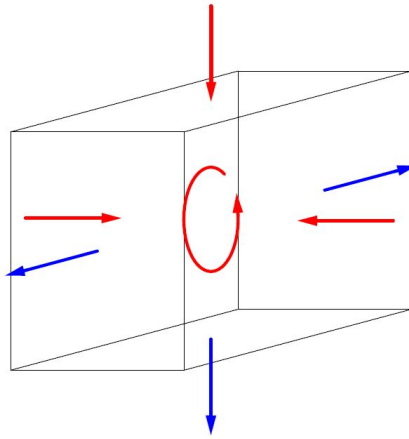


Figura 2.21: Planteo general del método de Balance de Calor para un volumen de control.

Este planteamiento se acopla a las ecuaciones de transferencia térmica que se han detallado en este capítulo, la figura 2.22 ilustra este método.

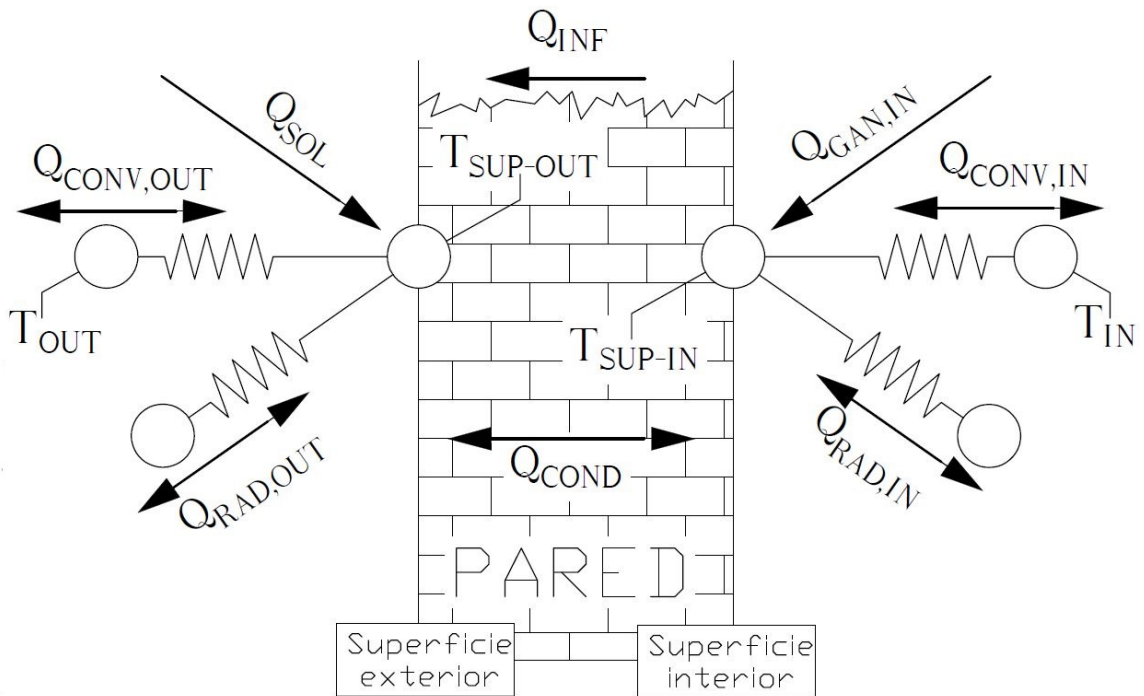


Figura 2.22: Esquema general del método de Balance de Calor para una pared o cerramiento genérico. Adaptado de [7].

Para un cerramiento estructural en un instante arbitrarios, se tiene que:

- $Q_{gan\ int}$ corresponden a las ganancias internas por concepto de metabolismo de los ocupantes, más la iluminación y el funcionamiento de los equipos. Ver ecuaciones 2.15 y 2.17.
- $Q_{in\ fil}$ corresponde al calor perdido por infiltración en una ventana, puerta o rendija presente en la pared. Ver ecuación 2.12

- Q_{solar} corresponde a la radiación del sol incidente sobre el edificio. Ver ecuación 2.23

Este balance se realiza para un espacio rectangular delimitado por sus 6 caras: cuatro paredes laterales, el cielo y su piso, incorporando ecuaciones auxiliares para la temperatura interior y para las concentraciones de humedad. El mecanismo de resolución es iterativo ya que al plantear el balance térmico para cada superficie y para cada instante de tiempo en el año, se procede a calcular las temperaturas desconocidas y así conocer los flujos de calor y aire involucrado y por consiguiente, a partir del conocimiento de las temperaturas, se determinan las condiciones de confort térmico, siguiendo las ecuaciones 2.18 y 2.19.

Una derivación de HBM es el *Método de las series temporales radiantes* que considera la capacidad de almacenamiento de calor del edificio debido a su masa m e inercia térmica $I = \sqrt{k\rho c_P}$ y con ello aparecen factores de desfase con respecto a cargas térmicas periódicas como las ganancias solares o la ocupación humana, ya que el edificio libera en forma de radiación energía acumulada durante el día amortiguando cambios bruscos provenientes del exterior y con esto, aumenta la constante de tiempo.

2.6.1. DesignBuilder y EnergyPlus

DesignBuilder es un software de simulación energética y medioambiental organizado en principio como un generador de geometría estructural 3D. Posee módulos enfocados en temáticas específicas y complementarias, como visualización, simulación, *CFD*, iluminación, entre otras, para una entrega de información integrada.

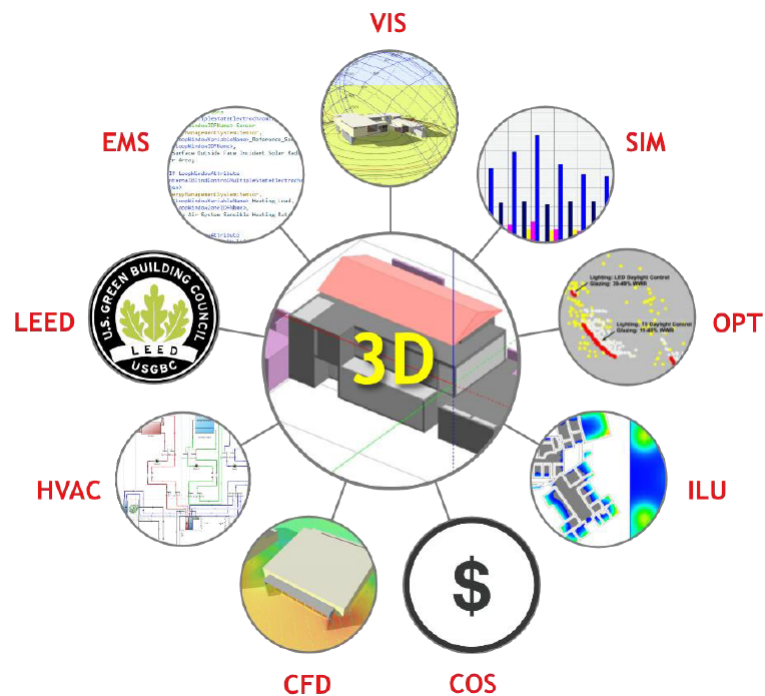


Figura 2.23: Organización modular de *DesignBuilder* con todas sus aplicaciones. Adaptado de [20]

El módulo de Simulación hace uso del motor de cálculo *EnergyPlus*, herramienta compu-

tacional que mediante data climática horaria e información estructural calcula los consumos energéticos y el comportamiento térmico de los edificios ingresados. Otro módulo de interés es Iluminación, con el motor *Radiance*, el cual también emplea de la data climática para evaluar la iluminación natural que recibe del sol durante un año calendario, en términos de los *lux* anuales y el porcentaje de tiempo que son iluminados sectores interiores del edificio.

El conjunto de estos programas goza de una amplia aceptación en el rubro de la arquitectura y la ingeniería pues su versatilidad los hace aplicables a áreas de análisis que involucran desde lo energético, térmico, económico hasta lo normativo.

Capítulo 3

Metodología

La secuencia de trabajo contempla una etapa previa a la computacional, para posteriormente configurar el modelo y luego llevar a cabo el estudio con los resultados y modificaciones que sobre el software permite obtener y realizar respectivamente.

3.1. Levantamiento global de información

Se recopila toda la información necesaria para la caracterización de los edificios, desde los planos entregados por la administración del museo, cuentas de luz y agua, registro de la luminaria y los equipos que consumen energía.

3.1.1. Planimetría

Los planos fueron facilitados por la arquitecta encargada de los museos MAC, archivos en formato .dwg los cuales se trabajaron en AutoCAD. En las figuras 3.1, 3.2 y 3.3 se muestran las láminas de presentación de dichos archivos, ignorando las cotas, las anotaciones y las capas irrelevantes para la confección de la geometría 3D.

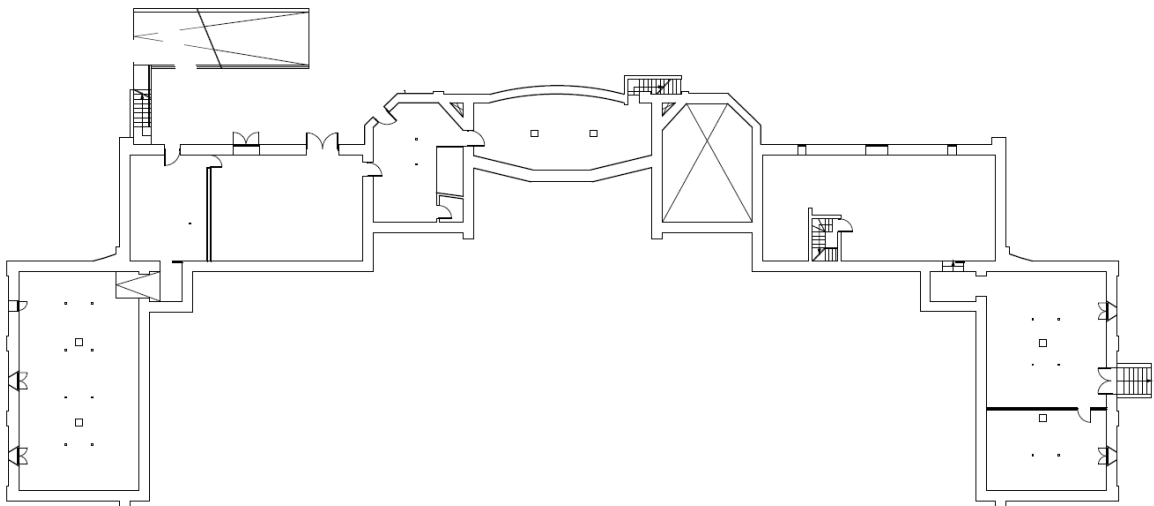


Figura 3.1: Plano general del subterráneo. Gentileza: Claudia Vergara, arquitecta encargada MAC.

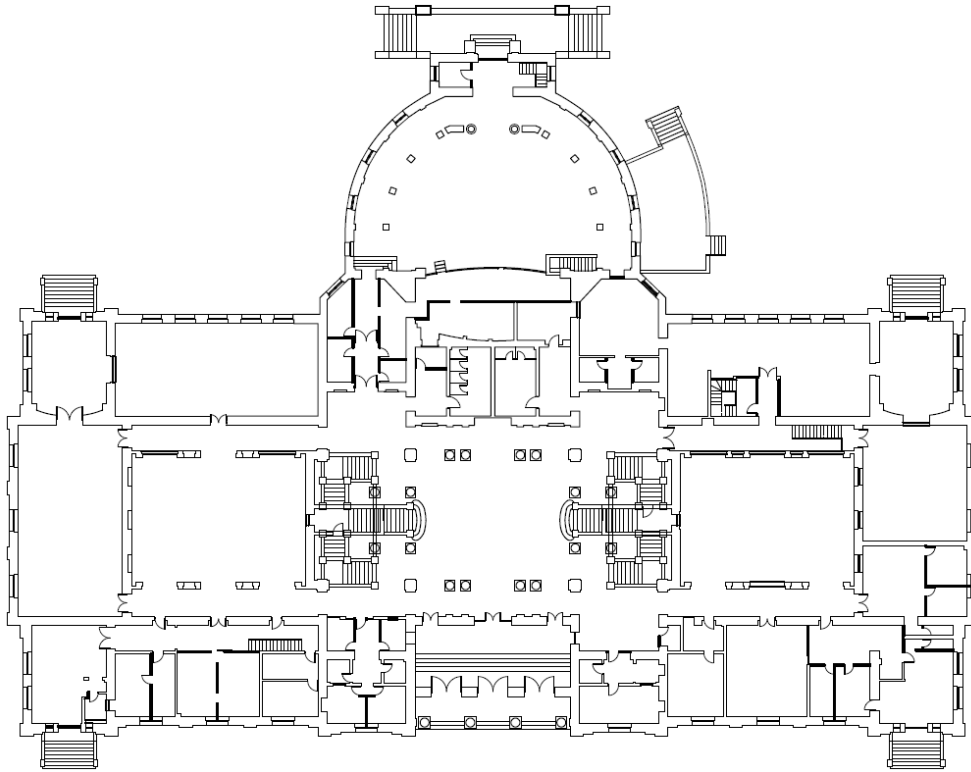


Figura 3.2: Plano general del piso 1. Gentileza: Claudia Vergara, arquitecta encargada MAC.

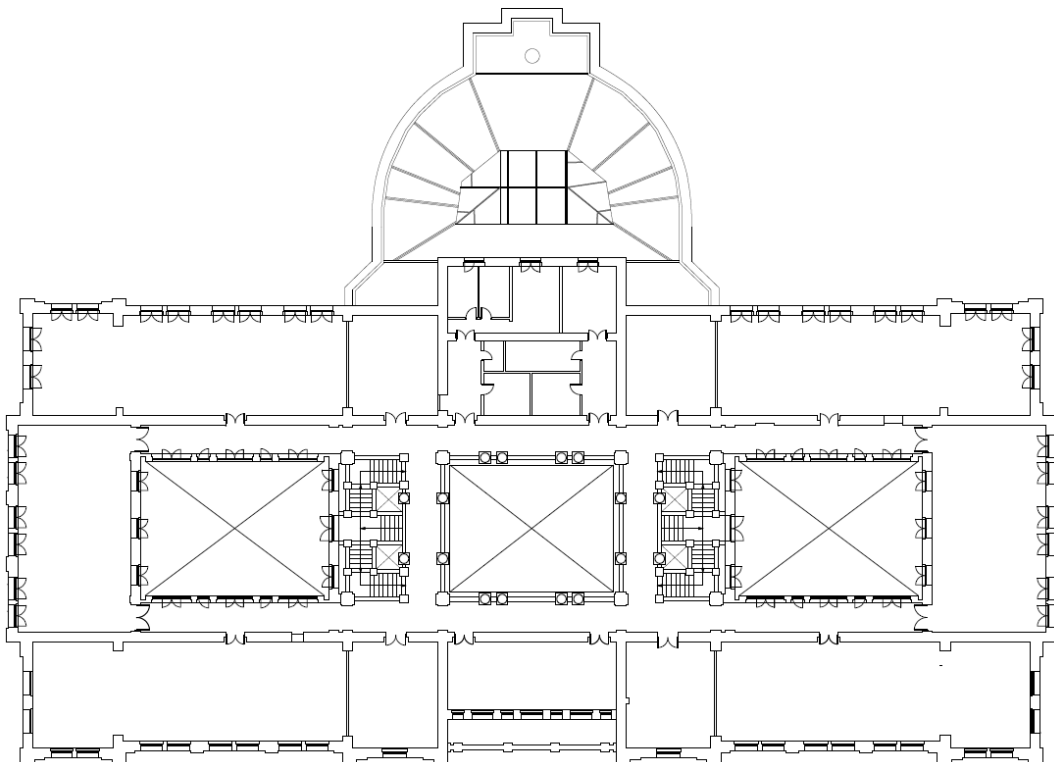


Figura 3.3: Plano general del piso 2. Gentileza: Claudia Vergara, arquitecta encargada MAC.

3.1.2. Inventario de equipos y luminaria

Los artefactos registrados en el museo se muestran en el siguiente cuadro:

Tabla 3.1: Inventario de artefactos en el edificio.

Artefacto	Cantidad	Artefacto	Cantidad
Calefactor halógeno	2	Multifuncional	2
Cargador de radiotransmisor	2	Notebook	5
Cargador de teléfono	8	Proyector	4
Computador de escritorio	3	Rack de comunicación	1
Equipo de audio	6	Refrigerador	2
Esmeril angular	1	Secador de pelo	1
Estufa a gas	3	Sierra circular	1
Hervidor	3	Taladro	1
Horno eléctrico	1	Trapeador eléctrico	1
Máquina de soldar	1	Termotanque	1
Microonda	1	Termoventilador	3
Módem	3	Ventilador de pie	3
Monitor LCD	3	-	-

El Rack de comunicación es un conjunto que consiste en un router, un terminal de fibra y un patch-panel de 16 puertos, mientras que el cargador de radiotransmisor se refiere a los walkie-talkie ocupados por los guardias.

En el mismo orden de cosas, la luminaria de interior y exterior se divide en 3 tipos, simplificadaamente se tiene:

Tabla 3.2: Inventario de focos en el edificio.

Tipo de Foco	Cantidad
LED de interior	250
LED de exterior	20
Tubo fluorescente	100

3.1.3. Aforos fijos y visitantes

Los ocupantes fijos se componen de los administrativos del MAC, los administrativos del Violeta Parra, los guardias y vigilantes, maestros que realizan reparaciones de fachada y fallas eléctricas y las personas que trabajan en la Escuela Fermín Vivaceta.

Tabla 3.3: Desglose de ocupantes fijos en el edificio.

Ocupante	Cantidad
Administrativos MAC	8
Administrativos Violeta Parra	7
Guardias	8
Auxiliares	6
Encargados Fermín Vivaceta	3
TOTAL	32

El museo organiza su agenda según exposiciones, las que tienen una duración entre 2 y 3 meses aproximadamente. Cuando ocurre el lanzamiento de una exposición, el primer mes suele presentar una afluencia mayor a la habitual.

Esta información fue consultada y registrada durante el año 2023, diferenciando dos regímenes de asistencia al museo, donde ambas siguen una tendencia similar en el transcurso del día. Puesto que la distribución no es uniforme, se calculó un nivel promedio equivalente para un mismo día sin importar la hora de este.

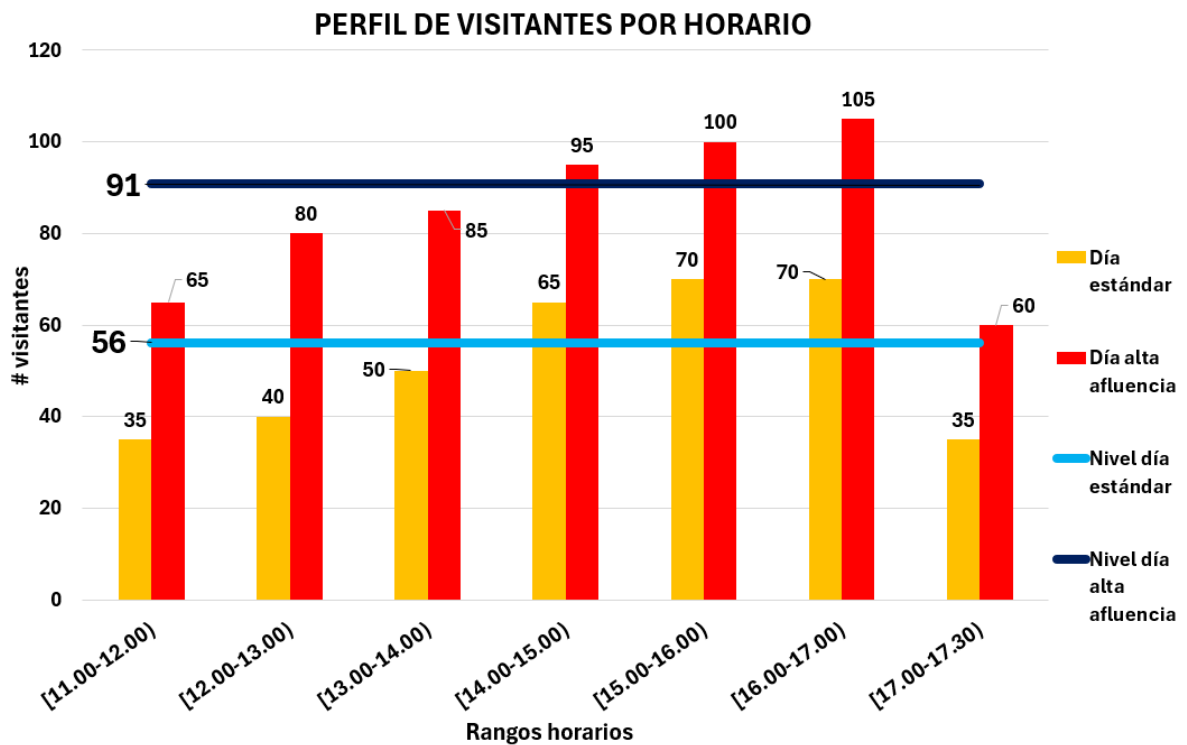


Figura 3.4: Perfil de visitantes y nivel promedio diario según segmento horario y afluencia.

Tabla 3.4: Resumen aforos según caso.

-	ESTÁNDAR	ALTA AFLUENCIA
Total día [personas]	365	590
Aforo efectivo [personas]	56	91

3.1.4. Cuentas de electricidad y agua

Como parte de la información entregada por la administración del museo, se dispone de las cuentas de electricidad emitidas por la compañía ENEL para los años 2022 y 2023.

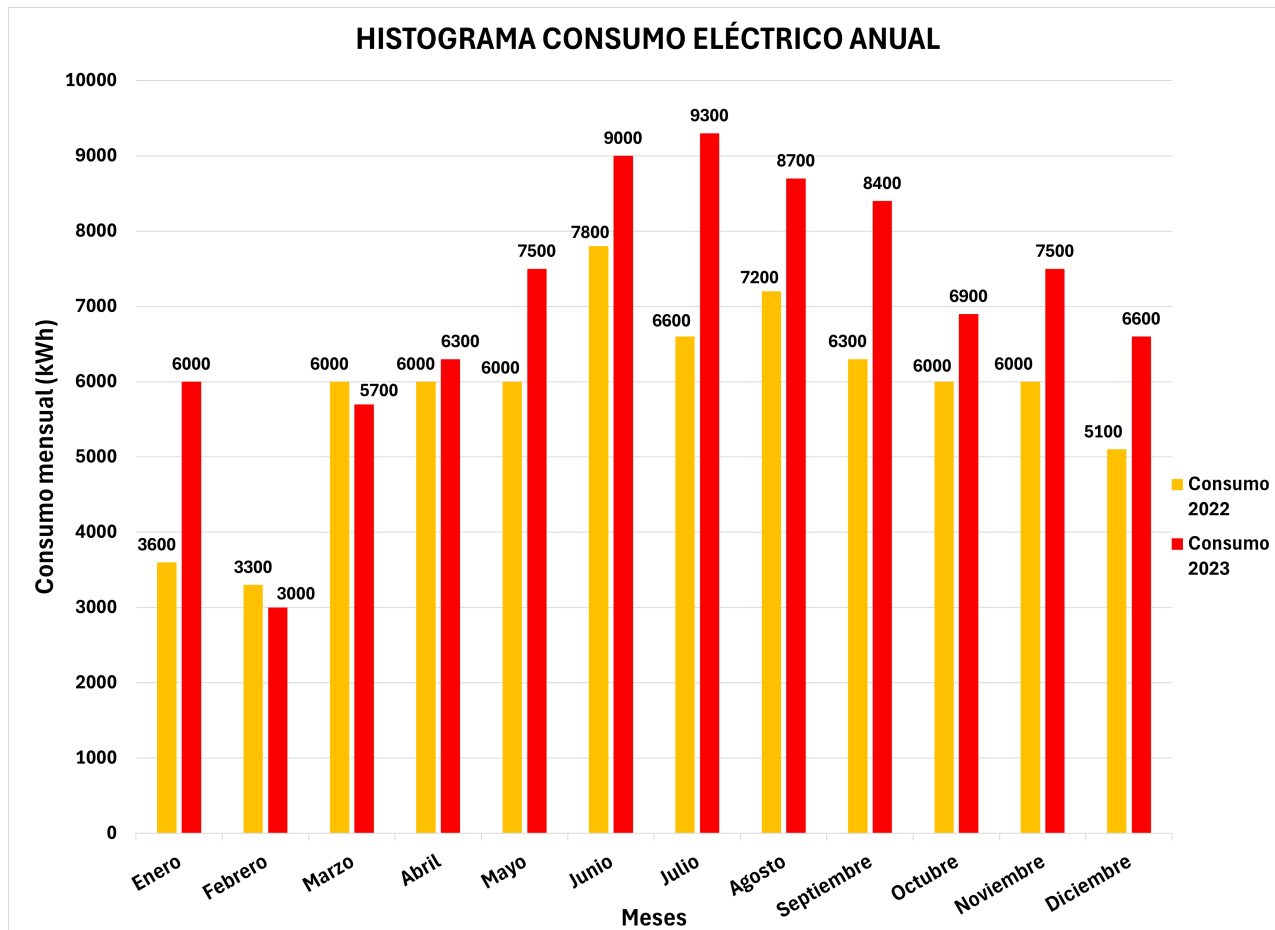


Figura 3.5: Consumos registrados por ENEL para los años 2022 y 2023.

Tabla 3.5: Resumen consumos 2022 y 2023.

Año	Total anual [kWh]	Promedio mensual [kWh]
2022	69900	5825
2023	84900	7075

Tabla 3.6: Distribución de consumos según mes en base a lo entregado por ENEL.

	Porcentaje de consumos mensuales	
	2022	2023
Enero	5,15 %	7,07 %
Febrero	4,72 %	3,53 %
Marzo	8,58 %	6,71 %
Abril	8,58 %	7,42 %
Mayo	8,58 %	8,83 %
Junio	11,16 %	10,60 %
Julio	9,44 %	10,95 %
Agosto	10,30 %	10,25 %
Septiembre	9,01 %	9,89 %
Octubre	8,58 %	8,13 %
Noviembre	8,58 %	8,83 %
Diciembre	7,30 %	7,77 %

Puesto que el 2022 fue el primer año post-pandemia, en donde el museo reabrió y no funcionó en régimen normal, no se considerará como referencia para la simulación de consumo eléctrico. Solamente se trabajará con los consumos registrados para los meses del 2023.

Con respecto a las cuentas de agua, aunque las lecturas eran emitidas cada dos meses, el cálculo de los totales y promedios es análogo al caso de la electricidad.

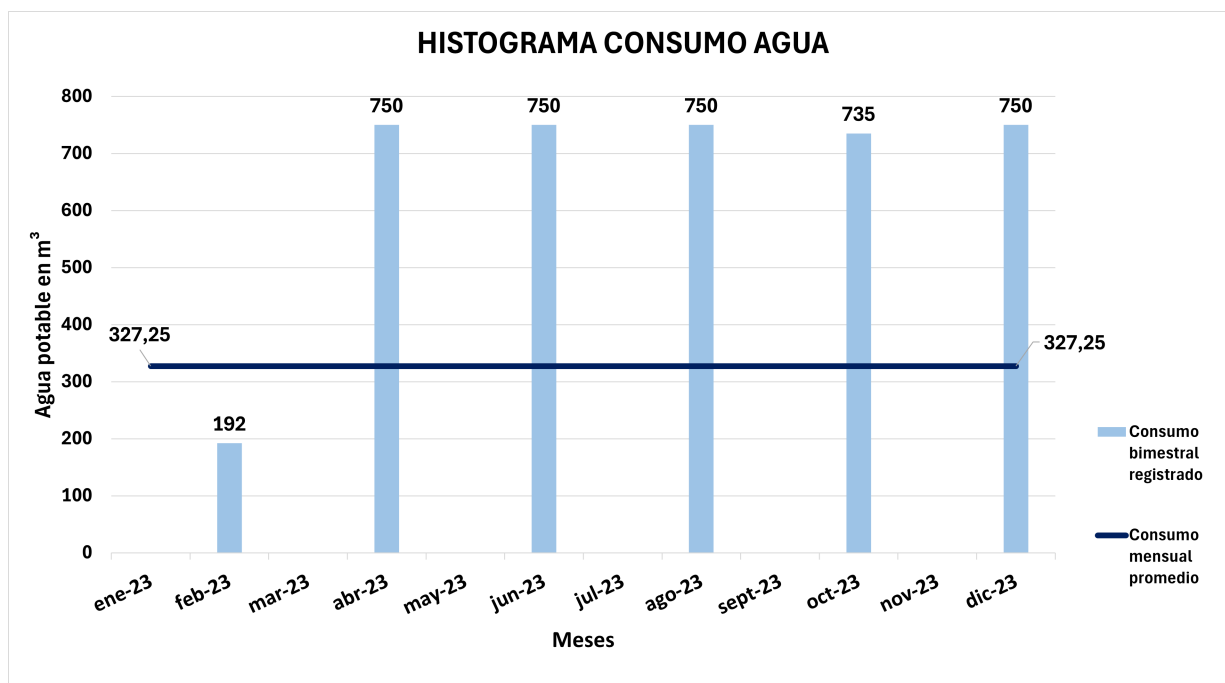


Figura 3.6: Consumos de agua registrado por Aguas Andinas para el 2023.

Tabla 3.7: Resumen de consumo de agua año 2023.

Total anual [m^3]	Promedio mensual [m^3]
3927	327,5

3.2. Cálculos energéticos

A partir del inventariado de artefactos que emplean electricidad para su funcionamiento y de sus características de consumo se puede calcular un consumo eléctrico total y obtener valores relevantes para la simulación computacional.

3.2.1. Línea base

La línea base es un perfil referencial de consumo de energía, desde el cual se busca implementar las medidas de Eficiencia Energética. Si bien este cálculo puede implicar análisis multivariable o modelos de regresión, en su versión más directa y sencilla es multiplicar potencias por tiempos de uso para cada artefacto y sumar para un periodo determinado.

Para esto es necesario distinguir los regímenes de funcionamiento ya que pueden presentarse días donde los consumos siguen pautas diferentes, en este caso se considera que un mes tipo tiene 30 días y que para este estudio en particular, el museo funciona a plenitud 6 días a la semana, redondeando 26 días operativos (d_{op}) y 4 domingos, donde solamente hay movimiento por el cambio de turno de los guardias. Se define ω_i consumo nominal del artefacto cuando está encendido funcionando (*on*) medido en [W] y f_i su factor de uso en [hrs/dia] para un día operativo:

Tabla 3.8: Consumo en *on* y factores de uso para los artefactos considerados en el cálculo de la línea base.

Artefacto	ω_i [W]	f_i [hrs/dia]
Cargador de radiotransmisor	75	6
Cargador de teléfono	5	7
Computador de escritorio	200	10
Equipo de audio	80	7
Esmeril angular	720	2
Hervidor	1200	0,4
Horno eléctrico	1500	1
Máquina de soldar	2000	0,5
Microonda	800	1
Módem	20	24
Monitor LCD	18	10
Multifuncional	60	1
Notebook	20	10
Proyector	2000	7
Rack de comunicación	183	24
Refrigerador	150	24
Secador de pelo	2000	0,5
Sierra circular	1800	2
Taladro	600	2
Termotanque	2000	2
Trapeador eléctrico	75	0,4

Tabla 3.9: Consumo en *on* y factores de uso de los distintos focos en el cálculo de la línea base.

Tipo de Foco	ω_i [W]	f_i [hrs/dia]
LED de interior	11	7
LED de exterior	120	7
Tubo fluorescente	70	10

Fijar los tiempos de uso está sujeto a una alta subjetividad, por lo cual se apelará al sentido común a la hora de darse esos valores, en el Anexo B.2 se muestra el detalle y la explicación del procedimiento de cálculo empleado.

El cálculo de la línea base se elaborará para abril ya que en este mes de otoño no hay gastos estacionales como calefacción o el funcionamiento de ventiladores. Además se agrega un porcentaje extra por concepto de consumo “vampiro” de los artefactos del 5%.

Con todo lo anterior, se toma como referencia el consumo mensual de 6300 [kWh] de abril 2023 (ver tabla 3.5), para finalmente llegar a una línea base de 5884,47 [kWh] con una

discrepancia de $-6,6\%$ con respecto a lo informado por ENEL. En el Anexo F.1 se explicita la planilla con la cual se calculó la línea base.

Tabla 3.10: Desglose del cálculo de la línea base.

CONSUMOS	VALOR [MWh]
Artefactos	2,648
Artefactos + “vampiro”	2,780
Luminaria	3,105
Total	5,884

3.2.2. Casos especiales

Los casos especiales se refieren a artefactos cuyo funcionamiento no puede ser incorporado al modelo computacional. Los valores que arrojan los cálculos, más que ser precisos, indican órdenes de magnitud, esto debido al uso de supuestos ocupados para su obtención. Se denota por C a los consumos eléctricos y por Q a las cargas térmicas involucradas.

1. *Termotanque*: El Agua Caliente Sanitaria debe desacoplarse del modelo, ya que el software lo interpreta como parte del sistema de calefacción. Es por esto que para el cálculo del consumo eléctrico del termotanque se hace uso de los datos de la tabla 3.7 y tomando un par de valores, se llega a una potencia térmica por concepto de calentamiento de agua:

$$C_{ACS} = \frac{f_{ACS} \cdot \rho \cdot \dot{V} \cdot c_P \cdot \Delta T}{3600 \cdot e} [kWh]_e \quad (3.1)$$

Donde:

- Fracción de uso de agua caliente sanitaria f_{ACS} se estima que un 2 % del total se ocupa para duchas de funcionarios, lavado de vajillas, etc.
- Densidad del agua $\rho = 1000 \left[\frac{kg}{m^3} \right]$
- Capacidad calorífica del agua $c_P = 4,186 \left[\frac{kJ}{kg^\circ C} \right]$
- Cambio de temperatura ΔT que se considera $\Delta T = 70 - 15 = 55^\circ C$
- Caudal volumétrico de agua \dot{V} que en la tabla 3.7 es $\dot{V} = 327,5 \left[\frac{m^3}{mes} \right]$
- Eficiencia del termotanque e que se fija en 95 %

Juntando lo anterior, resulta ser $C_{ACS} = 440,94[kWh]_e$. Cabe señalar que este valor es válido todos los meses excepto febrero, aquí el consumo de agua es mucho menor debido a que no hay visitas que ocupen los baños. Suponiendo que $\dot{V} = 30 \left[\frac{m^3}{mes} \right]$ en febrero le corresponderá $C_{ACS} = 40,39[kWh]_e$.

2. *Estufa a gas*: Ocupar la estufa a gas se agrega como carga térmica de calefacción. Para una estimación del uso de gas para estufas se hace un redondeo, considerando lo siguiente:

$$Q_{GLP} = \frac{e \cdot N \cdot M_{balon} \cdot PCI_{GLP}}{3,6} [kWh]_{th} \quad (3.2)$$

Con:

- Número de balones de gas que se consumen al mes N que se toma en 3 .
- Masa de combustible contenido en el balón $M_{balon} = 11[kg]$
- Poder calorífico inferior del GLP (mezcla butano-propano) $PCI_{GLP} = 45,88 \left[\frac{MJ}{kg} \right]$ [19]
- Eficiencia de la combustión e que se fija en 98 %

Considerando todo esto, se llega a que: $Q_{GLP} = 412,13[kWh]_{th}$. Se declara que las estufas a gas son ocupadas durante los meses de mayo a septiembre, de modo que se agrega este valor a las ganancias térmicas de dichos meses.

3. *Proyector*: Los proyectores son usados en salas de exposición para montajes audiovisuales. En las salas donde se realiza dicho tipo de exposiciones se hace con las luces apagadas. Debido a esto, no se calculará la diferencia de consumo entre el uso del proyector y la luminaria de la sala, y esto influye en que en la ejecución del modelo, todas las salas de exposición son iluminadas bajo el mismo régimen.
4. *Ventilador de pie*: Los ventiladores son usados en los meses de primavera y verano, descontando febrero donde no hay personal administrativo en el museo. Este artefacto influye en el consumo eléctrico pero no se puede incorporar al modelo, ya que este asume que el ventilador está inserto en una red de ventilación, cosa que no es así. Este cálculo es sencillo y el consumo es un valor muy pequeño en comparación al de otros artefactos.

$$C_{VENT} = N \frac{\dot{W}_{nom} \cdot n \cdot t_{dia}}{1000} [kWh]_e \quad (3.3)$$

Donde:

- Potencia mecánica nominal del ventilador $\dot{W}_{nom} = 50 [W]$.
- Uso diario en horas $t_{dia} = 7 [horas]$ suponiendo que se ocupa entre las 11:00 y las 18:00.
- Días de trabajo al mes que se toma como $n = 26 [dias]$
- Cantidad de ventiladores $N = 3$.

Con esto, se obtiene que $C_{VENT} = 27,3[kWh]_e$. Este valor se añade a los consumos simulados de los meses de octubre, noviembre, diciembre, enero y marzo.

3.3. Modelamiento e ingreso de información

A partir de la información levantada y calculada en las secciones 3.1 y 3.2 se procede a trabajar en *DesignBuilder*. Todo aquello es ingresado al programa, según corresponda, en uno de los siguientes 8 ítems:

- Modelo
- Actividad
- Cerramientos
- Aberturas
- Iluminación
- HVAC
- Miscélanos
- CFD

Las 2 últimas categorías exceden el alcance del estudio por ende no se le entregará data.

3.3.1. Conformación estructural

DesignBuilder posee una tipificación estructural bien definida, distinguiendo entre los distintos componentes de un edificio, tal como se puede ver en la siguiente figura:

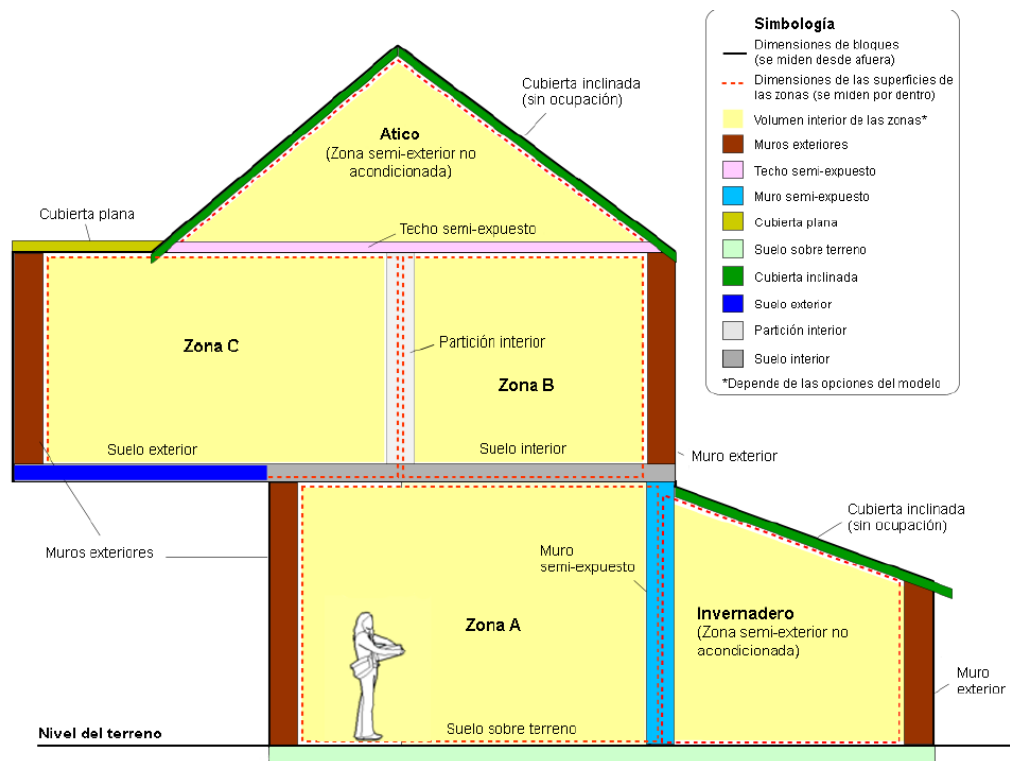


Figura 3.7: Tipos de componentes estructurales establecidos por *DesignBuilder*. [20]

En las figuras 3.1, 3.2 y 3.3 se observa que los planos originales son complejos en cuanto a detalles ornamentales, por lo que se decidió a alisar las paredes, generando una división por recintos con cierta simetría. A continuación se muestran las zonas de cada piso.

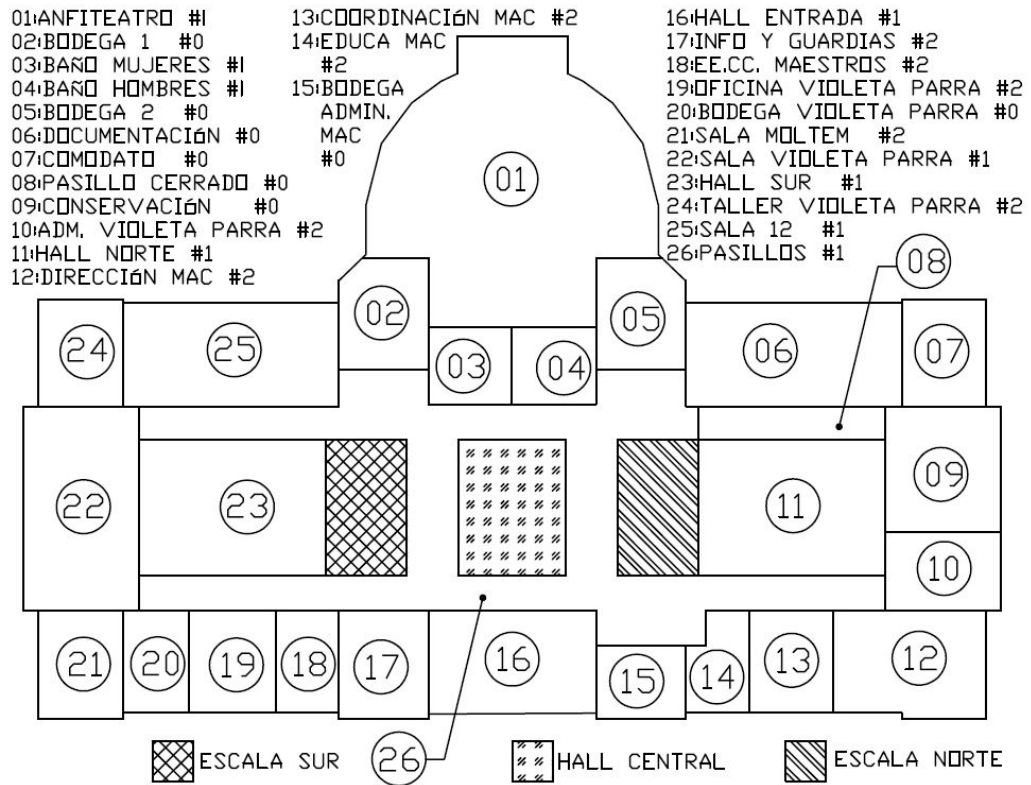


Figura 3.8: División interna de zonas para el piso 1.

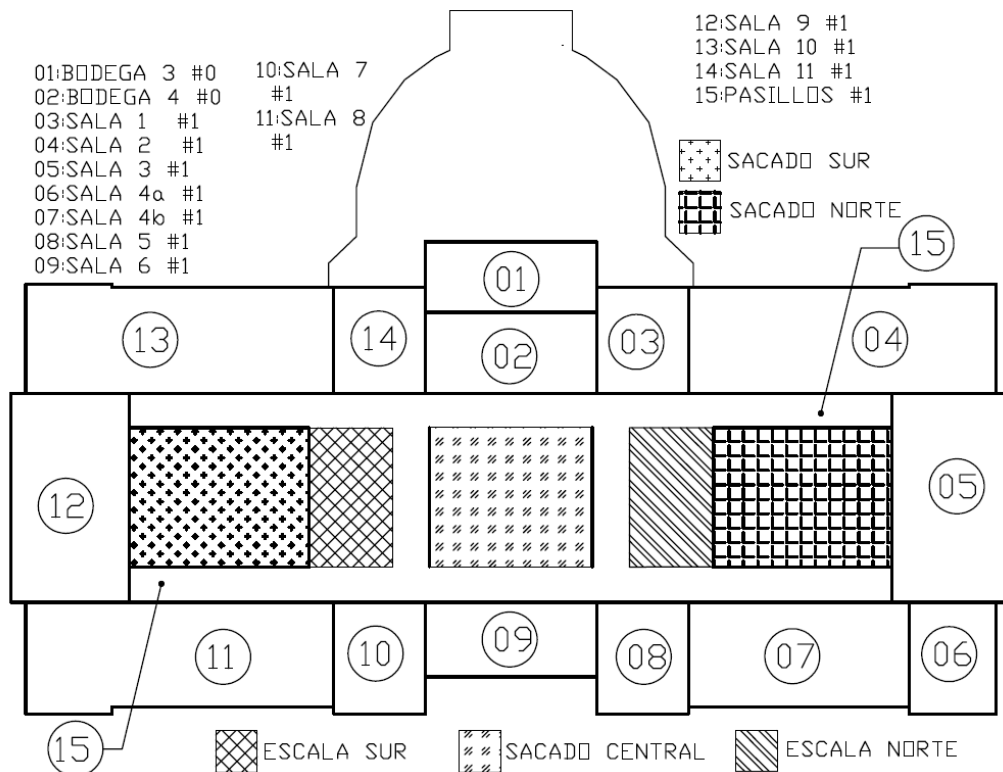


Figura 3.9: División interna de zonas para el piso 2.

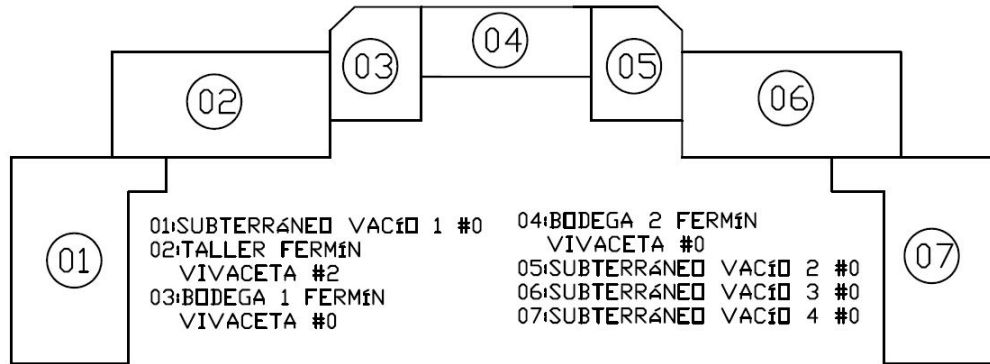


Figura 3.10: División interna de zonas para el subterráneo.

Cabe señalar que las zonas achuradas no numeradas en las figuras 3.8 y 3.9 no son de interés en el estudio térmico y es por eso que se configuran como *plenums*⁷

En el modelo 3D, el plano $z = 0$ corresponde al Suelo del Piso 1, con esto pueden definirse las verticales de cada planta:

Tabla 3.11: Distancias verticales del edificio y sus pisos.

	Límites	Altura [m]
Losa	Terreno-Suelo Subterráneo	0,35
Volumen Interior	Suelo Subterráneo-Cielo Subterráneo	2,65
Losa	Terreno-Suelo P1	0,35
Losa	Cielo Subterráneo-Suelo P1	0,35
Volumen Interior	Suelo P1-Cielo P1	5,05
Losa	Cielo P1-Suelo P2	0,35
Volumen Interior	Suelo P2-Cielo P2	4,8
Losa	Cielo P2-Suelo Cubierta Superior	0,35

La materialidad es muy similar, tanto muros como losas y separaciones están hechos en su gran mayoría con hormigón estructural con 1 % de acero, se eligió esta configuración para muros exteriores e interiores. Para losas entre pisos y sobre el terreno se modeló homogéneamente como hormigón estructural con una capa superior de cerámica.

⁷ plénum: espacio amplio que permanece térmicamente uniforme en toda su extensión y que no interactúa de forma relevante con volúmenes adyacentes.

Tabla 3.12: Resumen de materiales estructurales.

Capa	Espesor conjunto [m]	U global [W/m^2K]	Componentes	Espesor [m]
Muros Exteriores	0,7	1,68	Hormigón armado al 1% (exterior)	0,6
			Ladrillo	0,08
			Plancha de yeso (interior)	0,02
Muros Interiores	0,7	1,65	Plancha de yeso (interior)	0,01
			Hormigón armado al 1%	0,68
			Plancha de yeso (interior)	0,01
Cubiertas Planas	0,35	2,44	Hormigón armado al 1%	0,35
Losas	0,35	2,51	Cerámica (superior)	0,02
			Hormigón armado al 1%	0,33

Las separaciones entre zonas están delimitadas no sólo por paredes físicas sino que por aberturas y particiones virtuales, en el Anexo D se exhiben las figuras que indican los muros y las aperturas en la demarcación global. Las escaleras fueron modeladas como sacados en las losas, ignorando su influencia en la conformación del edificio.

Se despreció la participación de los entrepisos (ubicados entre el piso 1 y el 2) por escasa ocupación y por ser difíciles de incorporar como planta puesto que no ocupan toda la extensión, tal como se aprecia en la figura 3.11.

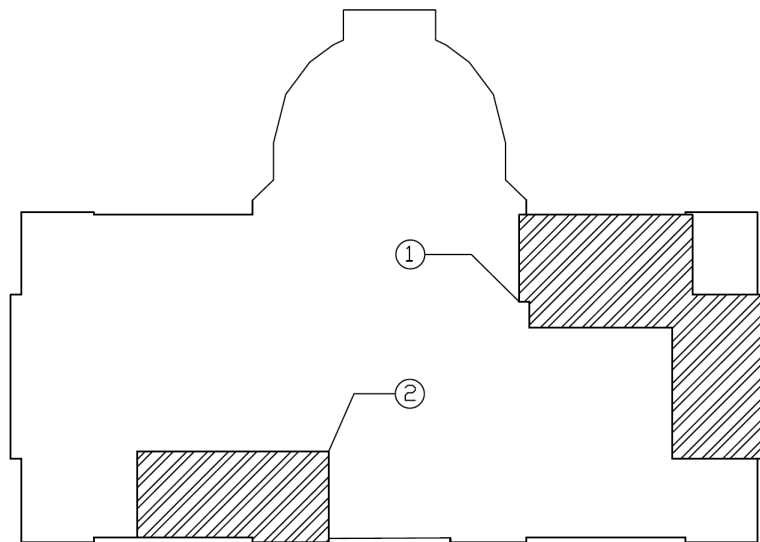


Figura 3.11: Entrepisos en achurado, con respecto al contorno del piso 1.

En las paredes del museo existen las llamadas “ventanas tapeadas” que son ventanas selladas que no se abren y que son tapadas por planchas de yeso para el aprovechamiento de superficie útil en las exposiciones. El sacado en el interior del “tapeo” constituye una irregularidad en la composición, debido a la presencia de aire estanco en el cual ingresa humedad en invierno. Para efectos del modelamiento esto es ignorado, quedando los muros homogéneos en su composición. En el Anexo D se muestra la distribución de ventanas tapeadas con respecto a las otras para los pisos 1 y 2.

3.3.2. Puertas, ventanas y techumbre

Tanto puertas como ventanas se distinguen entre interiores y exteriores, teniendo cada familia y sub-familia valores característicos de dimensiones, áreas y tiempos de apertura.

Tabla 3.13: Resumen propiedades de las puertas del modelo.

	Exteriores	Interiores
Ancho [m]	2	1,15
Altura [m]	2,8	2,2
Cantidad	3	30
Porcentaje de área de apertura	85 %	85 %
Porcentaje de tiempo de apertura	15 %	15 %

Las ventanas se modelaron rectangulares con una configuración de ventana formada por un vidrio y un marco metálico con un porcentaje de tiempo de apertura definido, distinguiendo entre las ventanas que siempre están cerradas y las que se abren durante el día.

Tabla 3.14: Resumen propiedades de las ventanas del modelo.

	Cerradas	Semiabiertas
Cantidad	28	13
Porcentaje de área de apertura	0 %	20 %
Porcentaje de tiempo de apertura	0 %	10 %

Los 4 tragaluces (también llamadas lucarnas) del edificio fueron modeladas como ventanas de cielo (exteriores) y no como techumbre, debido a que en el menú para el modelamiento de techos no estaba el policarbonato como material translúcido, sino que como uno opaco, por lo cual no dejaba atravesar la luz a través de éste. Estos tragaluces no tienen la geometría piramidal de la realidad, para efectos del modelo son planos.

Tabla 3.15: Resumen propiedades de los materiales de cristalería.

	Vidrio	Policarbonato
Espesor [mm]	6	5,8
$SHGC$	0,69	0,66
Fracción de transmisión de luz	0,74	0,49
U [W/m^2K]	1,96	5,24

La techumbre está formada por planchas de zinc ubicadas por sobre la cubierta plana que corresponde al cielo del piso 2. Materialmente se caracterizó como un techo compuesto.

Tabla 3.16: Resumen propiedades de la techumbre.

Espesor conjunto [m]	U global [W/m^2K]	Componentes	Espesor [m]
0,04	3,029	Plancha zincalum	0,01
		Gap de aire	0,02
		Plancha zincalum	0,01

Con todo esto, la geometría definitiva se muestra en la figura 3.12. Para visualizaciones más detalladas, ver el Anexo C.

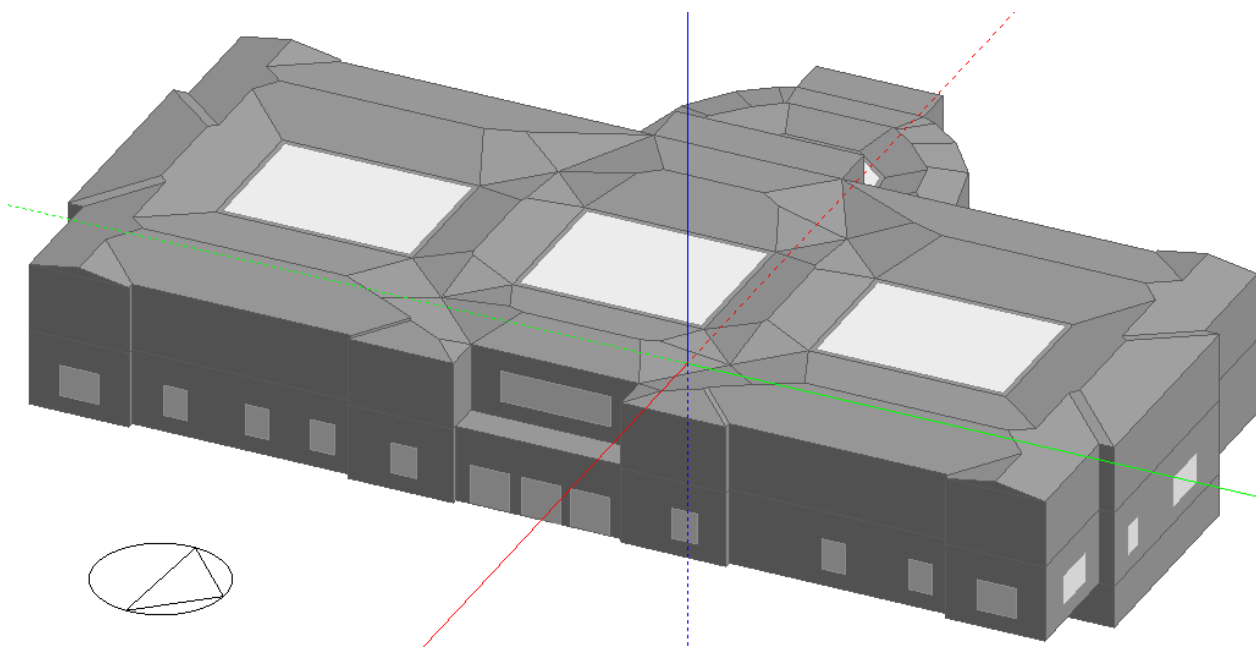


Figura 3.12: Vista isométrica computacional del edificio.

3.3.3. Ítems de consumo

A partir de la enumeración de equipos de la sección 2.3, el software segmenta en 5 categorías los equipos presentes. Son las siguientes:

- Cocina
- Equipos de Oficina
- Procesos
- Computadoras
- Misceláneos

Entre ellos comparten características, pues hay un aporte térmico al ambiente durante su encendido. Establecer estos valores está sujeto a mucha variabilidad, sin embargo se ocupará el criterio de que para el cálculo en interiores, las ganancias sensibles se distribuyen en un 70 % que se debe a radiación y el restante 30 % es por convección, criterio que se ocupará para relacionar las fracciones radiante y convectiva entre sí. Esto se ve modificado cuando el dispositivo cuenta con algún ventilador entre sus componentes, pasando a ser ambas fracciones iguales.

Para equipos de oficina se utilizará una fracción radiante de 13 % y para computadoras se ocupará el valor de 25 %. Para las demás fracciones radiantes se usará el valor que viene por defecto en *DesignBuilder* que es de 20 %. Todas las fracciones de pérdida se dejaron en 0 %.

Tabla 3.17: Fracciones de energía para cada ítem de consumo.

	FRACCIONES		
	Radiante	Convectiva	Pérdida
Cocina	20,00 %	8,57 %	0
Computadoras	25,00 %	25,00 %	0
Equipos de Oficina	13,00 %	5,57 %	0
Misceláneos	20,00 %	8,57 %	0
Proceso	20,00 %	8,57 %	0

Con esto, descontando la iluminación, la calefacción y los casos especiales del ítem 3.2.2, los artefactos registrados de la tabla 3.1 pasan a ordenarse de la siguiente forma:

Tabla 3.18: Asignación de los equipos a las categorías de consumo de *DesignBuilder*.

ARTEFACTO	CATEGORÍA	ARTEFACTO	CATEGORÍA
Hervidor	Cocina	Multifuncional	Eq. de Of.
Horno eléctrico	Cocina	Rack de comunicación	Eq. de Of.
Microonda	Cocina	Cargador de radiotransmisor	Misceláneos
Refrigerador	Cocina	Secador de pelo	Misceláneos
Computador de escritorio	Computadoras	Trapeador eléctrico	Misceláneos
Monitor LCD	Computadoras	Esmeril angular	Procesos
Notebook	Computadoras	Máquina de soldar	Procesos
Cargador de teléfono	Eq. de Of.	Sierra circular	Procesos
Equipo de audio	Eq. de Of.	Taladro	Procesos
Módem	Eq. de Of.	-	-

La iluminación interior se ingresa al programa según el tipo de foco presente en el recinto y con esto el software asigna una densidad de consumo (ver valores de la tabla 2.3) por este concepto. Es por lo anterior que no es necesario especificar la contabilidad de los focos ni la

potencia total de su conjunto. La disposición espacial se configura como suspendida.

En cambio, en la iluminación exterior si debe especificarse la potencia individual y la cantidad de estos focos. El programa hace esta distinción ya que la luminaria externa si bien influye en el consumo eléctrico, no aporta en ganancia térmica, como sí lo hacen las luces de interiores.

Mientras que la calefacción se rige por las temperaturas interiores (temperaturas consigna) activando el encendido de los equipos. Aquí tampoco es necesaria la potencia de calefacción eléctrica, sólo se ingresa el *COP* que en este caso se configura igual a 1 y el *SHR* = 0,99.

3.3.4. Zonificación de interiores

Dentro del análisis energético y térmico este concepto es diferenciador, la asignación de espacios en el interior según su función y con ello la presencia humana dentro de estos influyen en el confort térmico y en los consumos energéticos. La clasificación de los recintos es la siguiente:

- *Tipo 0*: Son aquellos que prácticamente no tienen asentamiento durante la jornada. Aquí están consideradas las bodegas y espacios cerrados como pasillos interiores.
- *Tipo 1*: Son los espacios ocupados por los visitantes del museo en su respectivo horario de visita: salas de exposición, pasillos de tránsito, *halls* ocupados para montaje y el anfiteatro. Aquí se distinguen dos casos: afluencia estándar y alta afluencia.
- *Tipo 2*: Se trata de los recintos que poseen ocupación permanente durante el día por parte de los guardias, personal administrativo, maestros y quienes trabajan en los talleres.

Para cada uno de los pisos expuestos y siguiendo la misma numeración correspondiente en las figuras 3.8, 3.9 y 3.10, se tiene la siguiente asignación:

Tabla 3.19: Cuadro resumen de las zonas del museo.

Categoría de ocupación	Cantidad de zonas	Superficie [m^2]
Tipo 0	16	1274,0
Tipo 1	22	3171,6
Tipo 2	10	631,4
TOTAL	48	5077,0

Teniendo en cuenta lo mostrado en la tabla 2.1, se muestra a continuación el detalle de cada uno de los recintos para las 3 plantas:

Tabla 3.20: Cuadro resumen zonificación subterráneo del museo.

Zona	Tag	Área [m^2]	Categoría
Subterráneo vacío 1	1	151,2	0
Taller Fermín Vivaceta	2	140,6	2
Bodega 1 FV	3	59,9	0
Bodega 2 FV	4	74,9	0
Subterráneo vacío 2	5	60,0	0
Subterráneo vacío 3	6	140,2	0
Subterráneo vacío 4	7	154,3	0
TOTAL		781,1	

Tabla 3.21: Cuadro resumen zonificación piso 1 del museo.

Zona	Tag	Área [m^2]	Categoría
Anfiteatro	1	361,0	1
Bodega 1	2	54,8	0
Baño mujeres	3	36,0	1
Baño hombres	4	36,0	1
Bodega 2	5	54,9	0
Documentación	6	130,2	0
Comodato	7	55,6	0
Pasillo cerrado	8	34,3	0
Conservación	9	83,6	0
Administración Violeta Parra	10	52,2	2
Hall Norte	11	140,0	1
Dirección MAC	12	97,2	2
Coordinación MAC	13	49,9	2
Educa MAC	14	33,9	2
Bodega Admin. MAC	15	38,8	0
Hall Entrada	16	100,9	1
Info y guardias	17	56,4	2
Espacios Comunes Maestros	18	37,0	2
Oficina Violeta Parra	19	52,0	2
Bodega Violeta Parra	20	39,2	0
Sala Moltem	21	56,6	2
Sala Violeta Parra	22	135,8	1
Hall Sur	23	139,9	1
Taller Violeta Parra	24	55,6	2
Sala 12	25	130,2	1
Pasillos	26	477,3	1
TOTAL		2539,3	

Tabla 3.22: Cuadro resumen zonificación piso 2 del museo.

Zona	Tag	Área [m^2]	Categoría
Bodega 3	1	68,3	0
Bodega 4	2	73,7	0
Sala 1	3	54,9	1
Sala 2	4	185,2	1
Sala 3	5	135,8	1
Sala 4a	6	56,6	1
Sala 4b	7	128,2	1
Sala 5	8	56,4	1
Sala 6	9	73,8	1
Sala 7	10	56,4	1
Sala 8	11	184,8	1
Sala 9	12	135,8	1
Sala 10	13	185,2	1
Sala 11	14	54,9	1
Pasillos	15	306,2	1
TOTAL		1756,5	

En base a esta categoría, se calcula la densidad de ocupación de cada tipo de zona. La ocupación de las zonas Tipo 0 se considera despreciable puesto que es intermitente y difícil de cuantificar. Reuniendo lo mostrado en las tablas 3.3, 3.4 y 3.19, se llega a que:

Tabla 3.23: Densidad de personas según zonificación.

Categoría de ocupación	Densidad de ocupación [$personas/m^2$]
Tipo 0	0
Tipo 1 Estándar	0,0177
Tipo 1 Alta Afluencia	0,0287
Tipo 2	0,0507

Otros parámetros que discrimina la zonificación es la presencia de calefacción, el tipo de iluminación presente y los requerimientos de iluminancia en esos espacios.

Por ejemplo, en las salas de exposición y lugares de tránsito no hay calefacción, sólo en las oficinas y espacios ocupados por el personal. Acerca de la iluminación, en las salas de exposición la luminaria es mayoritariamente LED mientras que en oficinas y pasillos la iluminación corresponde a tubos fluorescentes. La iluminancia mínima (E_{min} en [lux]) establecida para cada espacio se muestra a continuación.

Tabla 3.24: Valores de iluminancia mínimo para cada recinto según uso.

Zona		E_{min}	Zona		E_{min}	
Piso 1	Anfiteatro	300	Piso 2	Bodega 3	50	
	Bodega 1	50		Bodega 4	50	
	Baño mujeres	100		Sala 1	350	
	Baño hombres	100		Sala 2	350	
	Bodega 2	50		Sala 3	350	
	Documentación	50		Sala 4a	350	
	Comodato	50		Sala 4b	350	
	Pasillo cerrado	50		Sala 5	350	
	Conservación	50		Sala 6	350	
	Admin. Violeta Parra	300		Sala 7	350	
	Hall Norte	50		Sala 8	350	
	Dirección MAC	300		Sala 9	350	
	Coordinación MAC	300		Sala 10	350	
	Educa MAC	300		Sala 11	350	
	Bodega Admin. MAC	50		Pasillos	50	
	Hall Entrada	50		Subterráneo	Subterráneo vacío 1	50
	Info y guardias	300			Taller Fermín Vivaceta	300
	EECC Maestros	50			Bodega 1 FV	50
	Oficina VP	300	Bodega 2 FV		50	
	Bodega VP	50	Subterráneo vacío 2		50	
	Sala Moltem	300	Subterráneo vacío 3		50	
	Sala VP	300	Subterráneo vacío 4		50	
	Hall Sur	50				
	Taller VP	300				
	Sala 12	350				
	Pasillos	50				

La vestimenta y la tasa metabólica se configuran diferente para ambos tipos de ocupación. La ocupación fija corresponde a actividades de oficina y la visita son personas caminando a 0,6 [m/s] ritmo pausado.

Tabla 3.25: Vestimenta y tasa metabólica de los ocupantes.

		Visitas (Zona Tipo 1)	Ocup. Fija (Zona Tipo 2)
Vestimenta [clo]	Invierno	1,8	1,3
	Verano	0,4	0,7
	Otoño/Primavera	1	1
Tasa metabólica [met]		2	1,2

El equipamiento de las zonas también es diferente entre sí. Según la categoría de consumo de la tabla 3.18 se muestran las densidades de potencia calculadas para cada tipo de espacio:

Tabla 3.26: Densidades de potencia por ítem y por zona.

	Ítem	Zona Tipo 1	Zona Tipo 2
Densidad de potencia [W/m^2]	Cocina	0	0,25
	Computadoras	0	1,58
	Equipos de Oficina	0,15	0,25
	Misceláneos	0	0,89
	Procesos	0	1,22

3.3.5. Data climatológica

El programa cuenta con una biblioteca de archivos para diferentes zonas del planeta formato .csv para cada minuto de un año calendario adjuntando temperaturas, humedades, intensidades y ángulos de radiación solar, sin embargo algunos se encuentran desactualizados. Se elige Quinta Normal como base de datos pues es la estación de medición más cercana.

Como muestra de esto y conforme a lo explicado en el ítem 2.5.1, para el edificio modelado se muestran en la figura 3.13 las trayectorias del sol variando hora del día y época del año.

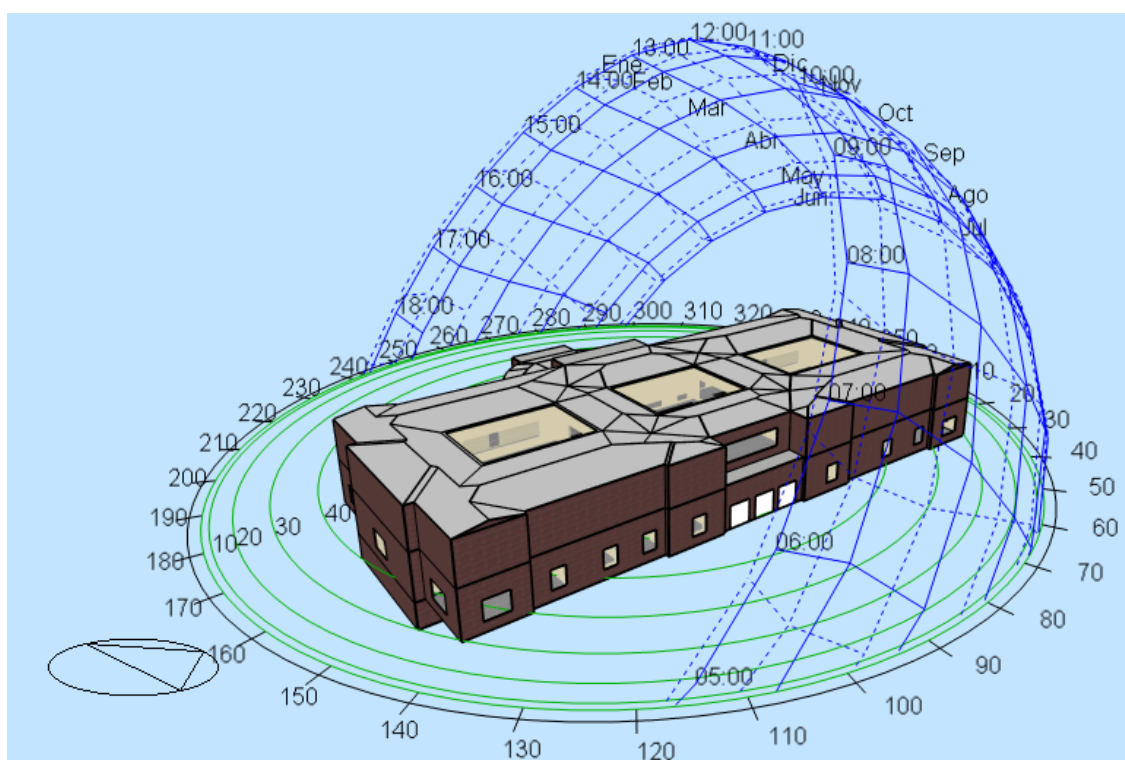


Figura 3.13: Diagrama de la radiación solar que recibe el edificio según hora del día y mes.

3.4. Simulación por periodos

La simulación global es la que representa un año calendario de 365 días, con estaciones diferenciadas y con ello, demandas térmicas variables como calefacción por las temperaturas

ambientes del exterior y horas de luz por día (un día en verano necesita menos luz debido a la mayor duración del día). Mientras que las simulaciones específicas se centran en periodos críticos, puesto que el edificio no presenta problemas de enfriamiento en verano, la simulación específica se focalizará en invierno, puntualmente en julio donde esta estación alcanza su apogeo y en enero para contrastar las características ambientales.

EnergyPlus realiza los cálculos anuales con un paso $\Delta t = 1$ hora, sin embargo debido al volumen de datos involucrado, en este caso se muestran resultados promedios mensuales. Por otro lado, simulaciones específicas como meses y días se ejecutan con un $\Delta t = 30$ minutos.

3.5. Otros parámetros de simulación

Además de los valores ya calculados, el modelo necesita otros para su ejecución:

- Consignas de calefacción: Son las temperaturas objetivo a las cuales quieren llegar los ocupantes de un espacio cuando encienden la calefacción.
- Consignas de ventilación natural: Es la temperatura en la cual los ocupantes del espacio abren las ventanas exteriores.

A continuación se muestran los valores establecidos para todas las simulaciones realizadas.

Tabla 3.27: Resumen de consignas de temperatura para ejecutar la simulación.

		Ocupación Fija [$^{\circ}C$]	Visitas [$^{\circ}C$]
Consignas de calefacción	Primaria	24	20
	Secundaria	21	17
Consigna de Ventilación Natural		28	28

Además del aforo de visitantes entre estándar y alta afluencia, otra de las variables para el análisis de sensibilidad es la tasa de renovación de aire, la cual se trabajará entre 0,5 y 5 [ren/hr] puesto que en ausencia de ventilación mecánica en el edificio, no se justifican valores tan elevados como los mostrados en la tabla 2.6. Se trabaja con la diferencia de presión entre el interior y el exterior que tiene el programa por defecto $\Delta p = 50[Pa]$.

Capítulo 4

Resultados

4.1. Simulación principal

Esta simulación se realizó para alta afluencia de visitas y con tasa de renovación de aire de 2,2 [ren/hr], valor escogido por estar dentro del rango admisible. Las planillas detalladas asociadas a estos gráficos y tablas se encuentran en el Anexo F.2. Señalar que la unidad de energía empleada para expresar consumos y flujos de calor es el [kWh], siendo 1 [kWh] = 3,6 [MJ].

4.1.1. Consumo eléctrico

En esta sección se muestra el detalle mensual de cada ítem de consumo, el total anual y el porcentaje de consumo mensual. Recordar que en la sección 3.2.2, se calcularon consumos que el programa no consideró para ser añadidos.

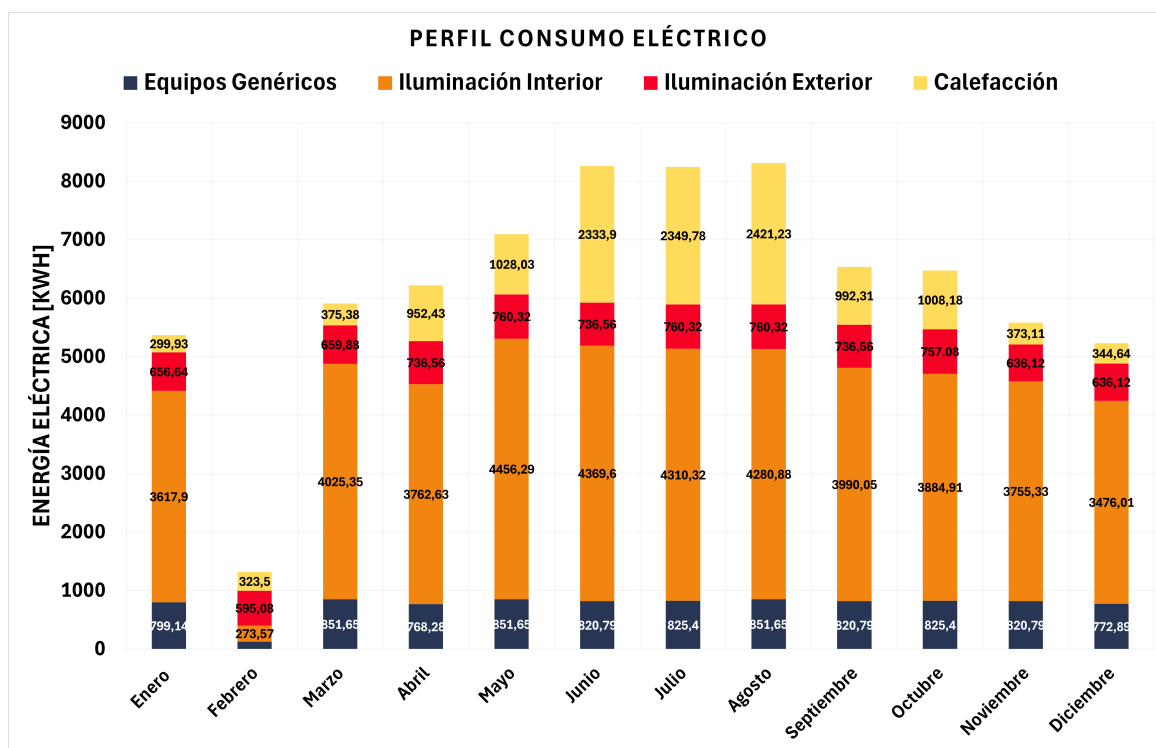


Figura 4.1: Consumos eléctricos simulados para cada mes.

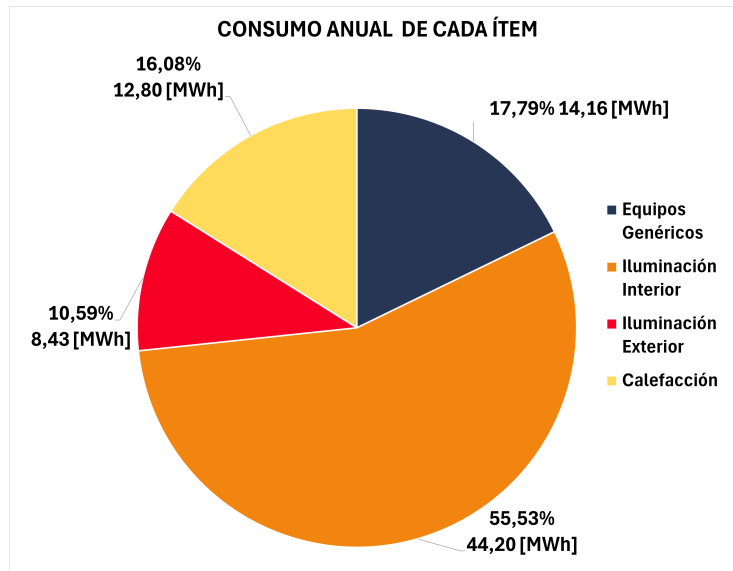


Figura 4.2: Distribución de consumos para un total anual simulado de 79,6 [MWh].

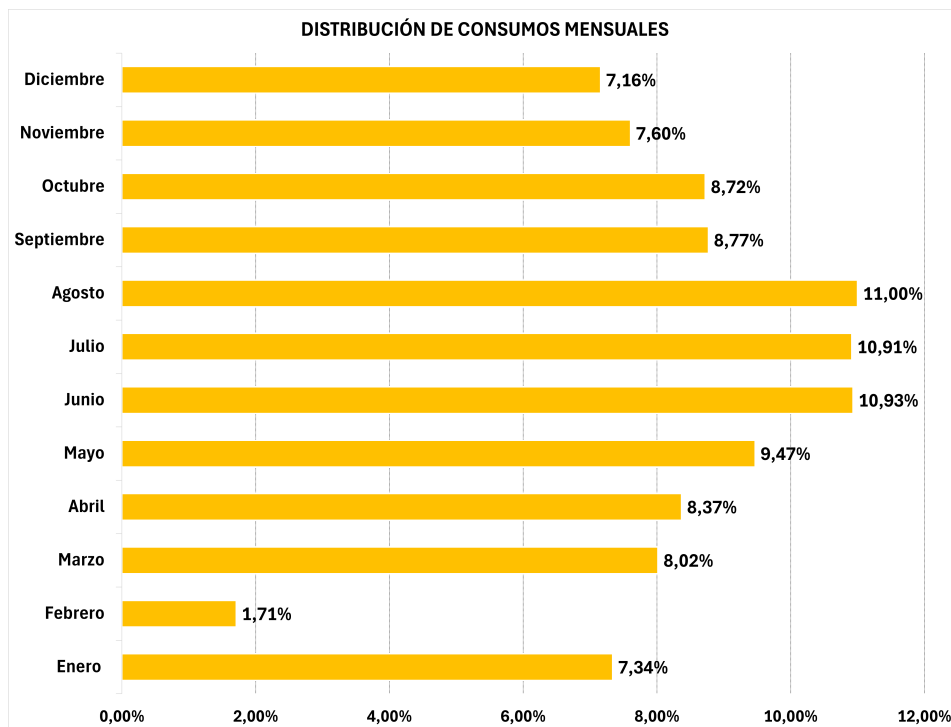


Figura 4.3: Distribución porcentual mensual de consumos simulados.

Se compara mes a mes y el total anual con respecto a lo entregado por ENEL.

Tabla 4.1: Comparación entre los consumos simulados y lo entregado por ENEL en la figura 3.5.

Meses	Consumo simulado [kWh]	Consumo 2023 [kWh]	Variación porcentual
Enero	5841,85	6000	-2,64 %
Febrero	1361,49	3000	-54,62 %
Marzo	6380,5	5700	11,94 %
Abril	6660,84	6300	5,73 %
Mayo	7537,23	7500	0,50 %
Junio	8701,79	9000	-3,31 %
Julio	8686,76	9300	-6,59 %
Agosto	8755,02	8700	0,63 %
Septiembre	6980,65	8400	-16,90 %
Octubre	6943,81	6900	0,63 %
Noviembre	6053,59	7500	-19,29 %
Diciembre	5697,9	6600	-13,67 %
TOTAL	79601,43	84900	
Variación porcentual anual	-6,24 %	Promedio (valores absolutos)	11,37 %

4.1.2. Ganancias térmicas

Las ganancias térmicas se dividen en 6 ítems, sobresale claramente el aporte de la radiación solar que atraviesa las ventanas exteriores, en su gran mayoría debido a las lucarnas.

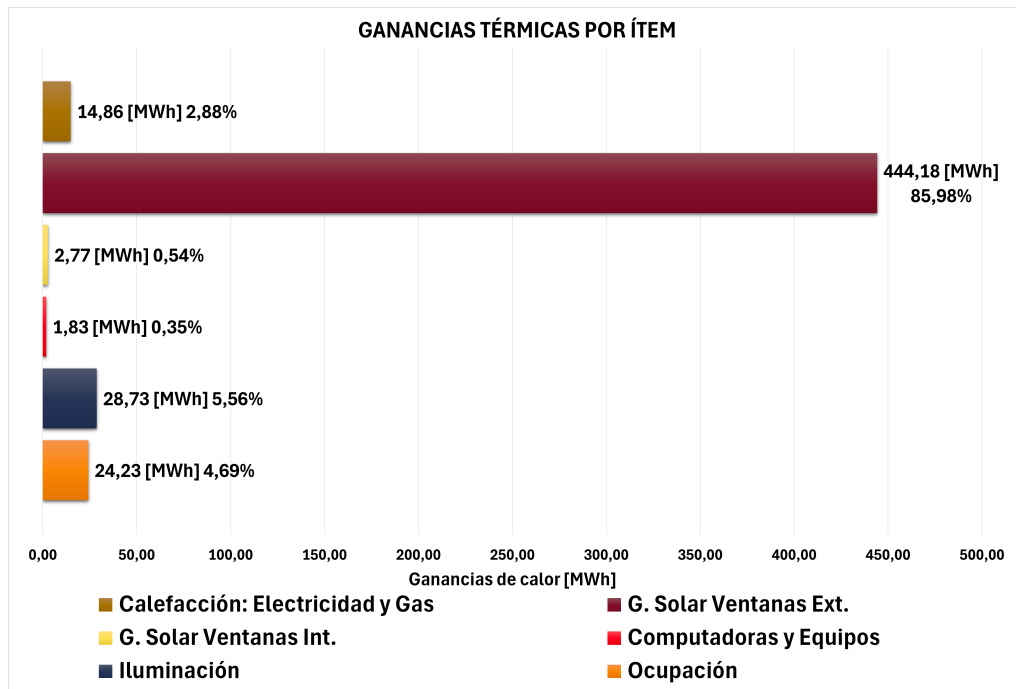


Figura 4.4: Desglose de ganancias anuales por ítem.

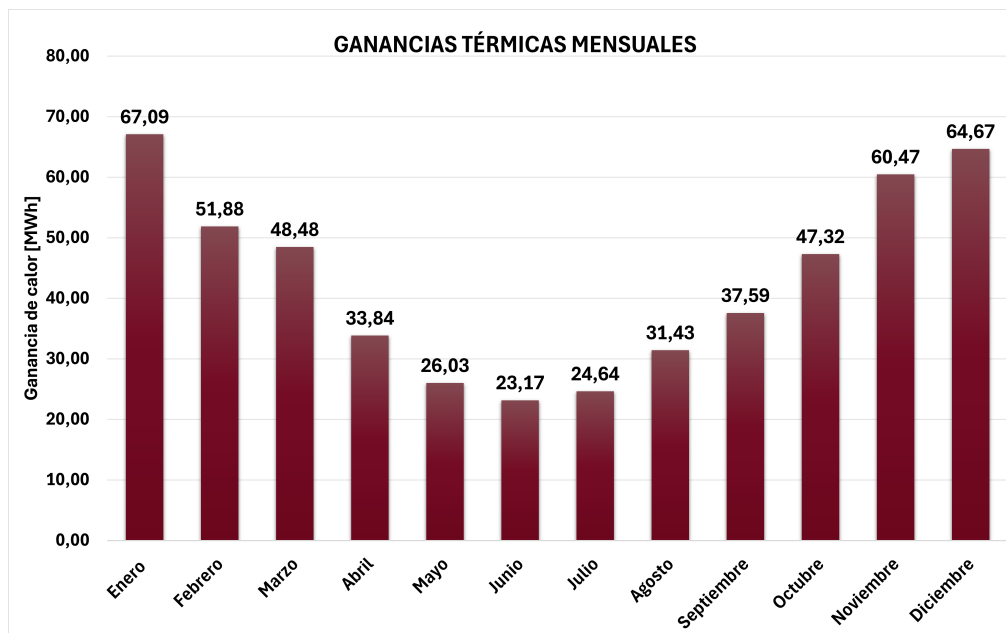


Figura 4.5: Ganancias totales mensuales.

4.1.3. Balance de calor

El balance de calor está ordenado por cada uno de los componentes estructurales y muestra si en estos se produce una ganancia o fuga térmica. Cabe señalar que los valores mostrados es el resultado del balance anual por componente estructural.

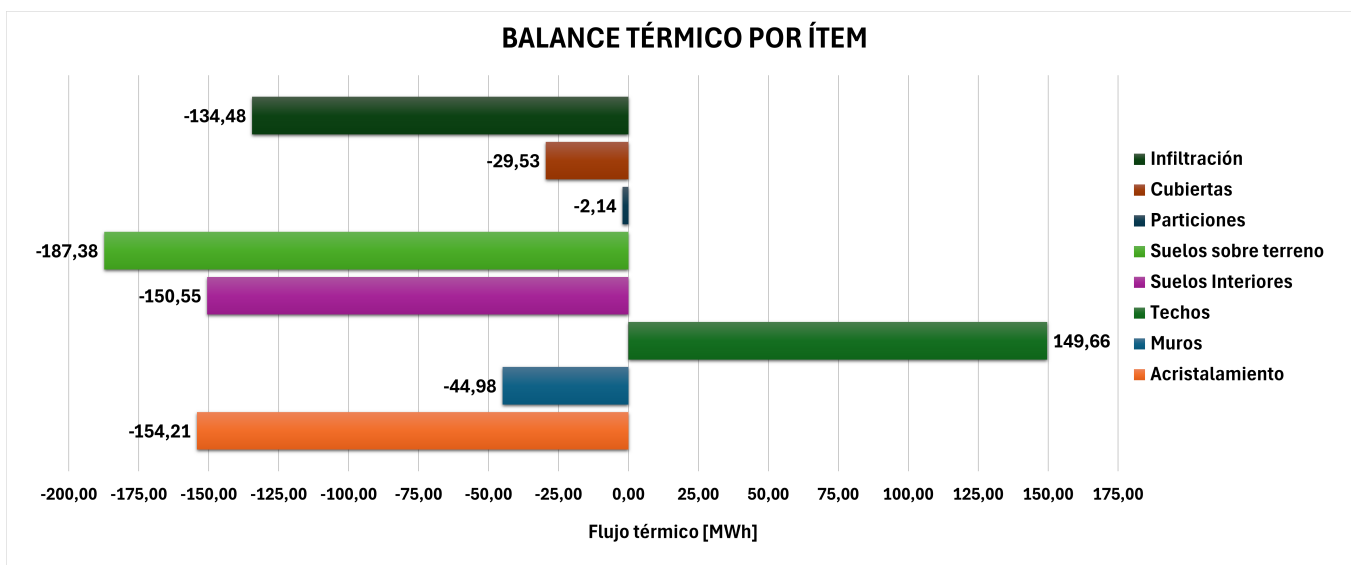


Figura 4.6: Balance térmico por ítem anual.

Analizando mes a mes se obtiene un balance para todos los componentes estructurales.

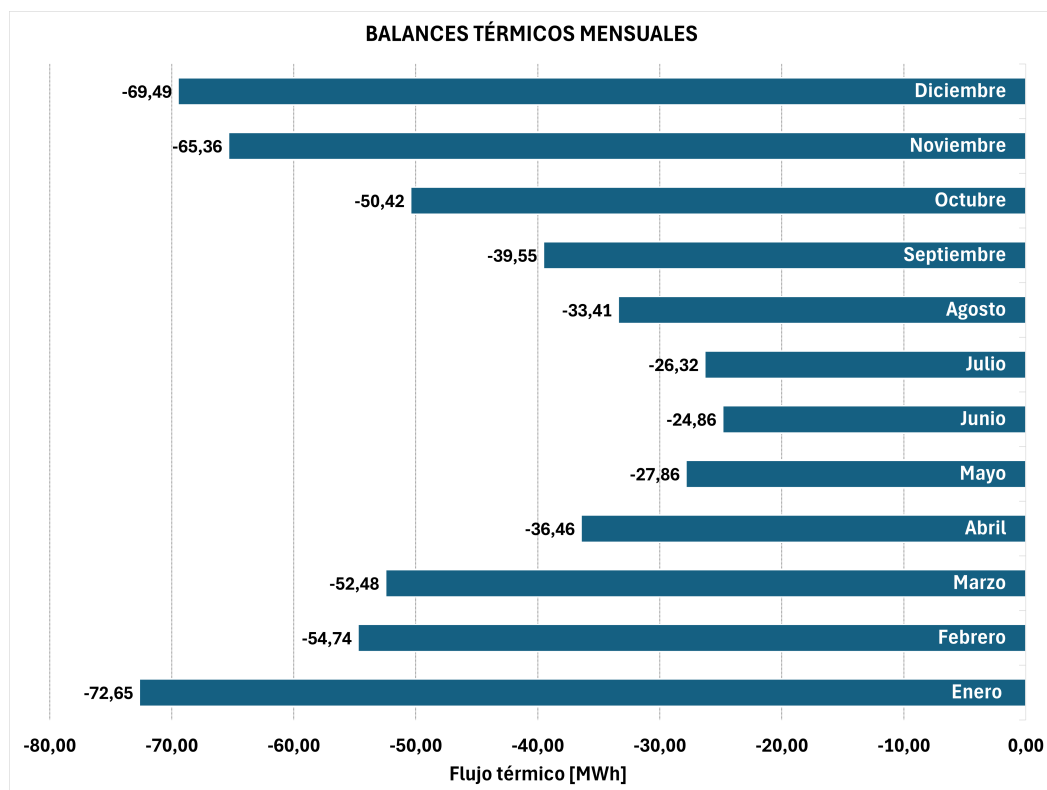


Figura 4.7: Balances térmicos mensuales netos.

En la siguiente tabla se muestra el signo del flujo de calor para cada mes.

Tabla 4.2: Signo del flujo de calor según mes del año, + indica ganancia y – fuga/pérdida.

	E	F	M	A	M	J	J	A	S	O	N	D
Acristalamiento	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Muros	+	+	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Techos	+	+	+	+	-	-	-	-	+	+	+	+
Suelos Interiores	-	-	-	-	+	+	+	+	-	-	-	-
Suelos sobre terreno	-	-	-	-	+	+	+	+	-	-	-	-
Particiones	-	+	+	+	+	+	+	-	-	-	-	-
Cubiertas	+	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Infiltración	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-

4.1.4. Confort interior

Se muestran los valores obtenidos, según lo explicado en las secciones 2.4.1.1 y 2.4.1.2. Se incluye el porcentaje de tiempo de desconfort de los ocupantes ya sean fijos o visitantes, para un total de 328 horas (26 días laborales de 12 horas más 4 domingos de 4 horas, producto del cambio de turno de los guardias).

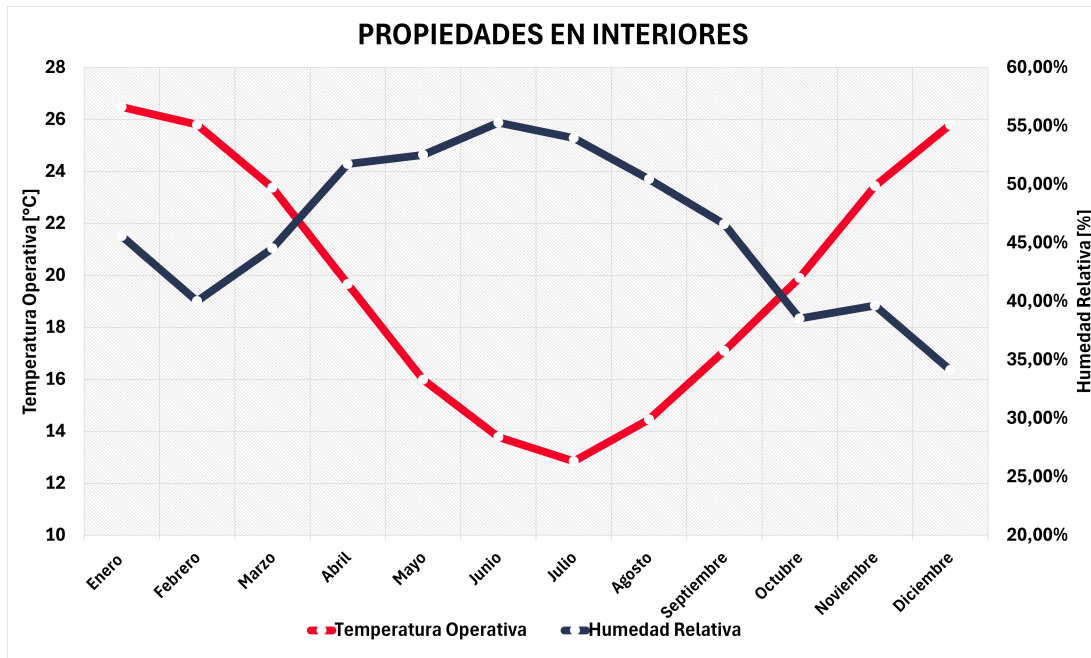


Figura 4.8: Temperatura operativa y Humedad relativa, ambas promedios mensuales para todo el edificio.

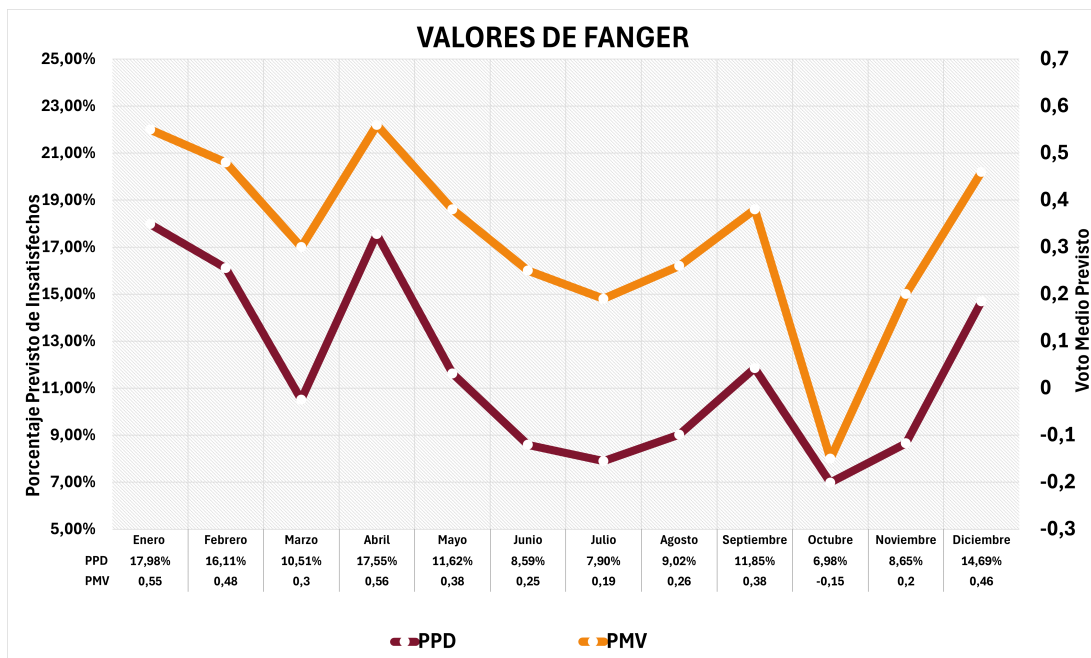


Figura 4.9: Parámetros PPD y PMV de Fanger para confort térmico.

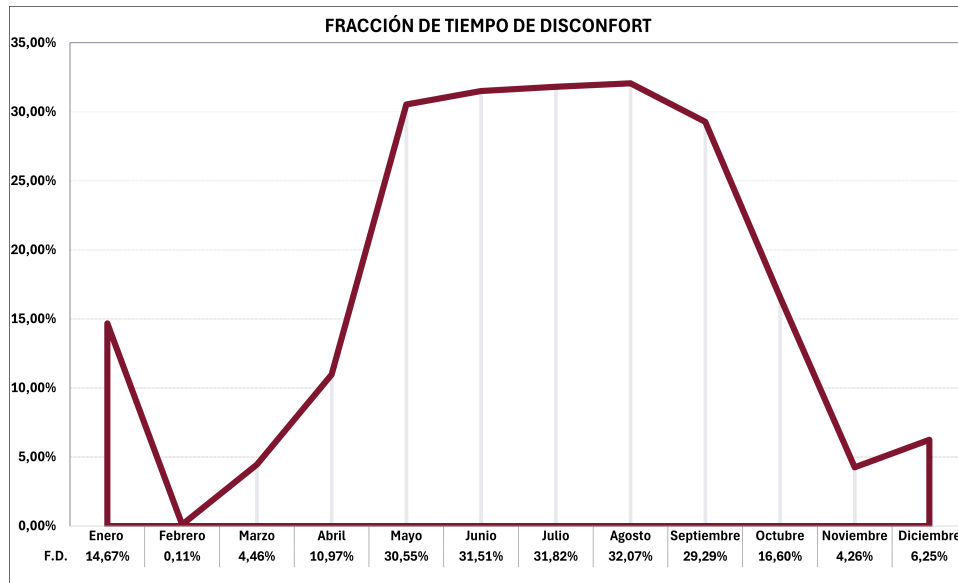


Figura 4.10: Fracción de tiempo de discomfort para un mes de 328 horas operativas.

4.2. Simulación en periodos reducidos

Una variación de la simulación principal consiste en focalizarse en una ventana de tiempo más corta. En este caso se elige julio ya que es el mes que presenta el máximo consumo en las cuentas de ENEL, con un 10,95 % para el 2023.

4.2.1. Resultados por zona

Se muestran los valores promedio mensual de cada uno de los recintos internos, en base a la división explicada en las figuras 3.8, 3.9 y 3.10.

Se muestran estos resultados en formato tabla:

Tabla 4.3: Condiciones ambientales promedio de las zonas del piso 1 durante julio.

NIVEL	ZONA	TAG	Humedad Relativa [%]	Temperatura Operativa [°C]
Piso 1	Anfiteatro	1	60,8	14,11
Piso 1	Bodega 1	2	61,72	13,62
Piso 1	Baño mujeres	3	55,8	15,25
Piso 1	Baño hombres	4	55,74	15,27
Piso 1	Bodega 2	5	60,48	13,94
Piso 1	Documentación	6	61,54	13,74
Piso 1	Comodato	7	58,84	14,32
Piso 1	Pasillo cerrado	8	55,6	15,15
Piso 1	Conservación	9	57,2	14,93
Piso 1	Admin. Violeta Parra	10	55,75	15,56
Piso 1	Hall Norte	11	54,66	15,87
Piso 1	Dirección MAC	12	55,86	15,58
Piso 1	Coordinación MAC	13	54,52	15,76
Piso 1	Educa MAC	14	53,92	15,9
Piso 1	Bodega Admin. MAC	15	57,68	14,67
Piso 1	Hall Entrada	16	59,37	14,31
Piso 1	Info y guardias	17	54,87	15,62
Piso 1	EECC Maestros	18	55,47	15,58
Piso 1	Oficina Violeta Parra	19	54,95	15,58
Piso 1	Bodega Violeta Parra	20	57,47	14,7
Piso 1	Sala Moltem	21	59,45	14,48
Piso 1	Sala Violeta Parra	22	61,99	13,66
Piso 1	Hall Sur	23	54,99	15,76
Piso 1	Taller Violeta Parra	24	59,86	14,35
Piso 1	Sala 12	25	60,02	14,16
Piso 1	Pasillos	26	55,46	15,46

Tabla 4.4: Condiciones ambientales promedio de las zonas del piso 2 y del subterráneo durante julio.

NIVEL	ZONA	TAG	Humedad Relativa [%]	Temperatura Operativa [°C]
Piso 2	Bodega 3	1	68,58	11,9
Piso 2	Bodega 4	2	62,62	13,31
Piso 2	Sala 1	3	63,88	13,08
Piso 2	Sala 2	4	64,77	12,93
Piso 2	Sala 3	5	60,43	14,01
Piso 2	Sala 4a	6	61,55	13,68
Piso 2	Sala 4b	7	61,89	13,62
Piso 2	Sala 5	8	62,69	13,37
Piso 2	Sala 6	9	64,82	13,02
Piso 2	Sala 7	10	62,29	13,47
Piso 2	Sala 8	11	64,41	12,95
Piso 2	Sala 9	12	65,78	12,62
Piso 2	Sala 10	13	65,68	12,64
Piso 2	Sala 11	14	65,49	12,68
Piso 2	Pasillos	15	60,7	13,94
Subte	Subterráneo vacío 1	1	53,11	16,05
Subte	Taller Fermín Vivaceta	2	47,73	18,21
Subte	Bodega 1 FV	3	51,16	16,31
Subte	Bodega 2 FV	4	51,28	16,52
Subte	Subterráneo vacío 2	5	52,4	16,21
Subte	Subterráneo vacío 3	6	52,42	16,21
Subte	Subterráneo vacío 4	7	51,61	16,54

4.2.2. Días específicos

La gran ventaja que ofrece simular para un día puntual es que permite visualizar la tendencia que se da durante el día, en este caso se registró la humedad relativa y la temperatura ambiental a nivel de edificio, de pisos y de zonas de almacenamiento del museo.

4.2.2.1. 13 de julio

Se escogió el día 13 de julio como representativo de la temporada de invierno.

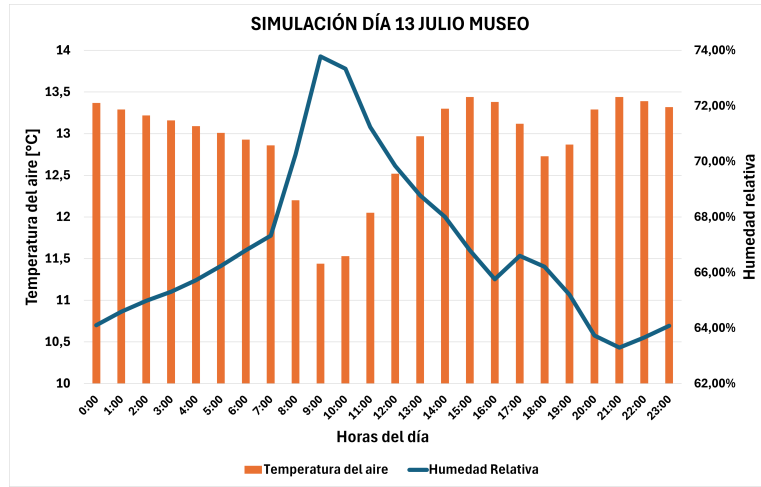


Figura 4.11: Registro ambiental horario de todo el museo para día de invierno.

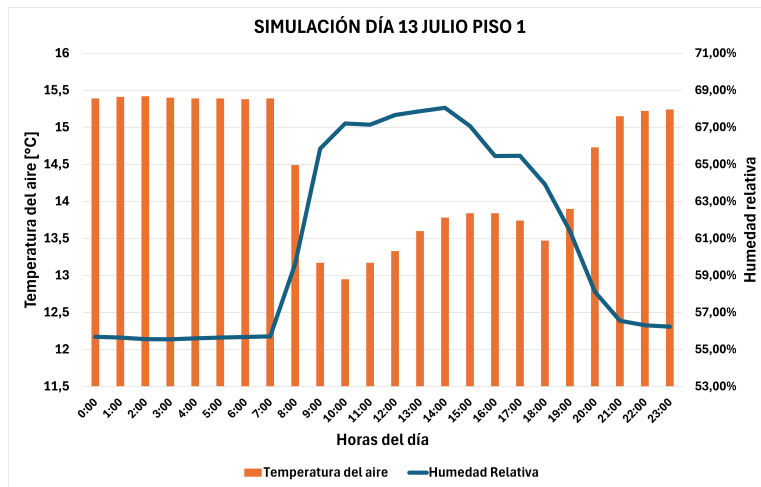


Figura 4.12: Registro ambiental horario del piso 1 para día de invierno.

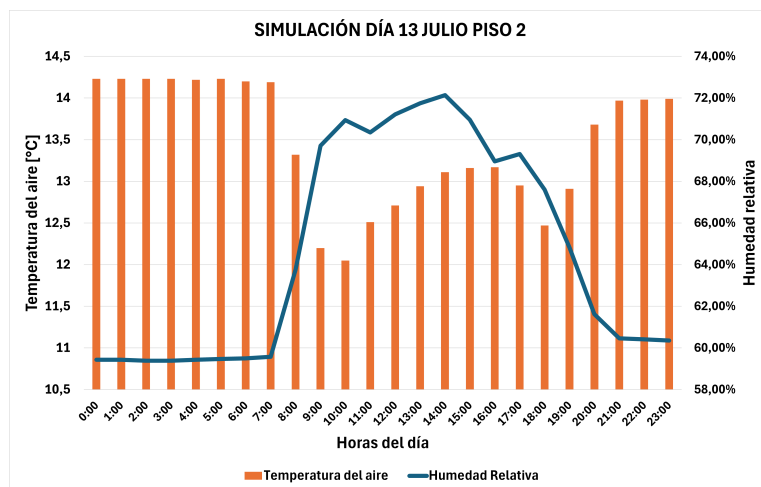


Figura 4.13: Registro ambiental horario del piso 2 para día de invierno.

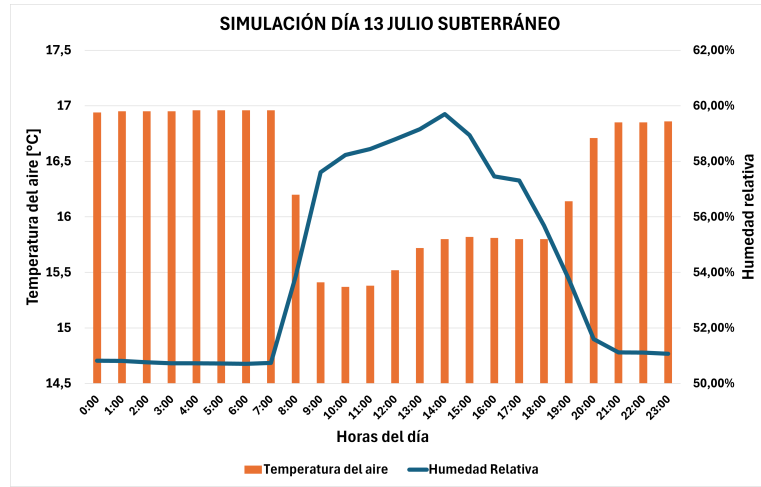


Figura 4.14: Registro ambiental horario del subterráneo para día de invierno.

4.2.2.2. 16 de enero

Como contraparte de la simulación de invierno, se realizó una simulación horaria para un día veraniego, tomando el día 16 de enero como referencia.

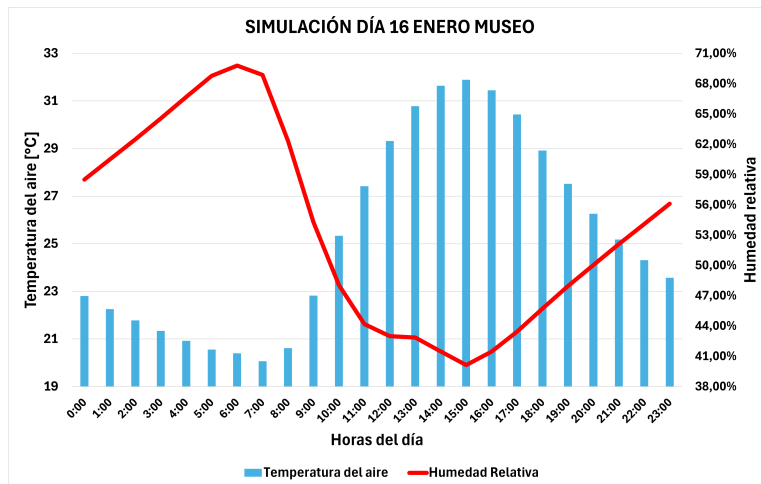


Figura 4.15: Registro ambiental horario de todo el museo para día de verano.

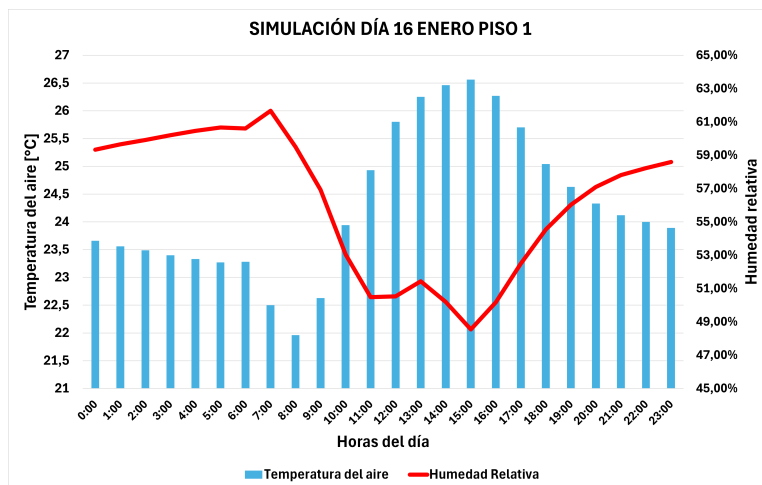


Figura 4.16: Registro ambiental horario del piso 1 para día de verano.

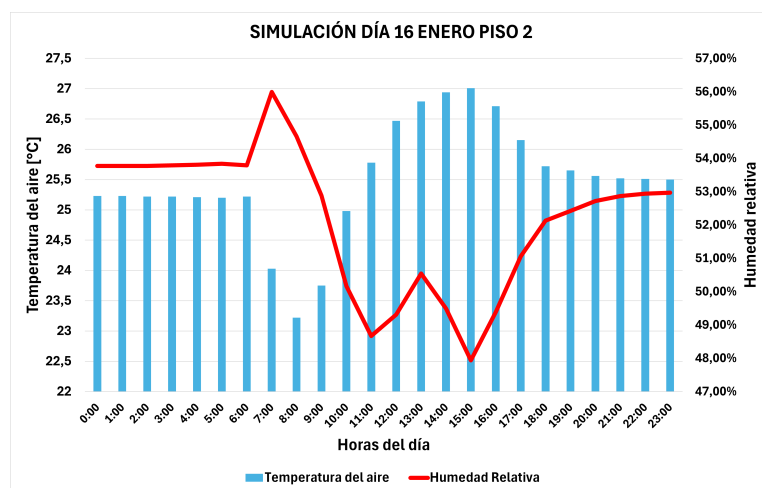


Figura 4.17: Registro ambiental horario del piso 2 para día de verano.

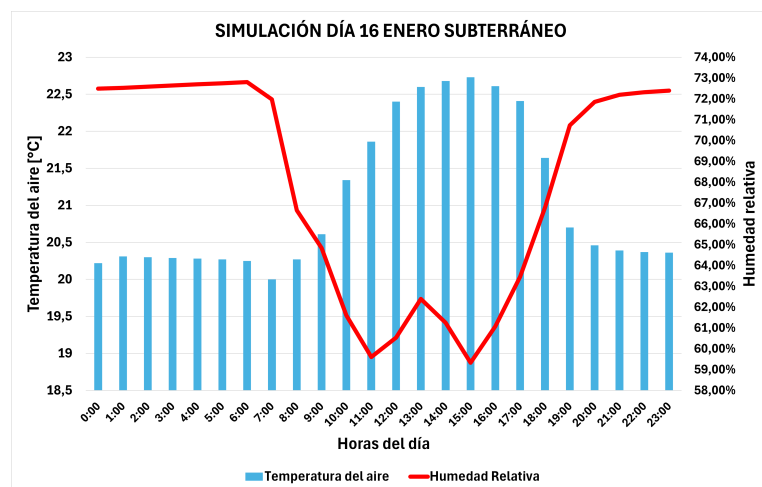


Figura 4.18: Registro ambiental horario del subterráneo para día de verano.

En el Anexo G.1 se encuentran los gráficos de habitaciones destinadas a almacenamiento para ambos días representativos de sus temporadas climáticas respectivas.

4.3. Análisis de sensibilidad

4.3.1. Cantidad de visitantes

Esta variable a sensibilizar se escogió ya que la presencia de personas influye en la contabilización de cargas térmicas. Se configura cambiando solamente el valor para la densidad de ocupación (tabla 3.23) y se plotea el mismo set de resultados que se hizo en la sección 4.1. Se mantiene la tasa de renovaciones de 2,2 [ren/hr]. A continuación los gráficos más interesantes para este análisis.

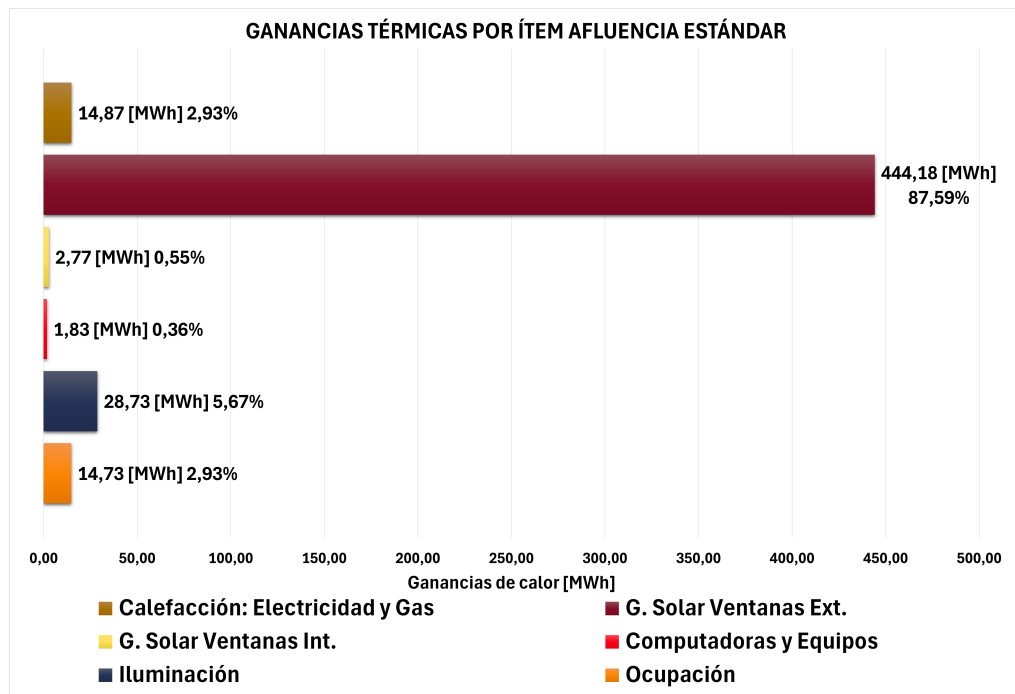


Figura 4.19: Desglose de cargas térmicas por ítem caso afluencia estándar.

El gráfico anterior tiene su similar en la figura 4.4. Comparativamente se muestra el aporte térmico de los visitantes para ambos regímenes de ocupación.

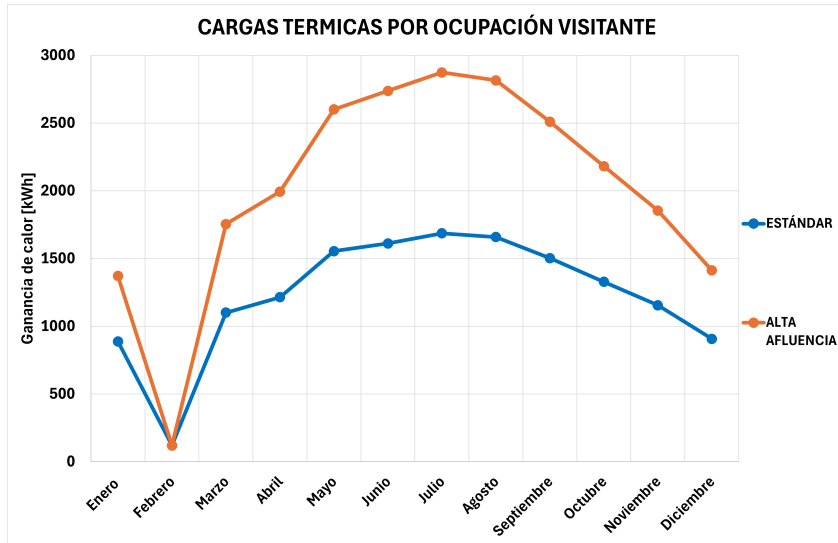


Figura 4.20: Comparación entre cargas térmicas producidas por el cambio de densidad de ocupación visitante.

4.3.2. Tasa de infiltración

Como se mencionó en la sección 3.5 el rango de variación de esta variable estará entre $0,5$ y 5 [ren/hr], tomando 5 valores. Acá se fija la densidad de visitas para caso Alta Afluencia.

A partir de lo mostrado en la figura 4.1, el consumo eléctrico se ve incrementado al aumentar la tasa de renovación, siendo prácticamente iguales los consumos mensuales para $0,5$ [ren/hr] y para $1,25$ [ren/hr].

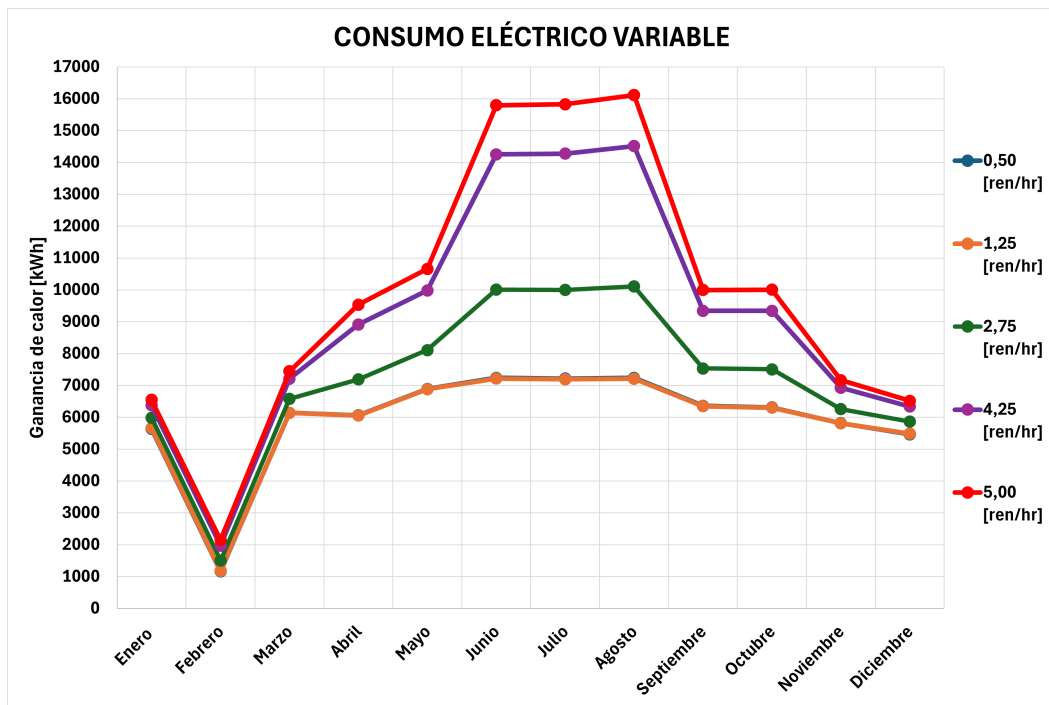


Figura 4.21: Comparación entre los consumos para tasa de renovación variables.

El aumento en el consumo eléctrico se debe exclusivamente al aumento en gasto de calefacción, es por esto que tomando como referencia la figura 4.4 se muestra cómo varía la carga por calefacción, manteniéndose las otras ganancias prácticamente iguales.

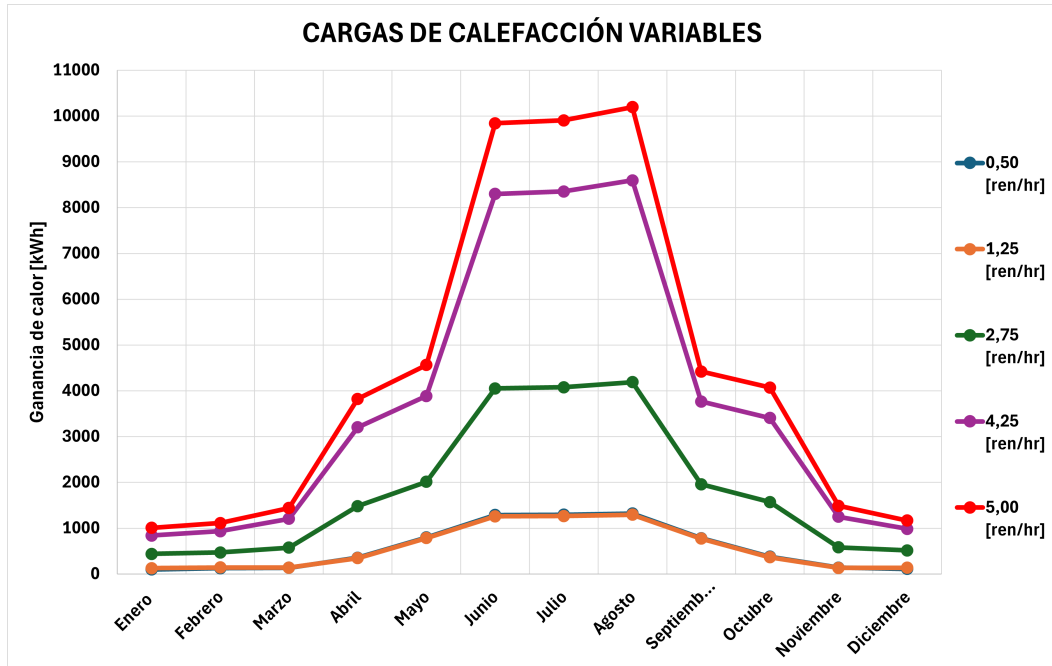


Figura 4.22: Cargas de calefacción totales para tasas de renovación variables.

El balance térmico también se ve influido al jugar con las renovaciones, principalmente las pérdidas por infiltraciones y por consiguiente el balance neto. El detalle ítem por ítem se muestra en el Anexo G.3.

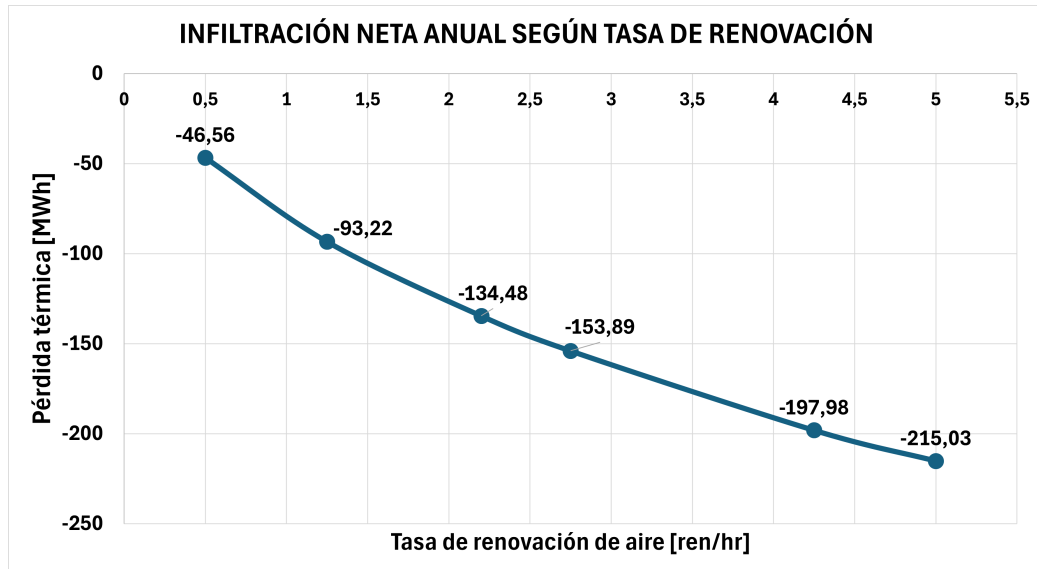


Figura 4.23: Línea de tendencia entre las pérdidas por infiltración y las tasas de renovación.

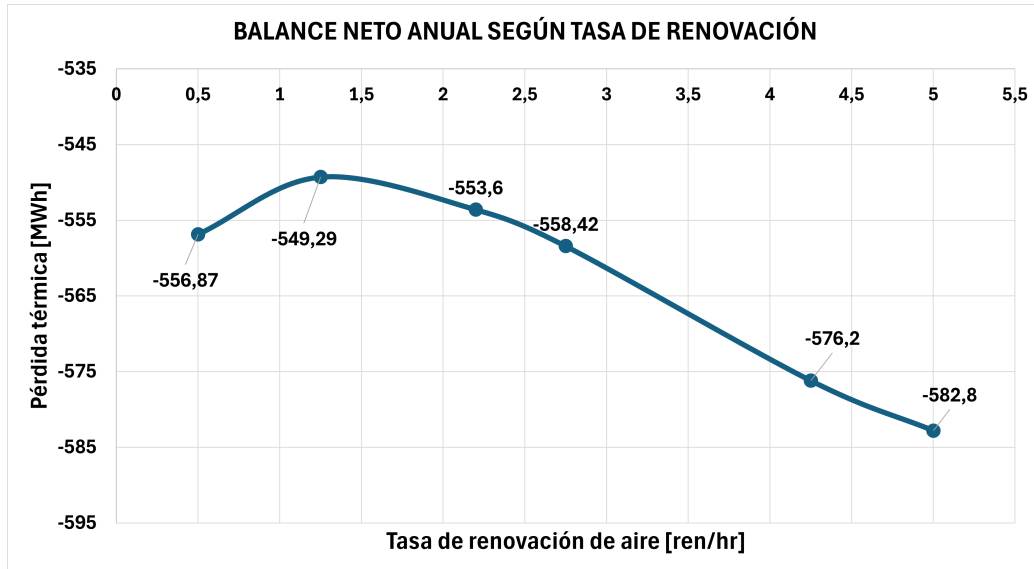


Figura 4.24: Línea de tendencia entre los balances térmicos netos anuales y las tasas de renovación.

4.4. Iluminación Natural

Si bien la iluminación natural no figura como un aspecto del análisis, resulta interesante observar cuánta luz reciben los espacios interiores del edificio durante el año, sabiendo la superficie que abarcan las lucarnas del edificio y para conocer también otras funcionalidades que ofrece el software, como el motor de simulación *Radiance*.

La configuración para este tipo de simulación difiere de las anteriores ya que *DesignBuilder* realiza un registro anual con $\Delta t = 1$ [hora] para los periodos de ocupación (entre 8:00 y 21:00) de la iluminancia promedio que recibe un elemento de $10\text{ cm} \times 10\text{ cm}$ de la grilla para las plantas de interés.

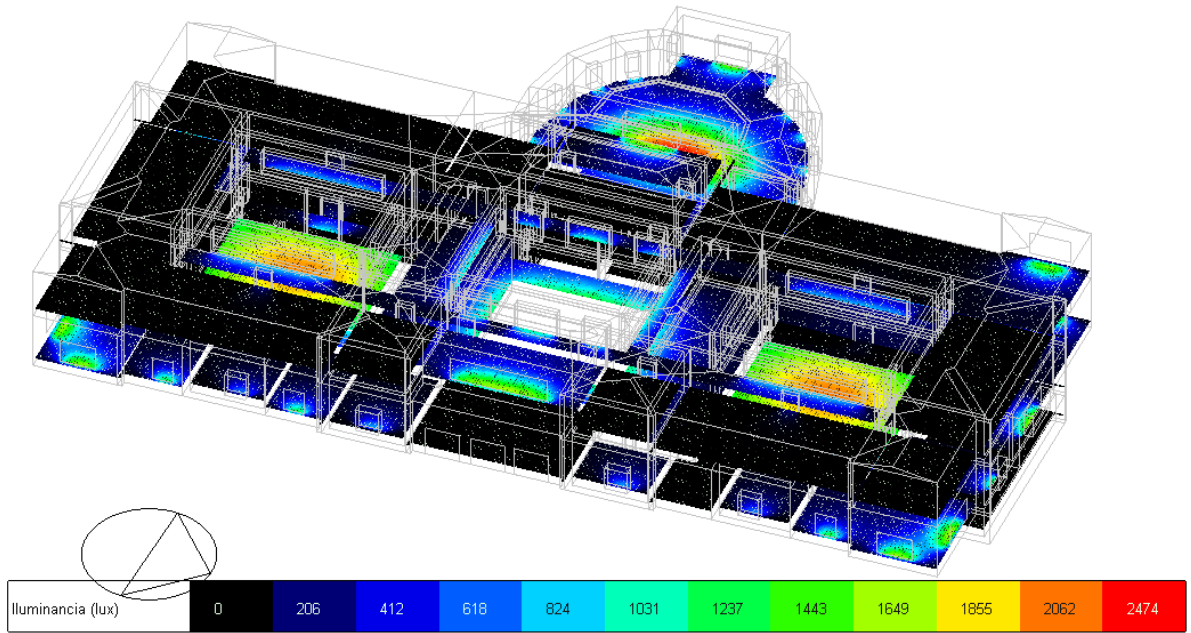


Figura 4.25: Mapeo de iluminancia promedio natural para el edificio.

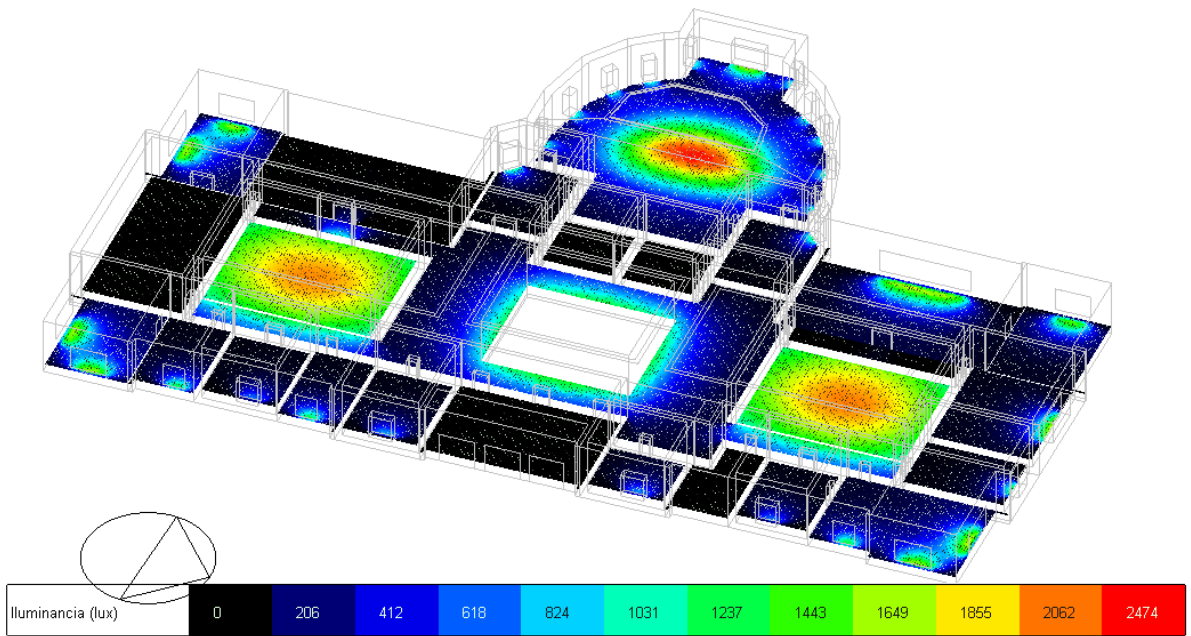


Figura 4.26: Mapeo de iluminancia promedio para el piso 1.

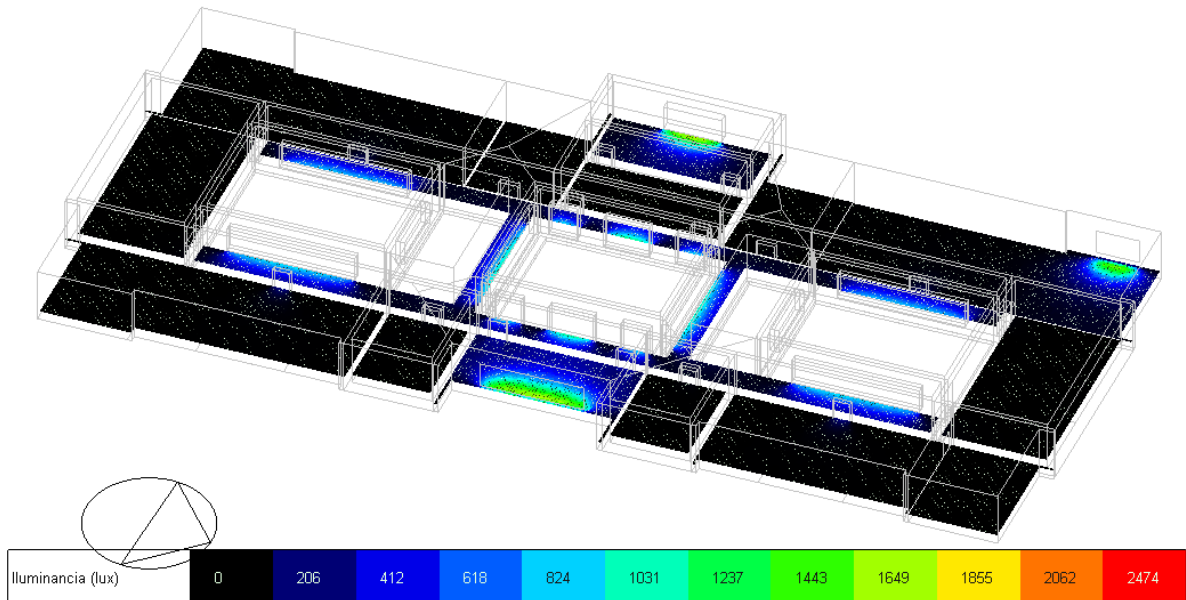


Figura 4.27: Mapeo de iluminancia promedio para el piso 2.

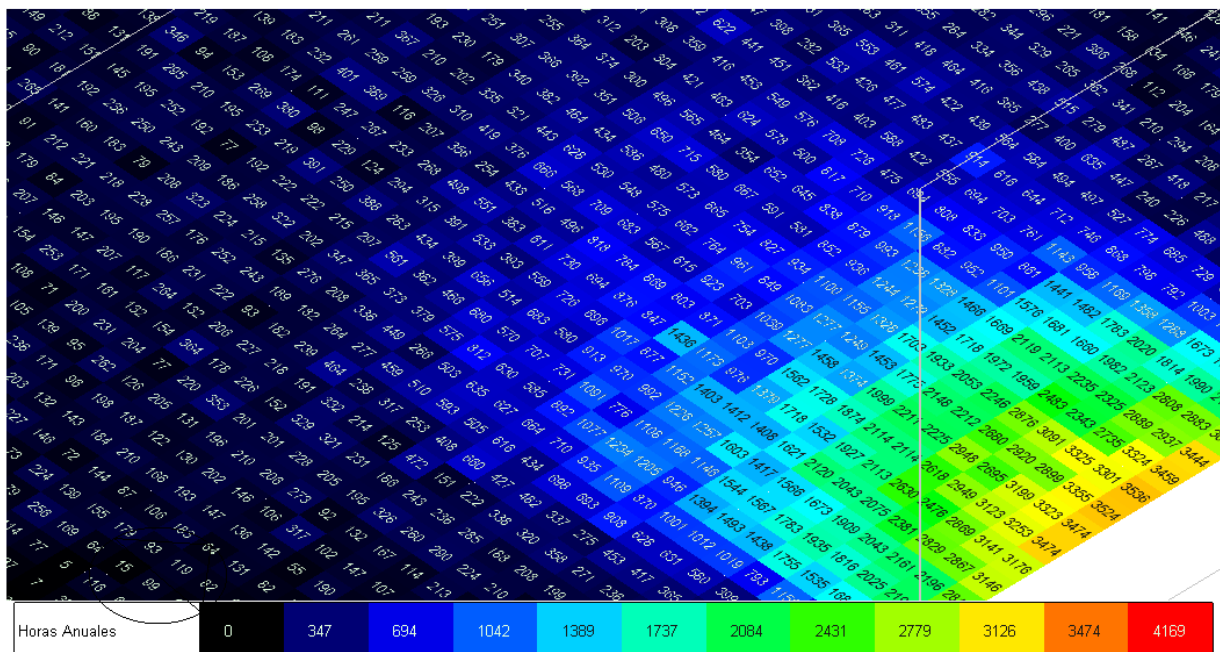


Figura 4.28: Detalle grilla de simulación con *Radiance*.

También en la misma ventana horaria se muestra un porcentaje de horas con respecto un total anual de 5045 horas al año, en las que las superficies interiores reciben más de 50 [lux].

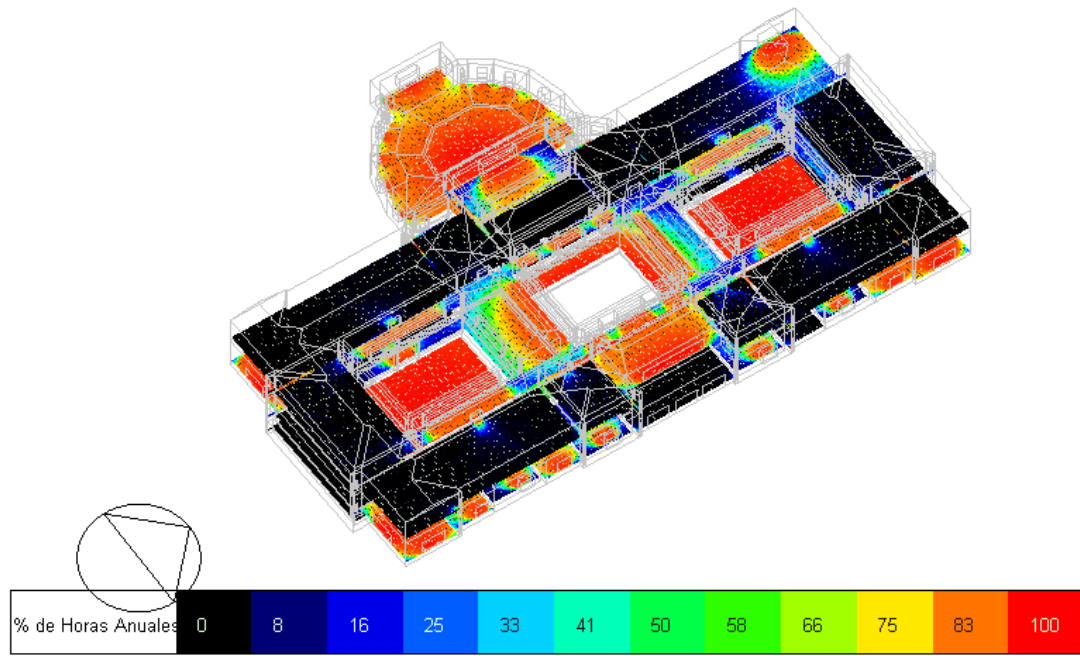


Figura 4.29: Mapeo de iluminancia sobre 50 [*lux*] para el edificio.

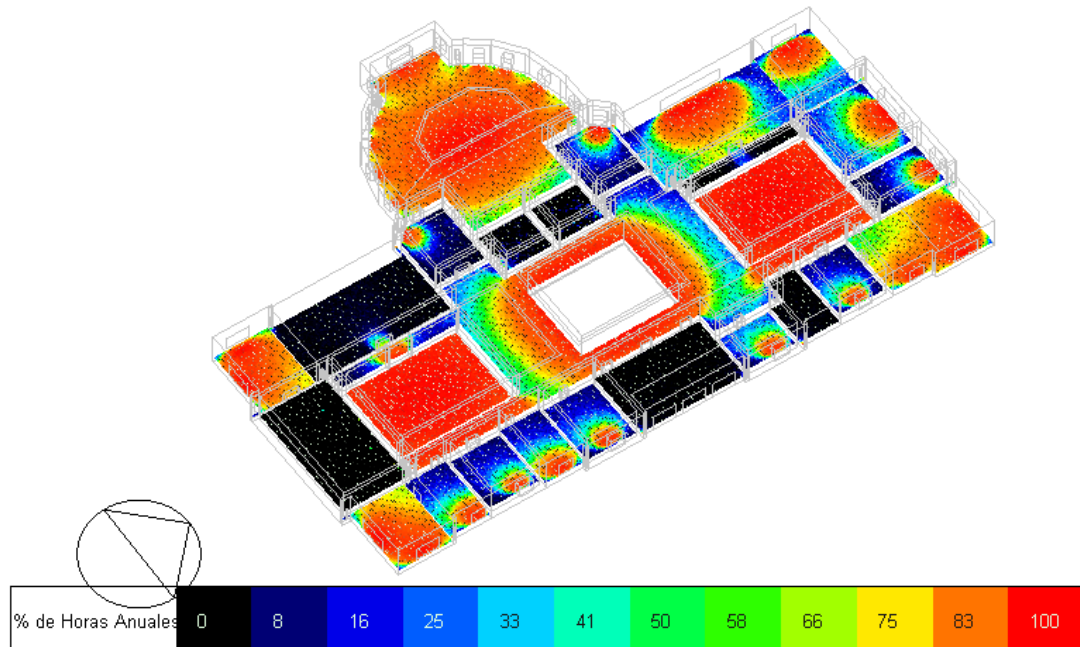


Figura 4.30: Mapeo de iluminancia sobre 50 [*lux*] para el piso 1.

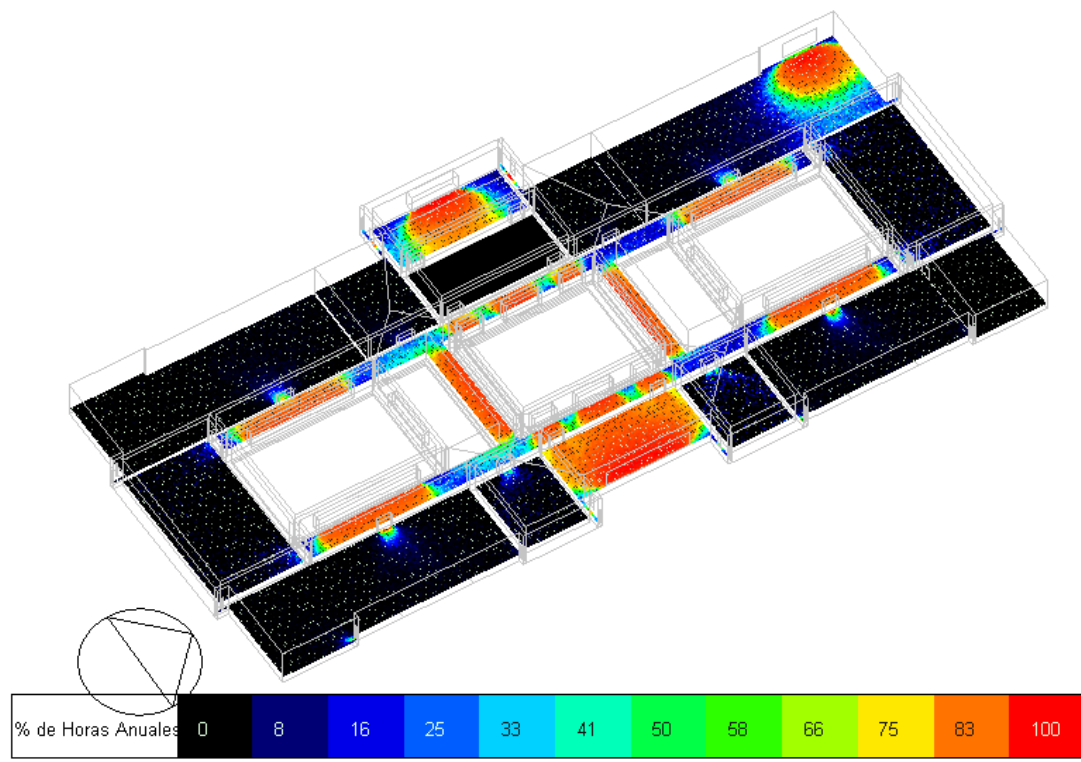


Figura 4.31: Mapeo de iluminancia sobre 50 [lux] para el piso 2.

Capítulo 5

Análisis y Discusión

Con respecto a la simulación de consumos, se observa una tendencia similar entre la figura 3.5 y la figura 4.1 con meses de alto consumo durante el invierno que se atribuyen a la calefacción y al aumento de horario de iluminación de interiores por reducción de los horarios de la luz solar, sin embargo con amplias diferencias en los meses de primavera: septiembre, octubre y noviembre (ver tabla 4.1) y sobretodo en febrero donde el consumo simulado está muy por debajo del que muestra la compañía, siendo este mes el que tiene la mayor brecha.

Relacionado a este ítem de simulación, los datos mostrados en la tabla 3.6 presentan un perfil parecido al mostrado en la figura 4.3 con la misma excepción del mes de febrero. Si bien en dicho mes hay una circulación muy reducida debido a únicamente la presencia de los guardias, y vacaciones de todo el personal administrativo, no se condice con lo entregado por la compañía, esto puede deberse a que ante cambios muy bruscos en el consumo, la compañía tiende a calcular un promedio para el mes fuera de la norma, febrero en este caso, en vez de cobrar monto por el consumo efectivo.

Los resultados entregados por la línea base también sirven para comparar cómo está distribuido el patrón de consumo, ya que su utilidad radica en considerarla en términos de orden de magnitud, no para cifras precisas, teniendo en cuenta además que elementos como la red de alarmas y el circuito cerrado de cámaras no fueron incluidos, lo que repercute en una diferencia en comparación a los datos oficiales.

La tasa de renovaciones por hora escogida para la simulación principal fue un ensayo-y-error permanente dentro de los límites razonables para esa variable. Elegir valores muy bajos, cercanos a $0,5 [ren/hr]$ hubiera sido poco verídico pues el edificio posee circulación de personas y por consiguiente apertura de las puertas de acceso mientras que por el otro extremo elegir valores altos alrededor de $5 [ren/hr]$, era poco realista ya que la ventilación del recinto se debía exclusivamente a los flujos por cambios de presión mínimos entre el exterior y el interior sin el aporte que significaría una red de ventilación mecánica. Jugando dentro de ese rango el valor de $2,2 [ren/hr]$ resultó entregar consumos eléctricos parecidos a los exhibidos en las cuentas y por esto, ese “match” fue el que fijó el resto de las simulaciones de otros ítem como confort, ganancias y balances de calor.

En las cargas térmicas resulta sorprendente ver el mayoritario porcentaje por concepto de ganancias solares de las ventanas exteriores (ver figura 4.4) con casi un 86 %. Coherente con

aquello, se ve en la figura 4.5 que el total de ganancias térmicas aumenta en verano y disminuye en invierno siguiendo el mismo régimen que posee el sol para nuestra estacionalidad geográfica. En los meses de invierno, la ganancia solar por ventanas que dan al exterior es prácticamente un tercio de las que se registran en meses como diciembre o enero, lo que se debe compensar con el uso de estufas y mayor abrigo de ropa.

En el gráfico 4.1 se observan consumos eléctricos por calefacción aún en los meses de verano, esto se debe a que las temperaturas de consigna configuradas, para el software, activan la calefacción, por ejemplo una mañana de verano que posee una baja temperatura comparativa hará la calefacción se encienda, comportamiento que en la realidad no ocurre.

Otra discrepancia en cuanto a los consumos simulados con respecto a los oficiales se muestra en los meses de noviembre y diciembre (ver tabla 4.1) con porcentajes de error $-19,29\%$ y $-13,67\%$, siendo ambos meses comparables también con el cálculo de línea base resumido en la tabla 3.10, del cual ambos meses distan mucho. Este delta en los consumos puede ser explicado por la ejecución de montajes y obras de reacondicionamiento de salas que ocurrieron en noviembre y en parte de diciembre del 2023. En dicha oportunidad, como en otras preparaciones, se realizaron pruebas de iluminación y uso intensivo de herramientas como taladros, lo que conlleva un consumo eléctrico adicional que escapa a la tendencia proyectada.

El apartado de balances térmicos resulta ser muy interesante, tanto en la simulación original como en lo que arroja para el análisis de sensibilidad. En primer lugar en el balance térmico mostrado en la figura 4.6 para la simulación principal se observa que solamente 1 de los 8 componentes estructurales (Techos) posee balance positivo mientras que todos los demás contabilizan pérdidas, esta ganancia se debe a la transmisión de calor vía conducción por los techos descontando las lucarnas que, como se dijo anteriormente, se contabilizan como ventanas.

En este mismo análisis se observa en la tabla 4.2 (y con mayor amplitud en Anexo G.3) que hay 2 componentes estructurales que solamente ocasionan pérdidas de calor los 12 meses del año: acristalamiento e infiltración, en donde el primero fluctúa poco al variar las renovaciones de aire (entre $-172,74[MWh]_{th}$ para $0,5 [ren/hr]$ y los $-141,5[MWh]_{th}$ de $5,0 [ren/hr]$) y el segundo sí muestra una correlación marcada como se aprecia en la figura 4.23 al aumentar en un $361,83\%$ entre el valor mínimo y máximo de renovaciones.

Ligado a esto, merece atención la participación de los suelos tanto los interiores como los sobre terreno en el balance térmico, los cuales actúan como fuente de calor en los meses de invierno y como fuga térmica en la temporada de verano. En los balances anuales, las pérdidas por suelos sobre terreno están en 1º o 2º lugar, esto se debe a que en el modelo computacional el subterráneo está completamente rodeado por el terreno y este último tiene contacto directo con la losa del piso 1 generando un intercambio conductivo directo al seno del edificio. En la realidad, el nivel del terreno no está en la misma cota que el piso 1 sino que se encuentra 80 cms más abajo de este (por eso hay una escalinata en el acceso principal), pero para efectos del modelamiento estructural, el terreno y la losa del piso 1 están al mismo nivel.

En el gráfico 4.24 se observa una pérdida anual mínima de $-549,29[MWh]_{th}$ para $1,25 [ren/hr]$ contrario a lo que podría suponerse que a más alta la tasa, mayores son las pérdidas

en su conjunto, siendo un valor singular dentro de los balances.

Con respecto al confort térmico, en el gráfico 4.8 las temperaturas operativas promedio del interior están dentro del rango de los 12°C y 27°C siguiendo la estacionalidad climática, mientras que la humedad relativa presenta un comportamiento inusual en febrero donde esta variable es menor que los meses de enero y que se atribuye al cierre del museo a público, ya que baja el aporte de humedad de los ocupantes por respiración o sudoración y la apertura de puertas se reduce casi en su totalidad.

El gráfico de confort térmico 4.9 muestra un PMV en torno a la sensación neutra, aún en periodos de invierno con máxima desviación en los meses de enero y abril con $PMV = 0,55$ y $PMV = 0,56$ respectivamente lo que señala una ligera sensación cálida en dichos meses, mientras que los meses de mayo hasta agosto si bien la temperatura baja el PMV se acerca a cero, que se debe al aporte de la calefacción, la mayor cantidad de ropa de los ocupantes y la menor apertura de ventanas. En octubre hay una caída tanto del PPD como del PMV que se puede atribuir al cambio de estación de invierno a primavera.

Lo anterior puede no ser coherente con lo que muestra el gráfico 4.10 en donde el tiempo de disconfort térmico para los meses de mayo a septiembre está sostenidamente en torno al 30%. Este disconfort se debe a los lugares de ocupación de visita como salas de exposición y lugares de tránsito (tipo 1) no cuentan con calefacción mientras que las zonas de ocupación fija (tipo 2) sí poseen estufas y otros artefactos que aportan carga térmica como computadores y elementos de oficina.

5.1. Recomendaciones de eficiencia energética

Las recomendaciones de eficiencia energética se sintetizan en dos puntos:

1. Reducción de los consumos de iluminación interior: ya sea la iluminación de espacios de tránsito o la cantidad de focos en las salas de exposición, este ítem representa en condiciones normales, la que agrupa los mayores gastos energéticos (ver gráfico 4.1 y la sección G.2 de Anexos). Para los pasillos y lugares de circulación se aconseja reemplazar los tubos fluorescentes por focos LED y ajustar los horarios de encendido para aprovechar la iluminancia exterior que entrega los horarios de sol, como se muestra en los gráficos de la sección 4.4 o yendo más lejos inclusive pensar en retirar la luminaria en dichos lugares. Para las salas, resultaría útil incorporar pinturas con mayor reflectividad, de modo que la cantidad de focos montados en sala sea menor aprovechando el rebote de la luz dentro del espacio de exposición.

En términos de simulación, tomando como referencia el gráfico 4.2, al eliminar el encendido para pasillos interiores en meses de verano, sumado a la reducción del horario de encendido para los meses de otoño y primavera en 3 horas (8:00-10:00 y 18:00-19:00) y además cambiado el tipo de foco de Fluorescente a LED, se disminuye en un 8,57% el consumo de este ítem, pasando de 44,2[MWh]_e a 40,41[MWh]_e totalizando un nuevo consumo anual de 75,8[MWh]_e.

2. Reducción de los gastos en calefacción: Estas son medidas de carácter mixto ya que involucran reducción de consumos y confort térmico. Tal como se muestra en el gráfico 4.24 el incremento de la carga necesaria para calefaccionar desde los $1,3[MWh]_{th}$ aproximadamente hasta los $10[MWh]_{th}$ para junio, julio y agosto. Para este fin se recomienda reforzar los ventanales, incorporando capas adicionales al marco y cristalería, descartando el reemplazo de los componentes originales debido a la legislación que protege el mobiliario original del edificio se añaden capas como una configuración de termopanel. Mientras que para disminuir la infiltración se debe reparar todas aquellas grietas y tapar las rendijas de las puertas y de sus marcos, en caso de agregar capas de material aislante que sea de forma continua procurando que no haya espacios entre capas y ni con la estructura. Perforaciones de enrutamiento eléctrico y sistemas de cableado también contribuyen a la infiltración, por lo que también deben ser reforzadas. Y por último, se recomienda agregar capas de aislante en particiones interiores debido a que las pérdidas asociadas a este elemento de construcción se encuentran en los primeros lugares independiente del valor de la tasa de renovación (ver gráfico 4.6 y la sección G.3 de Anexos).

Este ahorro es más estimativo, pero a grosso modo se puede disminuir las pérdidas térmicas por acristalamiento e infiltración entre un 5-10 % en cada ítem, disminuyendo los gastos de calefacción tanto eléctrica como gas en un porcentaje similar.

Por otro lado, en lugar de un reforzamiento estructural se sugiere la incorporación de un sistema VRV⁸ o Chiller-Fan Coil que sirva para calefaccionar en invierno y remover calor en verano, aumentando las horas de confort térmico para ambas temporadas. Esta medida es apropiada ya que los espacios de ocupación permanente (tipo 2) se encuentran concentrados en la cara este del primer piso (ver figura 3.8, recintos #10, #12, #13, #14, #17, #18 y #19) por lo que no sería una red tan extensa, pero posee la gran limitante que para el montaje de la ductería necesaria y la colocación de las unidades exteriores debe realizarse una intervención estructural visible perforando muro estructural, lo que va en contra de los estándares de preservación patrimonial pues ensuciaría la fachada.

Entre ambas medidas las de reducción de consumos de iluminación interior resultan ser más las directas y efectivas, la otra clase está sujeta a debate y no es inmediata aplicación puesto que requiere la evaluación de los aspectos no ingenieriles ya señalados.

Tal como se explica en la sección 2.4.2 la implementación de medidas de eficiencia energética tienen que ir de la mano con un programa de seguimiento continuo con actividades de verificación y corrección en la puesta en marcha para así garantizar una política íntegra a nivel organizacional.

5.2. Recomendaciones de deshumidificación

La deshumidificación se señala como una medida que mitiga el deterioro de las obras de arte. Si bien los espacios de bodegaje del piso 1 no presentan condiciones ambientales tan desfavorables para la conservación, se pueden habilitar los recintos cerrados del subterráneo

⁸ Volumen de Refrigerante Variable

para el guardado de las colecciones artísticas y así liberar zonas del piso 1 para ser usadas como salas de exposición o para otros fines.

Aún así, las salas de almacenamiento necesitan ser equipadas con dispositivos de deshumidificación portátiles para mantener la humedad relativa en valores estables y compensar los peaks que ocurren en ciertas horas y temporadas del año. Vinculado a esto se debe considerar la inclusión de calefactores, ya que como la humedad relativa es un factor de deterioro, también lo es la temperatura que en este caso influye en menor medida.

Ante la dificultad de realizar intervenciones estructurales como perforaciones de muros y losas para instalar redes de calefacción y ventilación y como las necesidades de corrección ambiental son puntuales, basta con que los equipos sugeridos sean móviles y desmontables y no permanentes, puesto que estos implican un proceso de mantención más pesado, lo que lo convierte en una desventaja. Como sugerencia se propone deshumidificadores con ruedas y descarga de ducto textil.

Como valor referencial por estudios en el MAC Parque Forestal [21], 2 equipos de deshumidificación por enfriamiento con una capacidad conjunta de extracción de $0,75 [L/(dia \cdot m^2)]$ cubren bien las necesidades para un depósito de dimensiones similares.

Capítulo 6

Síntesis y Conclusiones

El objetivo principal de este estudio fue alcanzado en gran parte puesto que se pudo modelar térmicamente la performance del edificio y de manera coherente se obtuvo un perfil de consumos eléctricos con una tendencia similar a la que entregaron las cuentas de ENEL. A partir de la caracterización realizada se puede cuantificar la distribución de consumos eléctricos, donde predomina la iluminación externa e interna con un 66,12 % (ver figura 4.2) y en base a esto, orientar las medidas de eficiencia energética, como el recambio del tipo de foco y la reducción de los horarios de encendido.

En la misma línea, la simulación térmica indica las falencias de la estructura en ese ámbito, mostrando la susceptibilidad de las pérdidas de calor a la tasa de infiltración. Esto, a su vez, muestra que un fortalecimiento estructural posee ventajas comparativas con respecto a la incorporación de equipos de calefacción para aumentar el confort térmico en periodo invernal, donde su consumo simulado arroja un 16,08 %, que puede verse reducido con el reforzamiento de la cristalería y el cubrimiento de rendijas y fisuras.

La descripción de la envolvente y las propiedades de elementos como puertas, ventanas y techumbre son factores determinantes en el estudio, también las simplificaciones aplicadas como la eliminación de la tabiquería, paredes y losas de composición homogénea también le restan fidelidad al análisis, pero pese a todo esto, los valores obtenidos son una aproximación válida y a partir de la cual se puede refinar al ir incorporando las complejidades propias de la estructura en toda su dimensión. La utilización de softwares y de algoritmos apropiados que buscan replicar lo que sucede en la realidad es un recurso poderoso que puede verse potenciado aún más, si es que se le agregan complejidades, como por ejemplo incorporar la capacitancia térmica del edificio, si se precisan parámetros de simulación como las temperaturas consigna, y por supuesto, más data.

La influencia de los suelos en el balance térmico es un aspecto intrigante por las cantidades de calor fugado y su comportamiento contrario a la estacionalidad que impone el clima. A la luz de los números, profundizar en la relación térmica del edificio con el terreno que lo rodea amerita un análisis temático por sí solo.

Un aspecto complementario para respaldar la simulación es la realización de mediciones, en virtud de lo descrito en la sección 2.4.2, con herramientas especializadas para así no usar valores referenciales como temperaturas de consigna, valores de iluminancia o tasas de infil-

tración. Dicho levantamiento busca reducir los focos de incertidumbre y la propagación de errores en las que se puede incurrir a la hora de simular.

El museo como organización y como giro carece de los ingresos para reinvertir en el mejoramiento del edificio, es por esto que la inversión que se planea realizar tenga retornos en el corto plazo. El museo tiene mucho margen de mejora, sobretodo con la habilitación de las zonas del subterráneo que implica disponer de más espacio y con ello, generar más ingresos, aunque no se pueda cuantificar con certeza dichos montos adicionales.

Para concluir y como apreciación estrictamente personal se considera que el edificio es hermoso en toda su extensión, también en sus rincones olvidados. La depuración, limpieza y reacondicionamiento de esos lugares sin duda es un “cariño necesario” a este edificio patrimonial, entidad urbana con singular historia propia.

6.1. Trabajo futuro

El abanico de trabajo posterior es amplio, ya que puede estudiarse esta metodología de trabajo en otros edificios o bien hacer un estudio financiero que pondere el costo de implementación de las medidas de eficiencia energética y el ahorro en consumos eléctricos para diferentes horizontes de tiempo. Simular implementaciones de eficiencia energética es un área vasta para explotar.

Esto respaldado por la enorme funcionalidad de *DesignBuilder* que invita a hacer estudios multidisciplinarios, por ejemplo mapeos *CFD* que indiquen los flujos de aire interiores dentro de los edificios y con esto identificar en qué sectores se producen mayores pérdidas por infiltración.

Otro campo de expansión para estos análisis tipo consultoría es el uso de otros softwares como HAP⁹, Revit, CLwin, que tienen mayor presencia y utilización en la industria.

⁹ De la sigla *Hourly Analysis Program*, es un software diseñado por Carrier

Bibliografía

- [1] Muñoz Nova M. (2022). *Simulación y análisis de consumos energéticos del edificio Casa Central usando EnergyPlus* [Tesis de Pregrado, Universidad de Chile, Facultad de Cs. Físicas y Matemáticas]. Repositorio Académico de la Universidad de Chile. <https://repositorio.uchile.cl/handle/2250/189156>.
- [2] Qu, K., Chen, X., Wang, Y., Calautit, J., Riffat, S., Cui, X. (abril, 2021) Comprehensive energy, economic and thermal comfort assessments for the passive energy retrofit of historical buildings - A case study of a late nineteenth-century Victorian house renovation in the UK. *Energy*, vol. 220, 1-25. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2020.119646>.
- [3] Museo de Arte Contemporáneo *Taller LUDOX en MAC Quinta Normal* [en línea] <https://www.youtube.com/watch?v=_wOkIGJ0o_k> [consulta: 20 abril 2024]
- [4] Çengel Y.A., & Boles M.A. (2012). *Termodinámica*. (7a. ed.). McGraw-Hill.
- [5] Çengel, Y.A., & Ghajar, A.J. (2011). *Transferencia de calor y masa: fundamentos y aplicaciones* (4a. ed.). McGraw-Hill.
- [6] Instituto Nacional de Seguridad y Salud en el Trabajo. *Determinación del metabolismo energético mediante tablas* [en línea] <<https://www.insst.es/documents/94886/327975/ntp-1011.pdf/88e68db1-426e-4d88-85ff-6ec77f1f9204>> [consulta: 26 abril 2024]
- [7] McQuiston, F.C., Parker, J.D., & Spitler J.D. (2003). *Calefacción, ventilación y aire acondicionado*. (1a. ed.). Limusa Wiley.
- [8] *The Lighting Handbook*. (2008). (2a. ed.). Zumtobel Lighting GmbH. [en línea] <https://issuu.com/lightonline/docs/zumtobel_lighting-handbook> [consulta: 27 abril 2024]
- [9] Van Bommel W., & Rouhana A. (2011). *Fundamentos sobre la generación de la luz y el alumbrado*. (1a. ed.). Phillips Lighting University. [en línea] <<https://images.philips.com/is/content/PhilipsConsumer/PDFDownloads/Spain/Basics-of-lighting.pdf>> [consulta: 29 abril 2024]
- [10] Instituto de Salud Pública de Chile. *Confort térmico en ambientes laborales* [en línea]

- <<https://www.ispch.cl/sites/default/files/NotaTecnica47-21032017A.pdf>> [consulta: 30 abril 2024]
- [11] *ASHRAE Handbook 2021: Fundamentals*. (2021). American Society of Heating, Refrigerating and Air-conditioning Engineers.
- [12] Casals Ventilation *Cómo Calcular las renovaciones por hora según la actividad de un local* [en línea] <https://www.casals.com/assets/uploads/editor/file/renovacion_de_aire_en_locales_tipicos_casals.pdf> [consulta: 02 mayo 2024]
- [13] *Eficiencia Energética: la necesidad del siglo XXI* (1a. ed.). (2012). Comisión de Energía del Colegio de Ingenieros de Chile.
- [14] Hospitecnia: Arquitectura, ingeniería y gestión hospitalaria y sanitaria. *Norma Europea sobre Iluminación para Interiores UNE 12464.1* [en línea] <<https://hospitecnia.com/sites/default/files/158833991931588339919.pdf>> [consulta: 04 mayo 2024]
- [15] Ganslandt R., & Hofmann H. (1992). *Handbook of lighting design*. (1a.ed.). ERCO Edition. [en línea] <https://download.ercocom/redirect/en_gb/contentaccess/page/download/media+handbookf> [consulta: 06 mayo 2024]
- [16] *ASHRAE Handbook 2019: HVAC Applications*. (2019). American Society of Heating, Refrigerating and Air-conditioning Engineers.
- [17] *Climatic Data for Building Design Standard-169*. (2020). American National Standards Institute/American Society of Heating, Refrigerating and Air-conditioning Engineers.[en línea] <https://www.ashrae.org/file%20library/technical%20resources/standards%20and%20guidelines/standards%20addenda/169_2020_a_20211029.pdf> [consulta: 07 mayo 2024]
- [18] Ritter M. *El balance de Radiación* [en línea] <[https://espanol.libretexts.org/Geociencias/Geograf%C3%ADa_\(F%C3%ADsica\)/El_ambiente_f%C3%ADsico_\(Ritter\)/04%3A_Energ%C3%ADa_y_Radiaci%C3%B3n/4.03%3A_Radiaci%C3%B3n_y_Balance_Energ%C3%A9tico_del_Sistema_Terrestre/4.3.01%3A_El_Balance_de_Radiaci%C3%B3n](https://espanol.libretexts.org/Geociencias/Geograf%C3%ADa_(F%C3%ADsica)/El_ambiente_f%C3%ADsico_(Ritter)/04%3A_Energ%C3%ADa_y_Radiaci%C3%B3n/4.03%3A_Radiaci%C3%B3n_y_Balance_Energ%C3%A9tico_del_Sistema_Terrestre/4.3.01%3A_El_Balance_de_Radiaci%C3%B3n)> [consulta: 08 mayo 2024]
- [19] Ministerio para la Transición Ecológica y el Reto Demográfico. *Sitio web de los Gases Licuados del Petróleo* [en línea] <<https://www.miteco.gob.es/es/energia/hidrocarburos-nuevos-combustibles/glp.html>> [consulta: 10 mayo 2024]
- [20] Ordóñez A. (2017). *Manual de ayuda DesignBuilder en español del programa*. (5a. ed.). Sol-Arq. [en línea] <<https://es.scribd.com/document/420983264/Manual-Design-Build-er-Espanol-2017-03-03-Unlocked.>> [consulta: 13 mayo 2024]

- [21] Fuentes J., Irizar I., Martínez J., Reyes B., Zerené D. (2023) *Informe Final: Deshumidificación en MAC Parque Forestal* Informe para ME5140 Ingeniería en Termofluidos. Universidad de Chile, Facultad de Cs. Físicas y Matemáticas, Depto Ingeniería Mecánica.
- [22] Mee Industries Inc. *Psychrometric Chart, SI Units, Sea Level* [en línea] <<https://www.docsity.com/es/carta-psicrometrica-2-de-refrigeracion/10279010/>> [consulta: 15 mayo 2024]
- [23] Ergonautas *Método de Fanger - Evaluación de la sensación térmica* [en línea] <<https://www.ergonautas.upv.es/metodos/fanger/fanger-ayuda.php>> [consulta: 18 mayo 2024]

Anexos

Anexo A. Carta sicrométrica

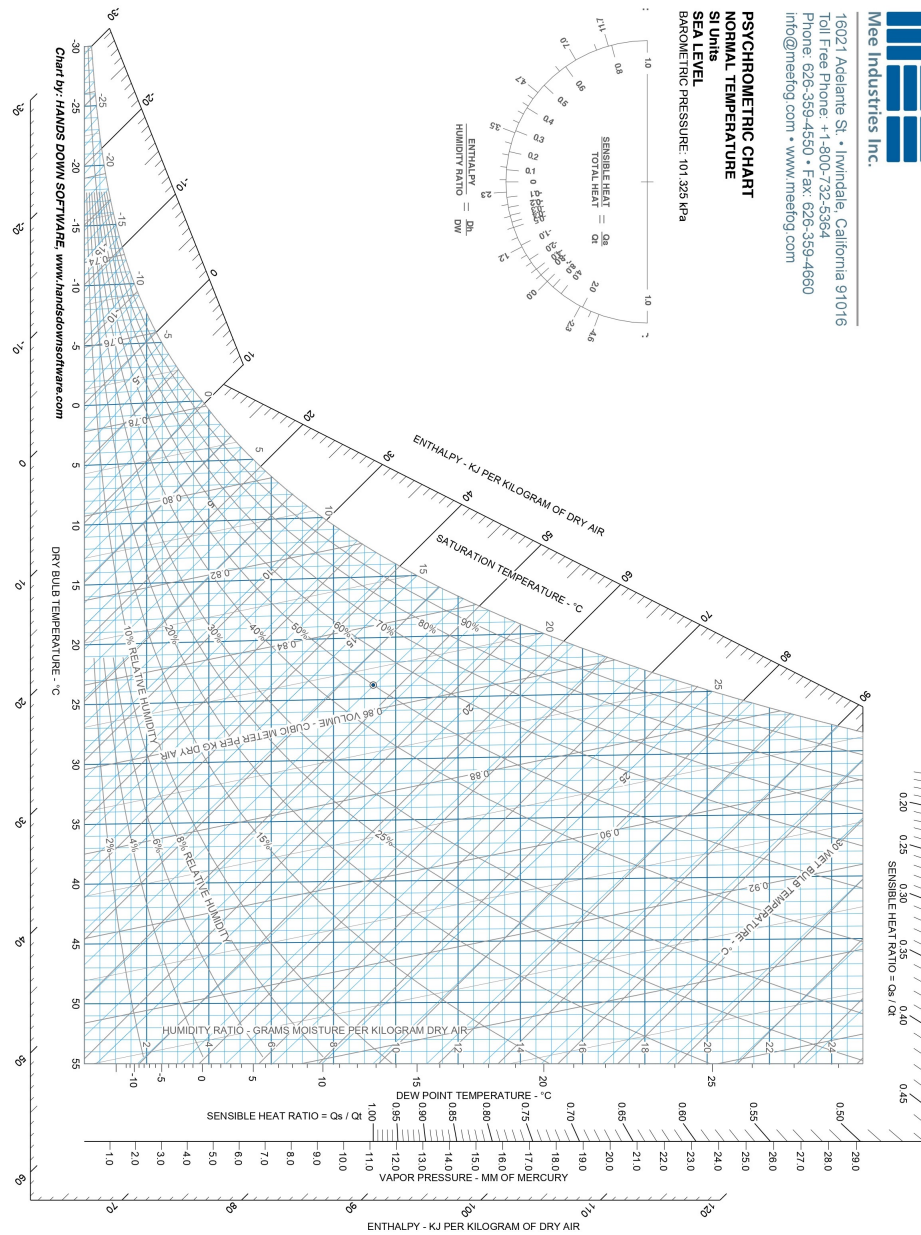


Figura A.1: Detalle general de una carta sicrométrica en SI. [22].

Anexo B. Detalle ecuaciones

B.1. Parámetros de Fanger

[23]

Los parámetros necesarios para las ecuaciones 2.18 y 2.19 se detallan a continuación:

- *Tasa metabólica M* : Tal como se explicó en el ítem 2.2.4, esto implica una contribución térmica de los ocupantes al entorno.
- *Potencia mecánica externa W* : Corresponde al gasto energético realizado por el individuo para la realización de cierta actividad. Se descuenta de la tasa metabólica de modo que $M - W$ es la generación térmica neta transferida al ambiente. En contextos de poco desgaste físico, puede despreciarse.
- *Temperatura del aire T_a* : Es la temperatura del aire interior, se mide en grados Celsius [$^{\circ}$ C]
- *Velocidad relativa del aire v_a* : Es la velocidad del aire con respecto a los ocupantes en un recinto. Para ambientes cerrados no industriales suele ser menor que 0,2 [m/s]
- *Presión parcial de vapor de agua p_v* : Como el aire es una mezcla de gases, el vapor de agua presente ejerce una presión individual que junto a los otros componentes sumados dan lugar a la presión atmosférica. Se mide en Pascales [Pa] y depende de la humedad relativa local (HR ó ϕ) y de la temperatura de bulbo seco, por ende puede obtenerse mediante una carta sicrométrica o bien mediante la siguiente ecuación:

$$p_v = \frac{\phi}{100} \cdot \exp \left(\frac{-5800,22}{T_a + 273} + 1,39 - 0,0486 \cdot (T_a + 273) + 4,176 \cdot 10^{-5} \cdot (T_a + 273)^2 - 1,445 \cdot 10^{-8} \cdot (T_a + 273)^3 + 6,546 \cdot \ln(T_a + 273) \right) \quad (B.1)$$

- *Temperatura radiante media T_{rm}* : Es un valor que representa la temperatura promedio las superficies irradiantes que encierran a un volumen hacia el seno de éste. Tiene su origen en que el calor por radiación fluye cuando hay diferencias entre las temperaturas absolutas de los cuerpos, que en este caso al tratarse de interiores de un recinto, se refiere a las paredes, el cielo y el piso. Para su cálculo se toma en cuenta la temperatura del aire, la velocidad del aire interior y la temperatura de globo T_g de la siguiente fórmula:

$$T_{rm} = T_g + 1,9 \cdot \sqrt{v_a} \cdot (T_g - T_a) \quad (B.2)$$

La temperatura de globo es la registrada por un dispositivo llamado medidor de estrés o carga calórica ambiental, que consiste en una esfera hueca de 6 pulgadas de diámetro pintada de negro opaco en cuyo interior hay un termómetro. Esta temperatura es la resultante del balance térmico por intercambio radiante entre el globo y el ambiente ya que superficie negra absorbe la radiación térmica de los cuerpos más calientes que el aire a la vez que emite hacia los más fríos.

- *Temperatura operativa* T_{op} : Es la ponderación entre la temperatura de toda la envolvente de un espacio y la temperatura seca del aire. Es relevante ya que sirve de estimación como temperatura en la que el cuerpo humano transfiere calor por convección y radiación de forma equivalente. En aplicaciones prácticas se ocupa el promedio entre T_{rm} y T_a :

$$T_{op} = \frac{T_{rm} + T_a}{2} \quad (B.3)$$

Medida en Celsius [$^{\circ}$ C]

- *Aislamiento de la ropa* I_{cl} : Las prendas funcionan como resistencias térmicas entre el cuerpo y el medio, dificultando o facilitando el intercambio de calor según la necesidad de la época del año, de modo que un bajo aislamiento corresponderá a prendas ligeras que exponen extremidades, siendo propias del verano, mientras que prendas gruesas y que cubren toda la piel serán de invierno. Este parámetro se mide en [$\frac{m^2K}{W}$] o también en *clo* con $1 \text{ clo} = 0,155 \frac{m^2K}{W}$.
- *Factor de superficie de la ropa* f_{cl} : Asociado al aislamiento producto de la ropa, el factor de superficie es una razón adimensional entre el área que cubre(n) la(s) prenda(s) y el área corporal total. Es un parámetro susceptible a cómo se lleva puesta la ropa, por ejemplo si se usa de forma ajustada u holgada pero, de forma sencilla, Fanger lo definió por tramos así:

$$f_{cl} = \begin{cases} 1 + 0,2 \cdot I_{cl} & \text{si } I_{cl} \leq 0,5 \text{ clo} \\ 1,05 + 0,1 \cdot I_{cl} & \text{si } I_{cl} > 0,5 \text{ clo} \end{cases} \quad (B.4)$$

- *Temperatura superficial de la ropa* T_{cl} : Es la temperatura que posee la superficie externa del conjunto de prendas que se llevan. Se obtiene mediante la siguiente fórmula:

$$T_{cl} = 35,7 - 0,0275(M - W) - I_{cl} \cdot \left\{ (M - W) - 3,05 \cdot 10^{-3} \cdot [5733 - 6,99(M - W) - p_v] - 0,42 \cdot [(M - W) - 58,15] - 1,73 \cdot 10^{-5} \cdot M(5867 - p_v) - 0,0014 \cdot M(34 - T_a) \right\} \quad (B.5)$$

- *Coefficiente de transferencia de calor por convección* h_c : Se define como el coeficiente convectivo con el cual el cuerpo intercambia calor con el ambiente que lo rodea, depende de la velocidad del aire en el interior y de otras temperaturas ya obtenidas previamente. Se expresa en [$\frac{W}{m^2K}$] y se calcula así:

$$h_c = \begin{cases} 12,1 \cdot \sqrt{v_a} & \text{si } 2,38 \cdot \sqrt[4]{|T_{cl} - T_a|} \leq 12,1 \cdot \sqrt{v_a} \\ 2,38 \cdot \sqrt[4]{|T_{cl} - T_a|} & \text{si } 2,38 \cdot \sqrt[4]{|T_{cl} - T_a|} > 12,1 \cdot \sqrt{v_a} \end{cases} \quad (B.6)$$

B.2. Ecuación para línea base

La expresión general que permite calcular el consumo mensual Cm_i en [kWh] de un aparato i es la siguiente:

$$Cm_i = z_i \cdot \frac{26 \cdot (f_i \omega_i + (24 - f_i) y_i) + 4 \cdot 24 y_i}{1000} \left[\frac{kWh}{mes} \right]_e \quad (B.7)$$

Donde:

- $z_i \in \{0, \dots\}$ *natural*: Cantidad del artefacto i
- $\omega_i \in \{0, \dots\}$ *real*: Consumo en *ON* en $[W]$ del artefacto i , asociado generalmente día hábil, horario operativo.
- $y_i \in \{0, \dots\}$ *real*: Consumo en *OFF* en $[W]$ del artefacto i asociado generalmente día hábil+horario no operativo y domingo. En muchos casos es cero.
- $f_i \in \{0, \dots, 24\}$ *real*: Factor de uso en $[hr/dia]$ del artefacto i en un día hábil y horario operativo.

Cuando el artefacto tiene el mismo comportamiento los domingos que los días hábiles, el término $4 \cdot 24 y_i \rightarrow 4 \cdot (f_i \omega_i + (24 - f_i) y_i)$ como por ejemplo la luminaria exterior, la luminaria de los pasillos, refrigerador, *módem* y rack de comunicación.

Anexo C. Renderizados

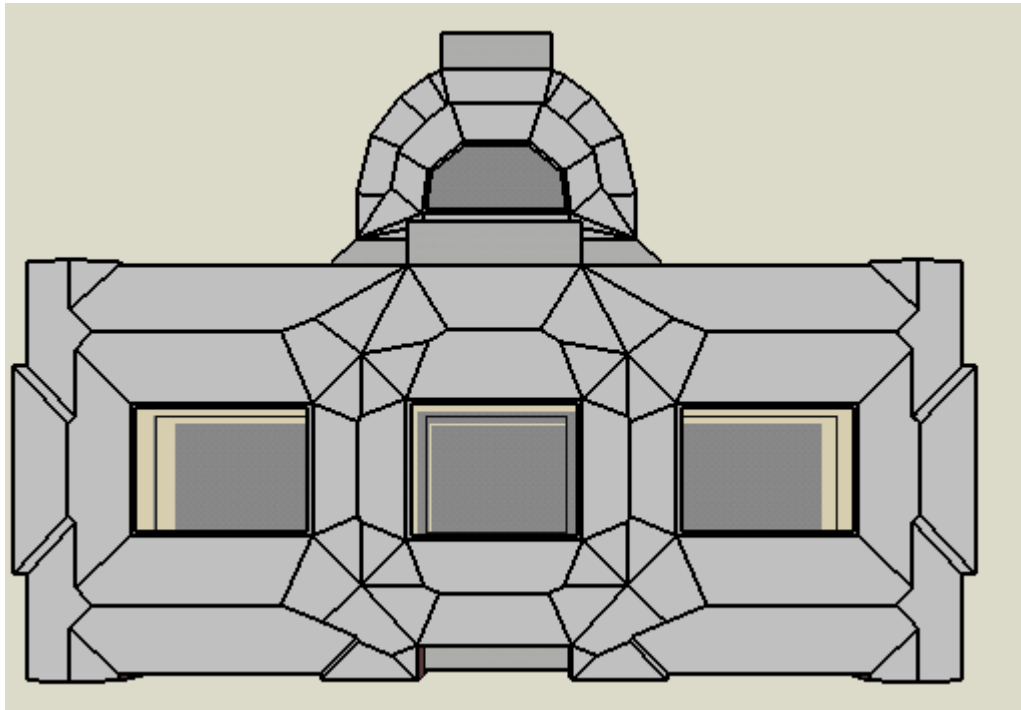


Figura C.1: Vista en planta renderizada del edificio modelado.

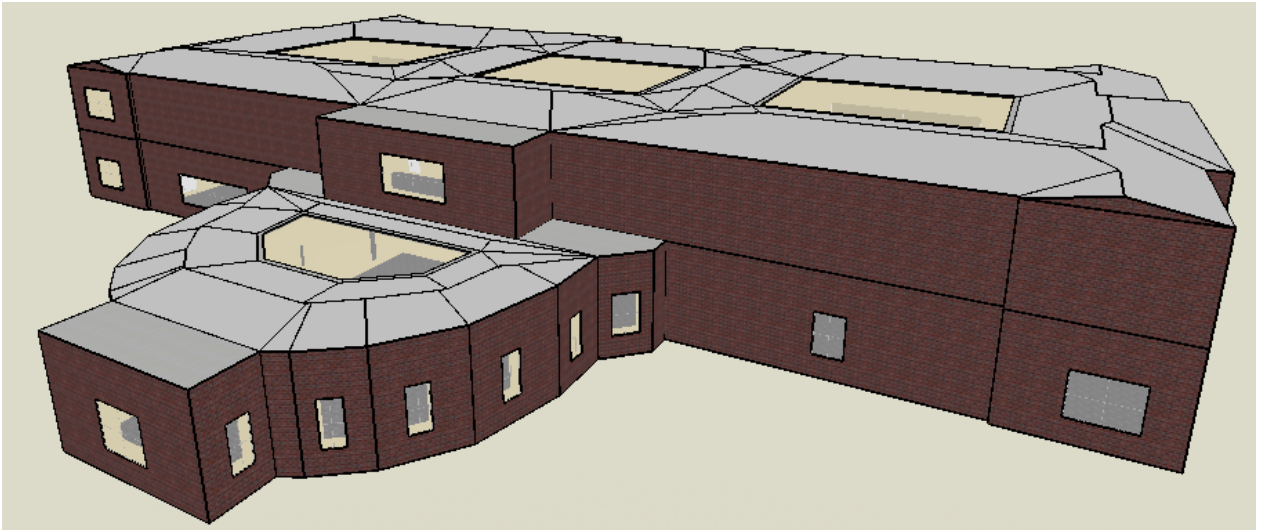


Figura C.2: Vista oblicua renderizada de la cara posterior edificio.

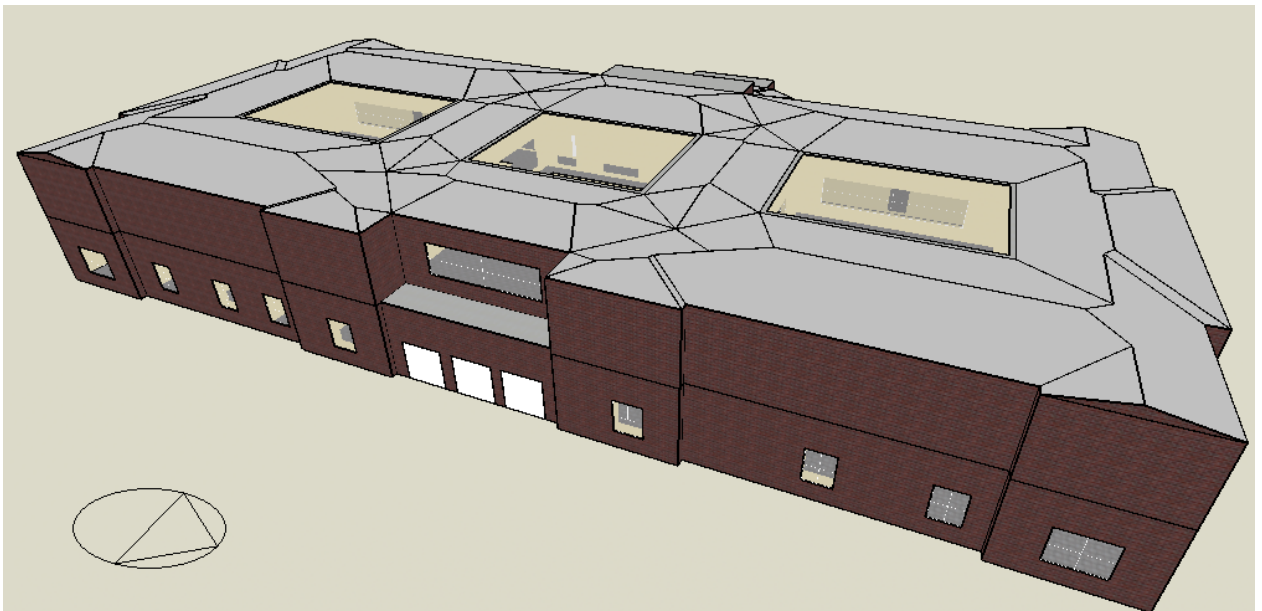


Figura C.3: Vista oblicua renderizada de la cara frontal del edificio.

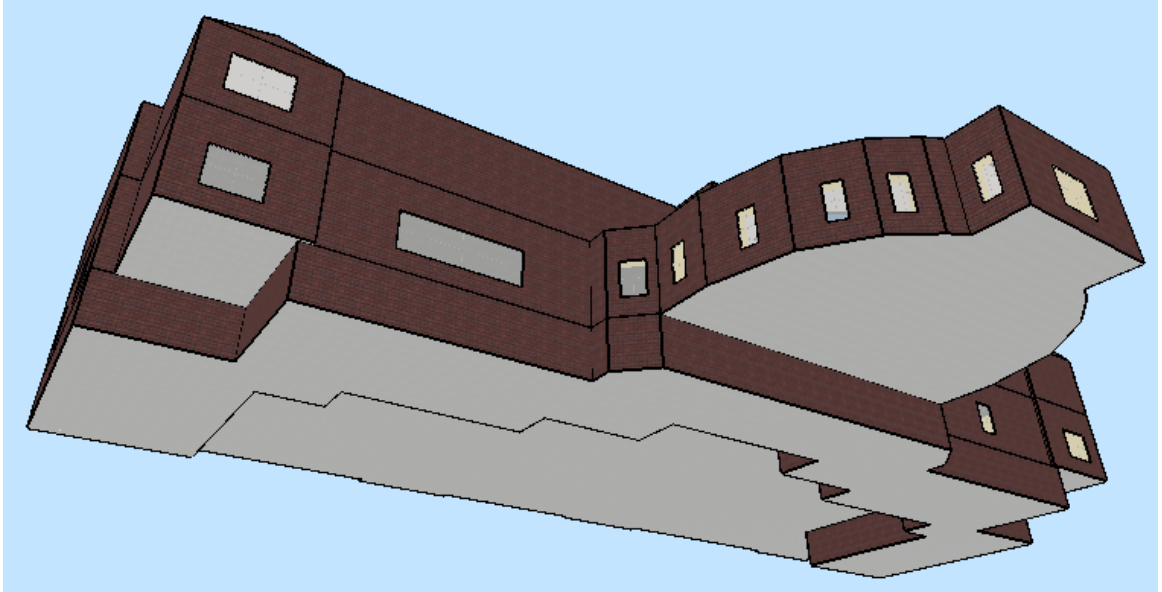


Figura C.4: Vista oblicua renderizada desde el terreno hacia el edificio.

Anexo D. Muros y aberturas

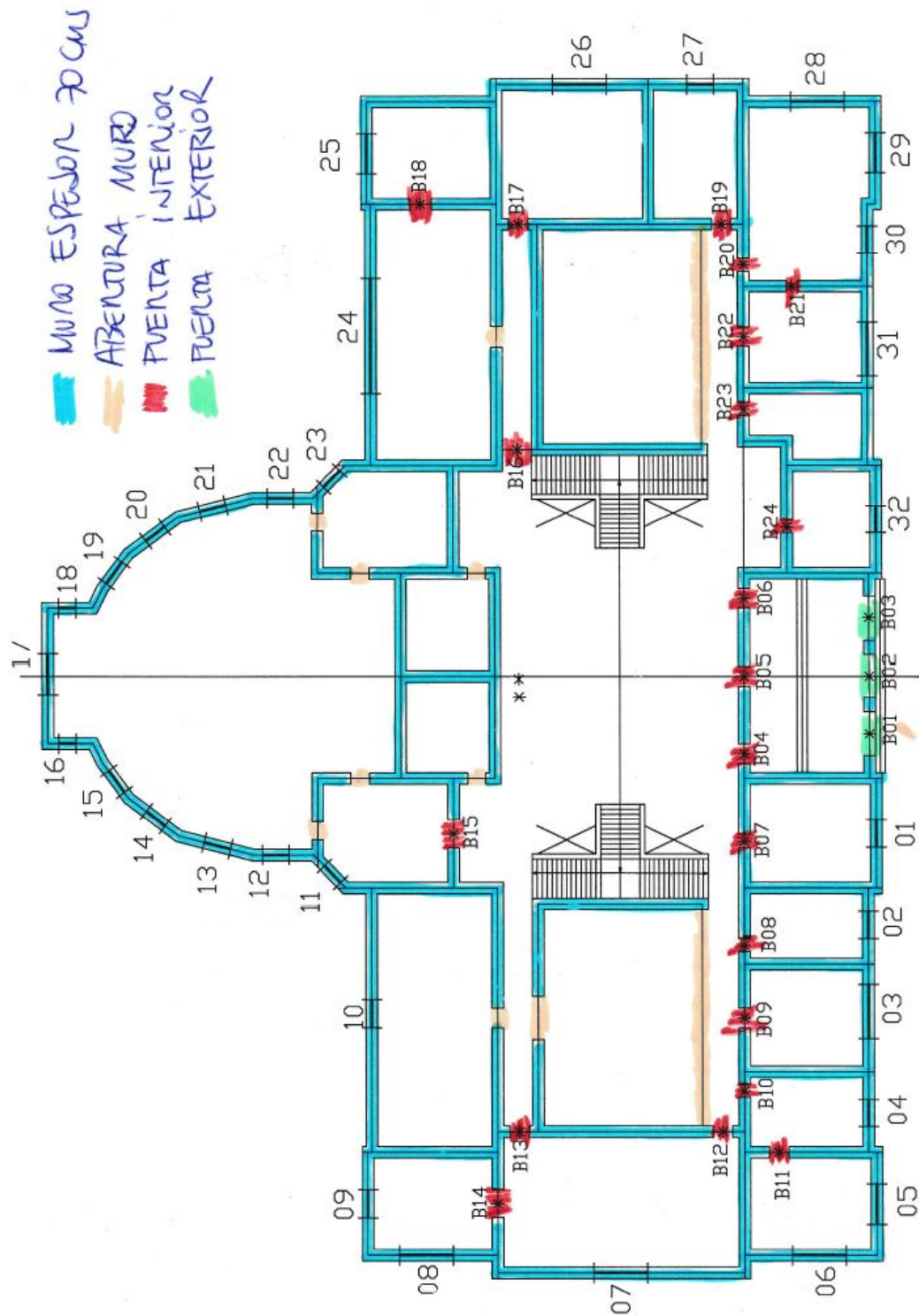


Figura D.1: Distribución de muros, aberturas y puertas piso 1.

MURO ESPESOR 70 CMS

ABERTURA MURO

PUERTA INTERIOR

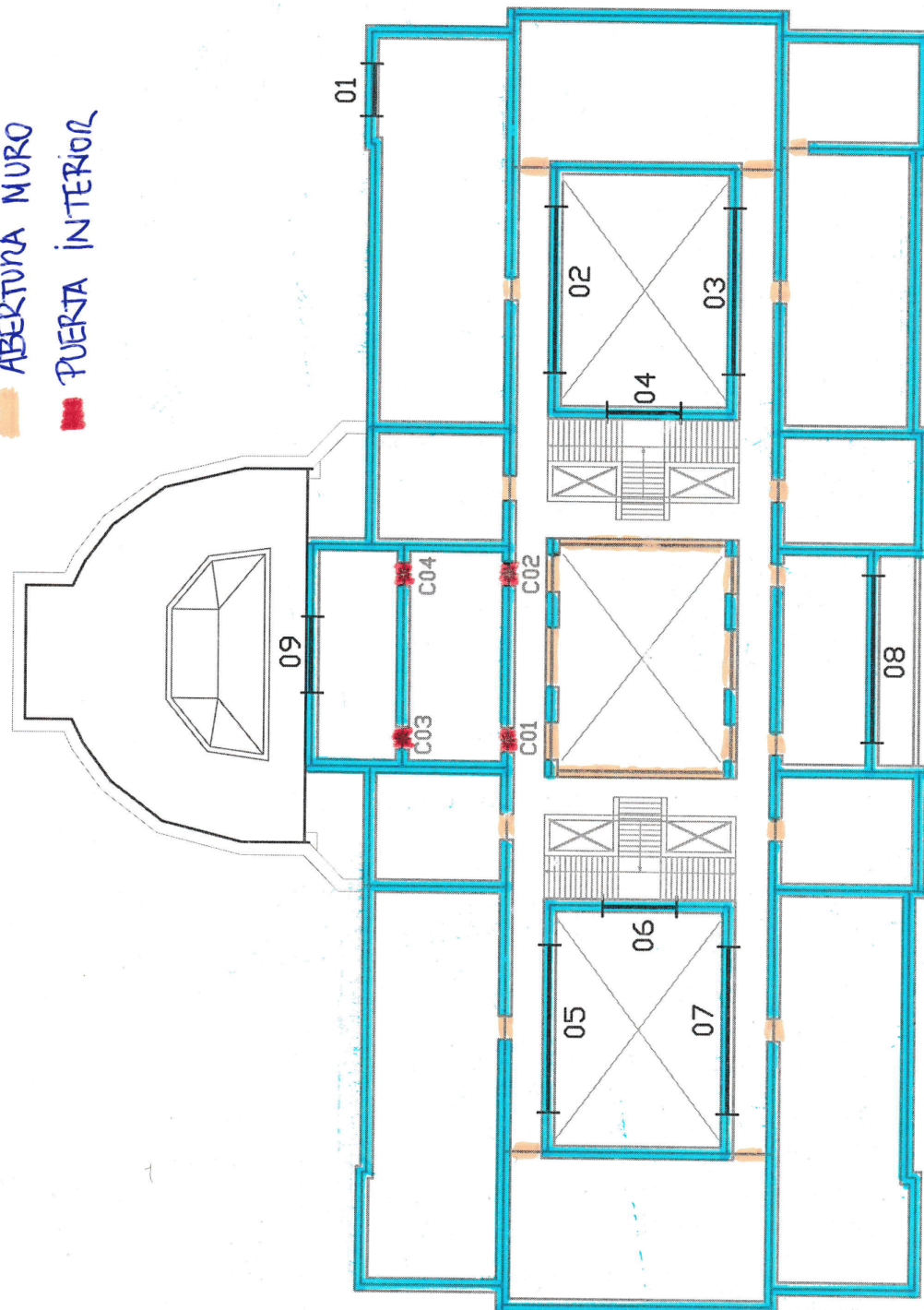


Figura D.2: Distribución de muros, aberturas y puertas piso 2.

MURO ESPESOR 70cms
ABERTURA MURO
PUERTA INTERIOR

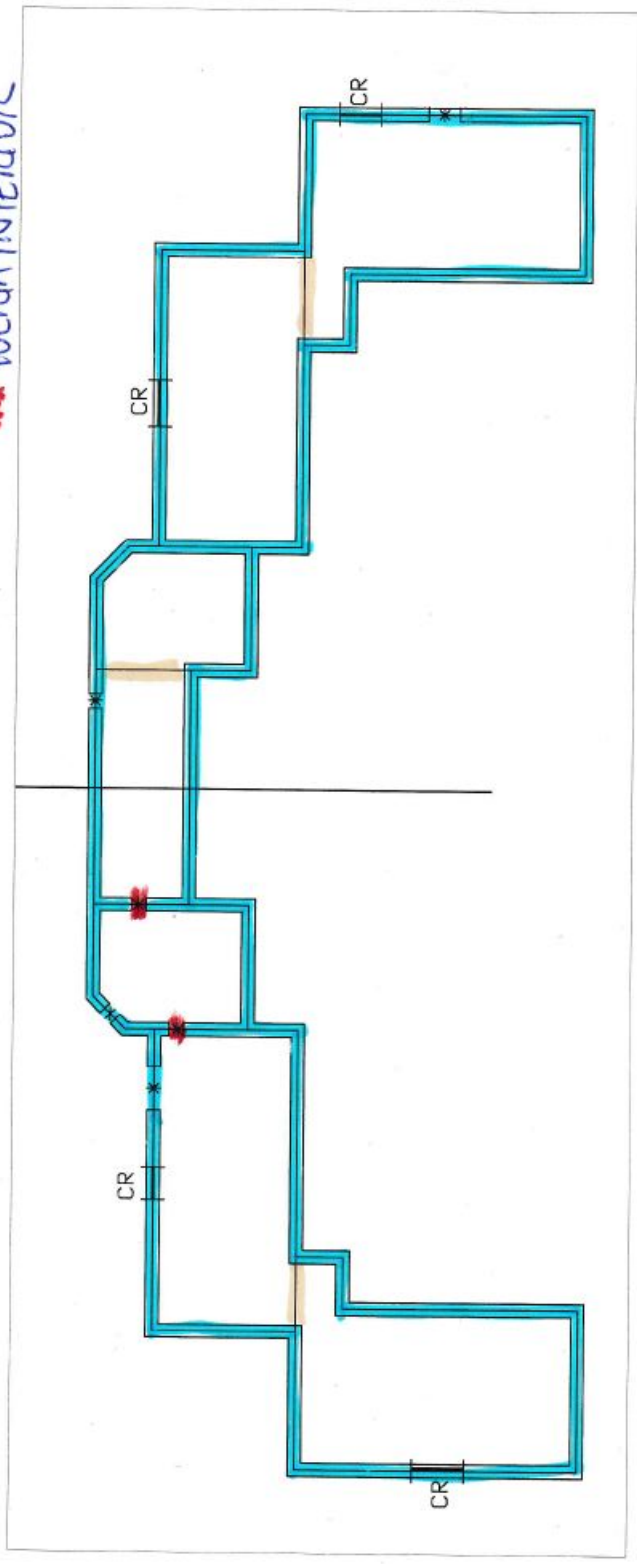


Figura D.3: Distribución de muros, aberturas y puertas subterráneo.

Anexo E. Tipificación de ventanas

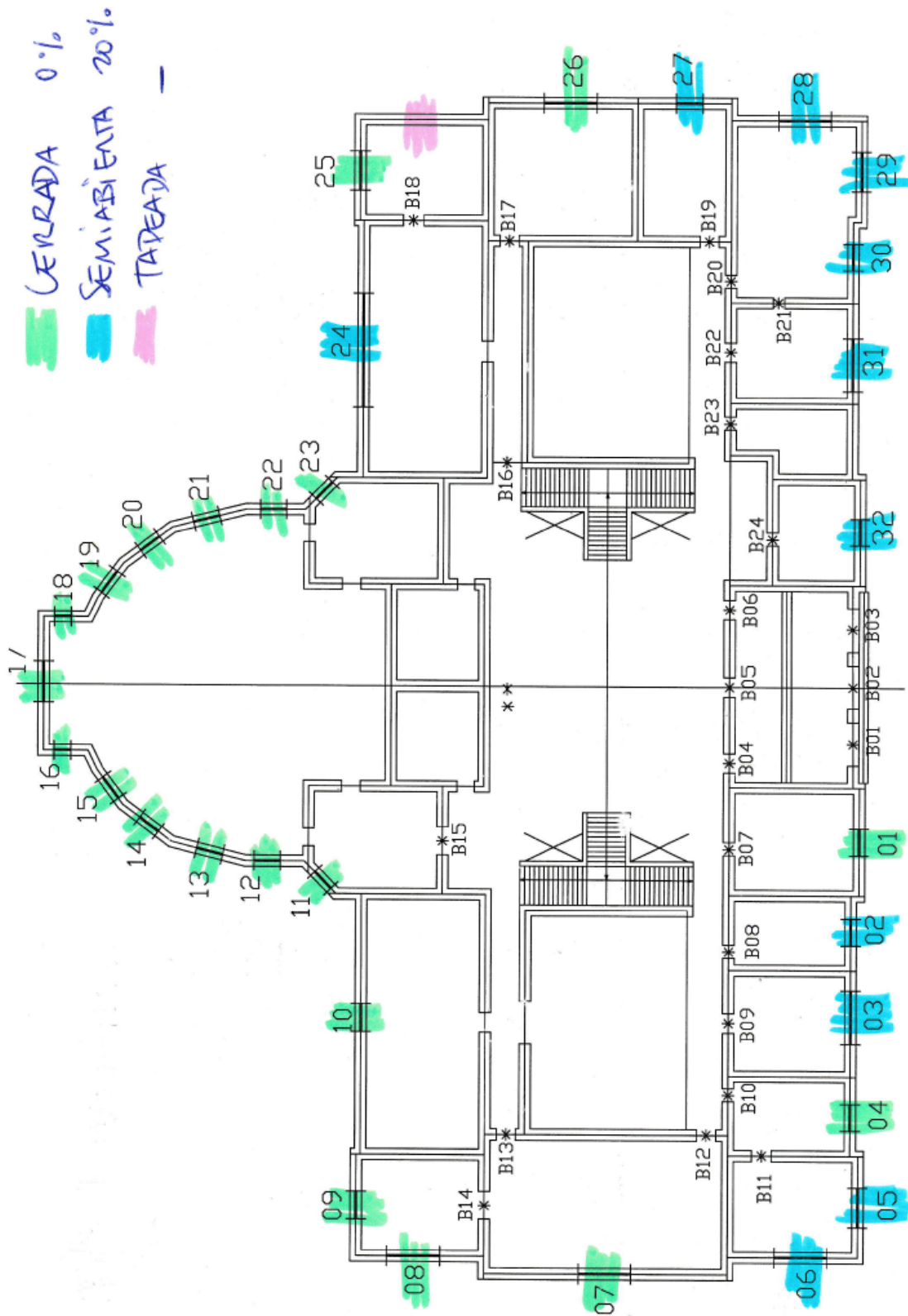


Figura E.1: Tipos de ventanas piso 1.

- CERRADA 0%
- SEMIABIERTA 20%
- TAPADA -

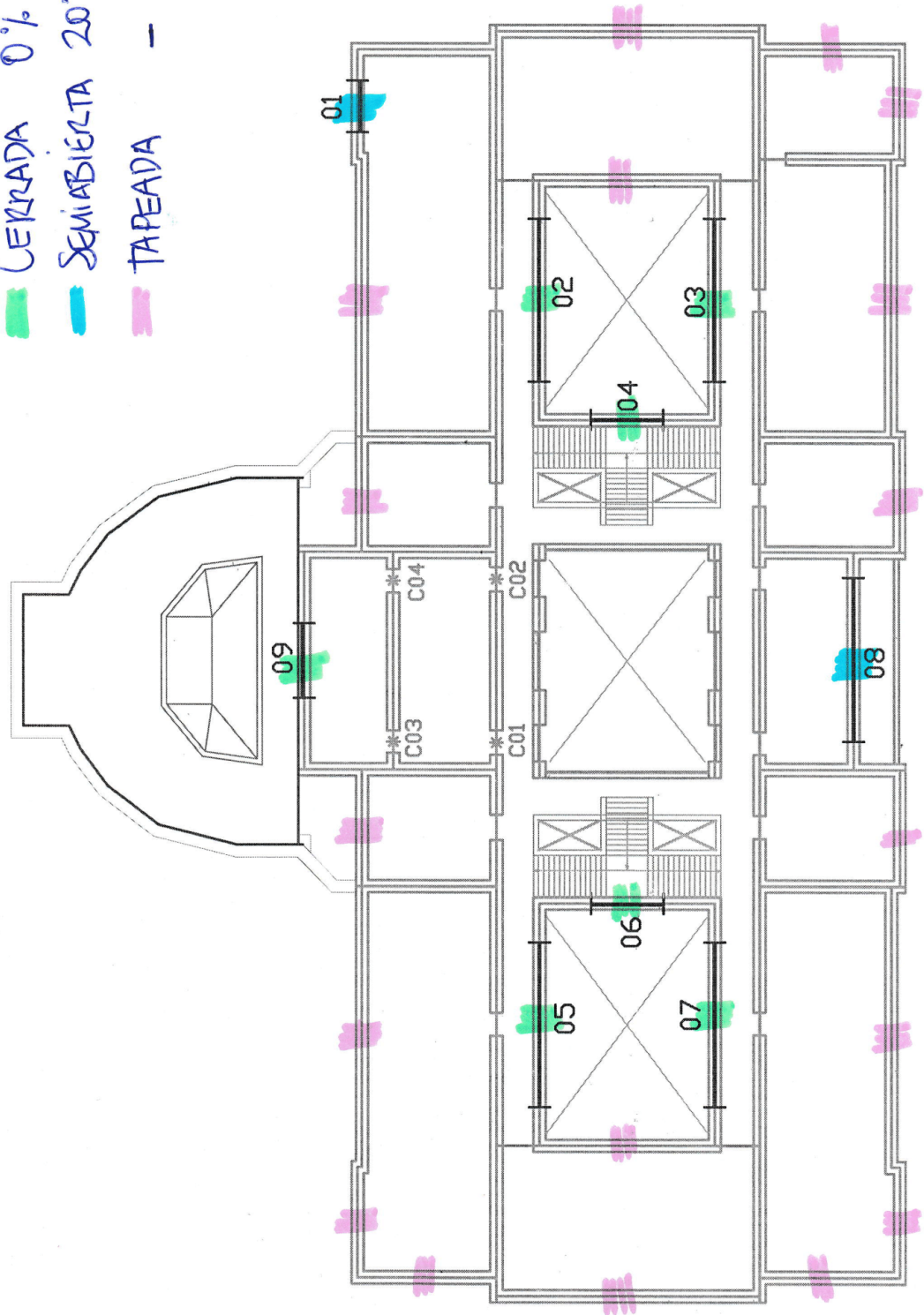


Figura E.2: Tipos de ventanas piso 2.

Anexo F. Tablas de resultados

F.1. Planilla de cálculo línea base

Tabla F.1: Planilla cálculo para los artefactos.

	Cantidad	Consumo en ON (ω_i) [W]	Consumo en OFF (y_i) [W]	[hrs de consumo en ON/ d_{op}] (f_i)	[hrs de consumo en OFF/ d_{op}] ($24 - f_i$)	[kWh d_{op} /mes]	[kWh/mes] _i
Cargador de radiotransmisores	2	75	0	6	18	11,7	27
Cargador de teléfono	8	5	0	7	17	0,91	7,28
Computador de escritorio	3	200	0	10	0	52	156
Equipo de audio	6	80	0	7	17	14,56	87,36
Esmeril angular	1	720	0	2	22	37,44	37,44
Hervidor	3	1200	0	0,4	23,6	12,48	37,44
Horno eléctrico	1	1500	0	1	23	39	39
Máquina de soldar	1	2000	0	0,5	23,5	26	26
Microonda	1	800	0	1	23	23,79	20,8
Módem	3	20	0	24	0	12,48	43,2
Monitor LCD	3	18	0	10	14	4,68	14,04
Multifuncional	2	60	0	1	23	1,56	3,12
Notebook	5	20	0	10	14	5,2	26
Proyector	4	2000	0	7	17	364	1456
Rack de comunicación	1	183	0	24	0	114,19	131,76
Refrigerador	2	150	0	24	0	93,6	216
Secador de pelo	1	2000	0	0,5	0	26	26
Sierra circular	1	1800	0	2	22	93,6	93,6
Taladro	1	600	0	2	22	31,2	31,2
Termotanque	1	3200	0	2	22	166,4	166,4
Trapeador eléctrico	1	75	0	1	0	1,95	1,95
TOTAL MENSUAL [MWh]						2,648	2,648

Tabla F.2: Planilla cálculo para las luces.

	Cantidad	Consumo en ON (ω_i) [W]	Consumo en OFF (y_i) [W]	[hrs de consumo en ON/ d_{op}] f_i	[hrs de consumo en OFF/ d_{op}] $24 - f_i$	[kWh d_{op} /mes]	[kWh/mes] _i
Tubos fluorescentes	100	70	0	10	10	18,2	2100
Focos LED int	250	11	0	7	0	2,002	500,5
Focos LED ext	20	120	0	7	7	21,84	504
TOTAL MENSUAL [MWh]						3,105	3,105

F.2. Planillas simulación principal

F.2.1. Consumos eléctricos

Tabla F.3: Planilla consumos eléctricos mensuales.

[kWh]	E	F	M	A	M	J	J	A	S	O	N	D
Aparatos	799,14	128,95	851,65	768,28	851,65	820,79	825,4	851,65	820,79	825,4	820,79	772,89
Ventiladores	27,3	0	27,3	0	0	0	0	0	0	27,3	27,3	27,3
Termotanque	440,94	40,39	440,94	440,94	440,94	440,94	440,94	440,94	440,94	440,94	440,94	440,94
Equipos Genéricos	1267,38	169,34	1319,89	1209,22	1292,59	1261,73	1266,34	1292,59	1261,73	1293,64	1289,03	1241,13
Iluminación Interior	3617,9	273,57	4025,35	3762,63	4456,29	4369,6	4310,32	4280,88	3990,05	3884,91	3755,33	3476,01
Iluminación Exterior	656,64	595,08	659,88	736,56	760,32	736,56	760,32	760,32	736,56	757,08	636,12	636,12
Calefacción	299,93	323,5	375,38	952,43	1028,03	2333,9	2349,78	2421,23	992,31	1008,18	373,11	344,64
Consumo Total	5841,85	1361,49	6380,5	6660,84	7537,23	8701,79	8686,76	8755,02	6980,65	6943,81	6053,59	5697,9
Porcentaje de consumo	7,339%	1,710%	8,016%	8,368%	9,469%	10,932%	10,913%	10,999%	8,770%	8,723%	7,605%	7,158%

Tabla F.4: Planilla resumen consumos eléctricos.

[kWh]	SUMAS POR ITEM	
Aparatos	9137,38	
Ventiladores	136,5	
Termotanque	4890,73	PORCENTAJES
Equipos Genéricos	14164,61	17,79%
Iluminación Interior	44202,84	55,53%
Iluminación Exterior	8431,56	10,59%
Calefacción	12802,42	16,08%
TOTAL	79601,43	

F.2.2. Cargas térmicas

Tabla F.5: Planilla cargas térmicas mensuales.

[kWh]	E	F	M	A	M	J	J	A	S	O	N	D
Ocupación	1371,28	120,28	1754,79	1993,79	2600,89	2737,47	2874,41	2815,67	2510,82	2181,73	1854,14	1412,88
Iluminación	2351,635	177,8205	2616,4775	2445,7095	2896,5885	2840,24	2801,708	2782,572	2593,5325	2525,1915	2440,9645	2259,4065
Computadoras y equipos	159,828	25,79	170,33	153,656	170,33	164,158	165,08	170,33	164,158	165,08	164,158	154,578
Ganancias solar por ventanas interiores	315,78	260,21	251,94	185,77	145,39	118,63	139,65	173,08	240,68	285,72	303,54	350,26
Ganancias solares por ventanas exteriores	62593,71	50969,29	43313,07	28107,35	18773,57	14562,59	15896,48	22653,41	30675,7	41149,15	55337,55	60148,62
Calefacción a gas	0	0	0	0	412,13	412,13	412,43	412,43	412,13	0	0	0
Calefacción eléctrica	299,93	323,5	375,38	952,43	1028,03	2333,9	2349,78	2421,23	992,31	1008,18	373,11	344,64
Calefacción Total	299,93	323,5	375,38	952,43	1440,16	2746,03	2762,21	2833,66	1404,44	1008,18	373,11	344,64
Carga Térmica Total	67092,16	51876,89	48481,99	33838,71	26026,93	23169,12	24639,54	31428,72	37589,33	47315,05	60473,46	64670,38

Tabla F.6: Planilla resumen cargas térmicas.

[kWh]	SUMA POR ITEM	PORCENTAJES
Ocupación	24228,15	4,69 %
Iluminación	28731,846	5,56 %
Computadoras y Equipos	1827,476	0,35 %
Ganancias solares por ventanas interiores	2770,65	0,54 %
Ganancias solares por ventanas exteriores	444180,49	85,98 %
Calefacción a gas	2061,25	
Calefacción eléctrica	12802,42	
Calefacción Total	14863,67	2,88 %
TOTAL	516602,282	

F.2.3. Balance térmico

Tabla F.7: Planilla balances térmicos mensuales.

[kWh]	E	F	M	A	M	J	J	A	S	O	N	D
Acristalamiento	-15172,47	-14929,79	-14517,84	-11710,81	-11928,33	-10662,45	-11652,03	-11514,99	-10868,36	-12446,89	-14225,43	-14580,79
Muros	853,69	1667,82	-2179,82	-3798,98	-7352,73	-7648,67	-8928,55	-7237,05	-4445,05	-3679,08	-1951,63	-282,1
Techos	36047,91	32660,07	24097,61	10481,87	-1315,37	-8429,82	-10495,91	-6389,21	2615,62	12058,91	25204,71	33123,95
Suelos Interiores	-37487,5	-31891	-21764,88	-8227,12	3313,91	8833,92	11264,64	5026,75	-4149,45	-13876,76	-27001,17	-34590,68
Suelos sobre terreno	-45188,32	-38085,8	-32520,26	-14620,24	239,62	9841,17	14317,51	7913,12	-2405,44	-15380,75	-29948,63	-41537,04
Particiones	-3536,69	1606,6	6542,24	6056,09	5746,9	1031,01	1839,06	-3498,44	-4152,48	-5049,89	-5052,88	-3671,2
Cubiertas	226,74	-890,26	-2717,94	-3364,63	-4676,03	-4545,85	-4928,89	-3809,63	-2446,12	-1886,57	-454,25	-33,41
Infiltración	-8397,11	-4882,43	-9422,16	-11271,35	-11885,16	-13278,42	-17736,54	-13905,12	-13694,37	-10160,51	-11926,11	-7922,24
Balance Térmico Neto	-72653,75	-54744,79	-52483,05	-36455,17	-27857,19	-24859,11	-26320,71	-33414,57	-39545,65	-50421,54	-65355,39	-69493,51

Tabla F.8: Planilla resumen balances térmicos.

	SUMA POR ITEM
Acristalamiento	-154210,18
Muros	-44982,15
Techos	149660,34
Suelos Interiores	-150549,34
Suelos sobre terreno	-187375,06
Particiones	-2139,68
Cubiertas	-29526,84
Infiltración	-134481,52
TOTAL	-553604,43

F.2.4. Confort Ambiental

Tabla F.9: Planilla condiciones de confort mensuales.

	E	F	M	A	M	J	J	A	S	O	N	D
Humedad Relativa	45,59 %	40,02 %	44,55 %	51,76 %	52,52 %	55,29 %	53,97 %	50,45 %	46,62 %	38,54 %	39,64 %	34,14 %
Temperatura Operativa [°C]	26,48	25,8	23,38	19,67	15,99	13,78	12,85	14,46	17,09	19,91	23,44	25,8
PPD Fanger	0,1798	0,1611	0,1051	0,1755	0,1162	0,0859	0,079	0,0902	0,1185	0,0698	0,0865	0,1469
Horas disconfort (cualquier ropa)	48,13	0,36	14,62	35,99	100,19	103,36	104,38	105,19	96,06	54,46	13,98	20,49
PMV Fanger	0,55	0,48	0,3	0,56	0,38	0,25	0,19	0,26	0,38	-0,15	0,2	0,46
Fracción de tiempo en disconfort	14,67 %	0,11 %	4,46 %	10,97 %	30,55 %	31,51 %	31,82 %	32,07 %	29,29 %	16,60 %	4,26 %	6,25 %

Tabla F.10: Planilla resumen condiciones de confort.

	Valor mínimo	Mes mínimo	Valor máximo	Mes máximo
Humedad Relativa	34,14 %	Diciembre	55,29 %	Junio
Temperatura Operativa [°C]	12,85	Julio	26,48	Enero
PPD Fanger	6,98 %	Octubre	17,98 %	Enero
Horas disconfort (cualquier ropa)	0,36	Febrero	105,19	Agosto

Anexo G. Gráficos adicionales

G.1. Condiciones ambientales de habitaciones para simulación día

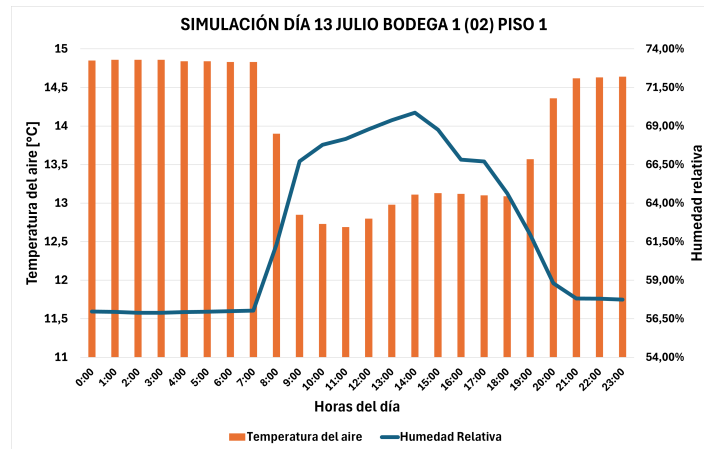


Figura G.1: Temperatura y humedad relativa de Bodega 1, piso 1 para día de invierno.

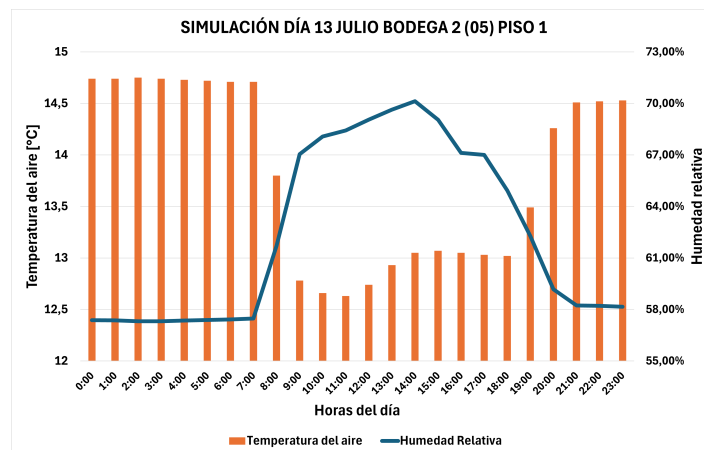


Figura G.2: Temperatura y humedad relativa de Bodega 2, piso 1 para día de invierno.

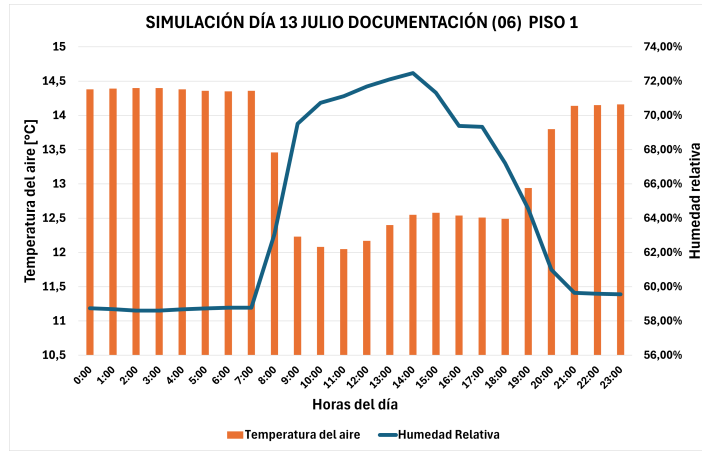


Figura G.3: Temperatura y humedad relativa de Documentación, piso 1 para día de invierno.

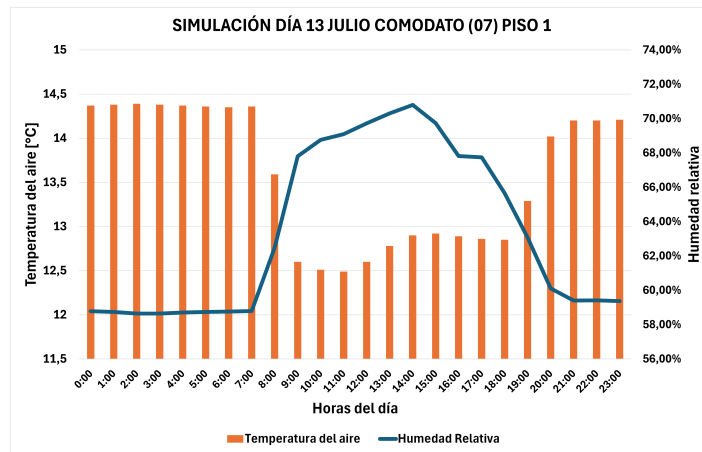


Figura G.4: Temperatura y humedad relativa de Comodato, piso 1 para día de invierno.

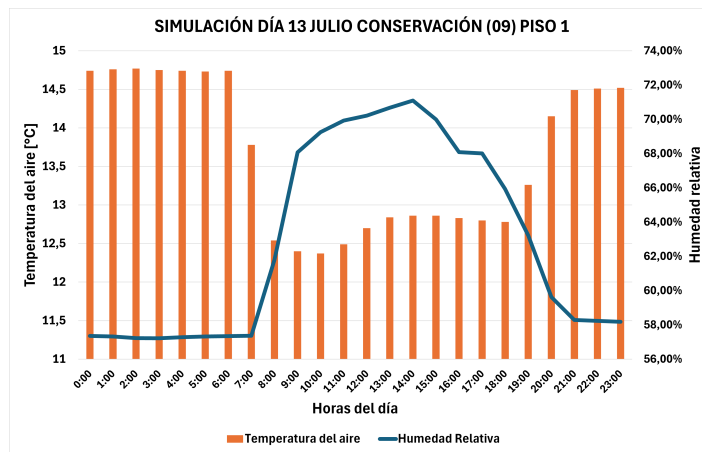


Figura G.5: Temperatura y humedad relativa de Conservación, piso 1 para día de invierno.

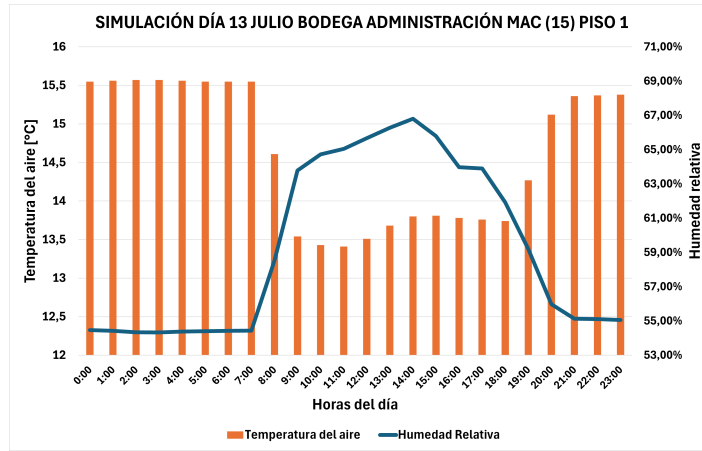


Figura G.6: Temperatura y humedad relativa de Bodega Administración MAC, piso 1 para día de invierno.

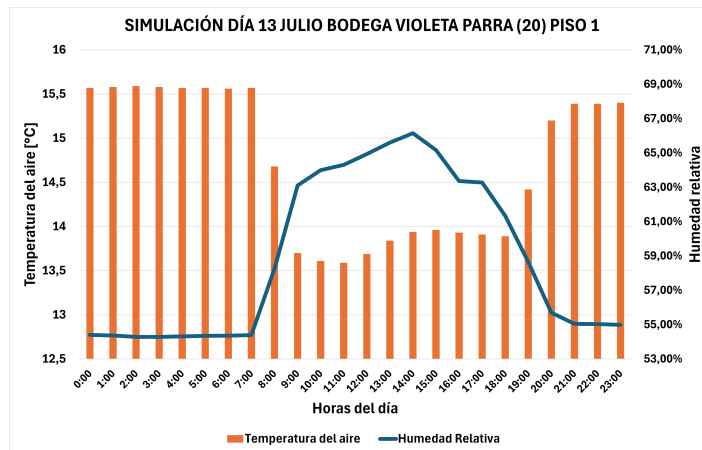


Figura G.7: Temperatura y humedad relativa de Bodega Violeta Parra, piso 1 para día de invierno.

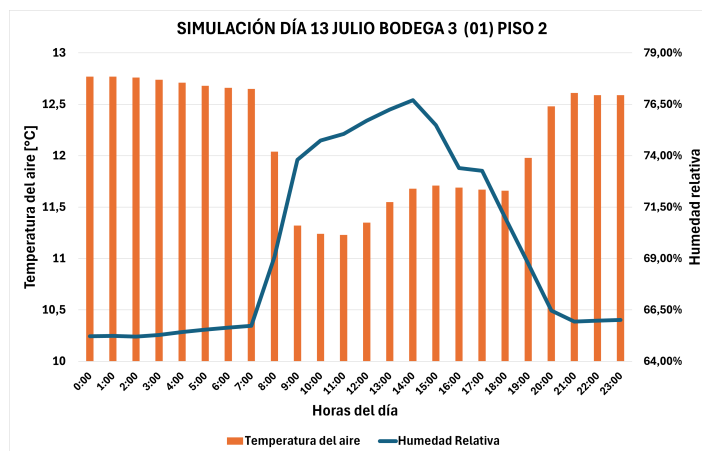


Figura G.8: Temperatura y humedad relativa de Bodega 3, piso 2 para día de invierno.

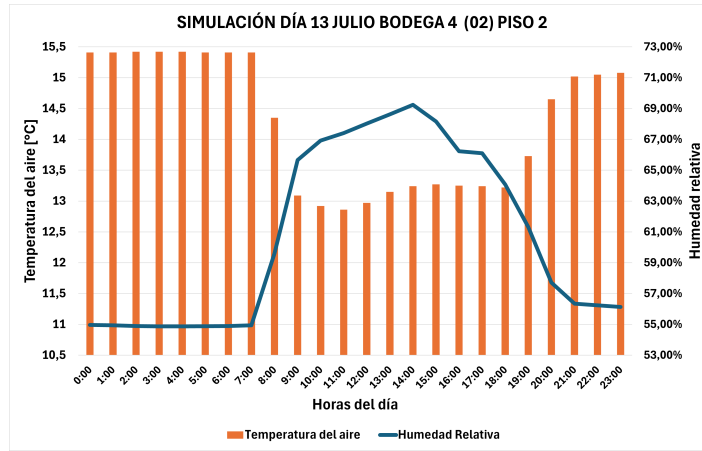


Figura G.9: Temperatura y humedad relativa de Bodega 4, piso 2 para día de invierno.

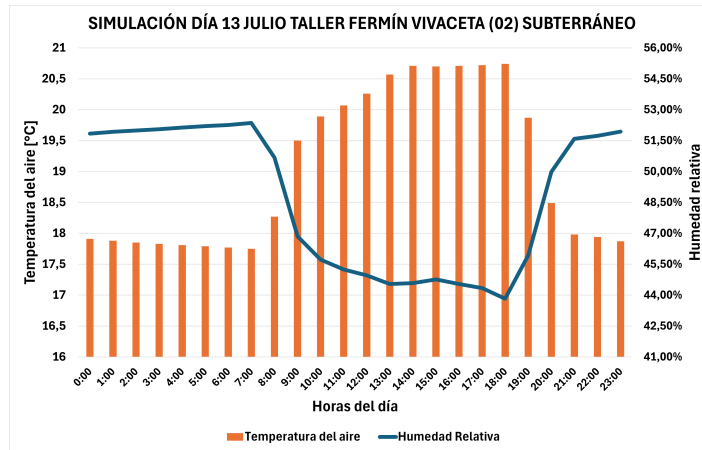


Figura G.10: Temperatura y humedad relativa de Taller Fermín Vivaceta, subterráneo para día de invierno.

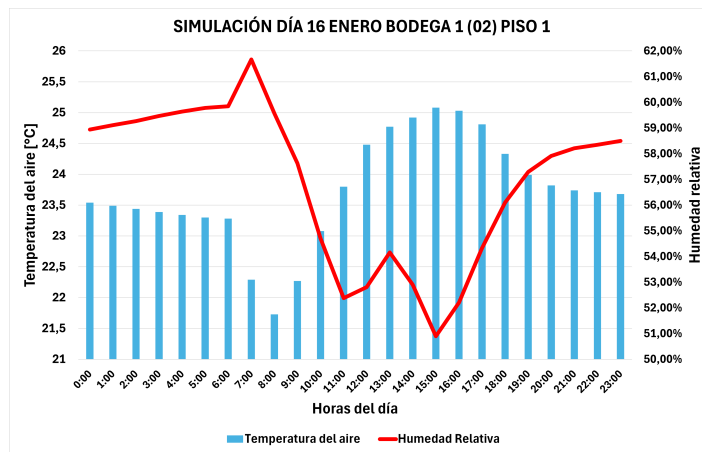


Figura G.11: Temperatura y humedad relativa de Bodega 1, piso 1 para día de verano.

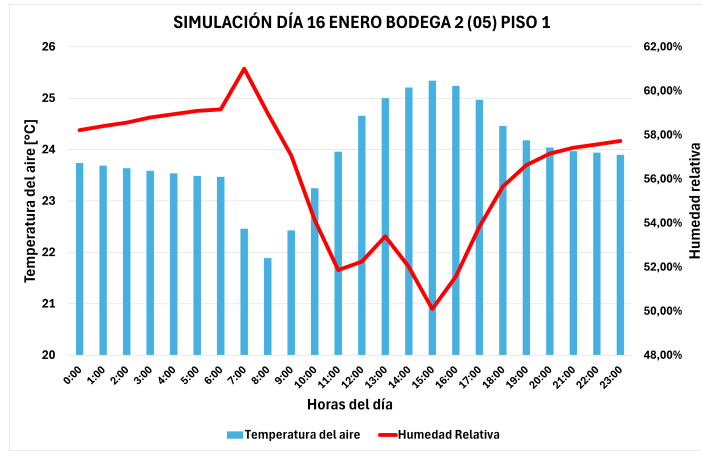


Figura G.12: Temperatura y humedad relativa de Bodega 2, piso 1 para día de verano.

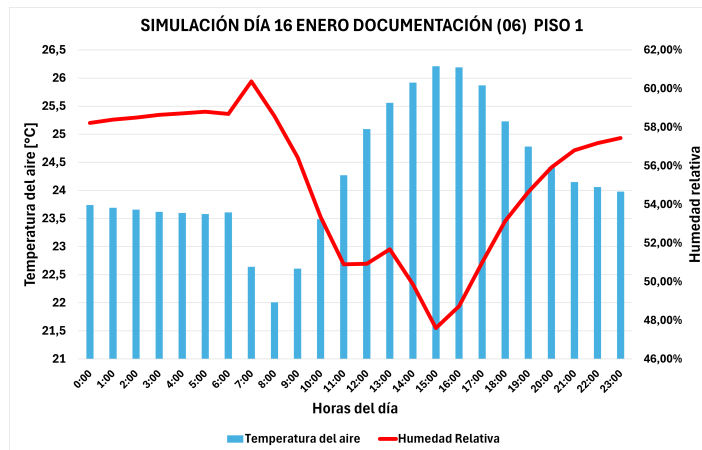


Figura G.13: Temperatura y humedad relativa de Documentación, piso 1 para día de verano.

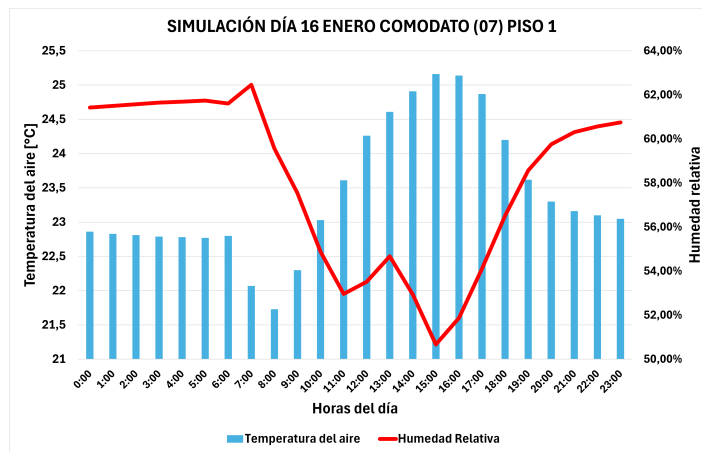


Figura G.14: Temperatura y humedad relativa de Comodato, piso 1 para día de verano.

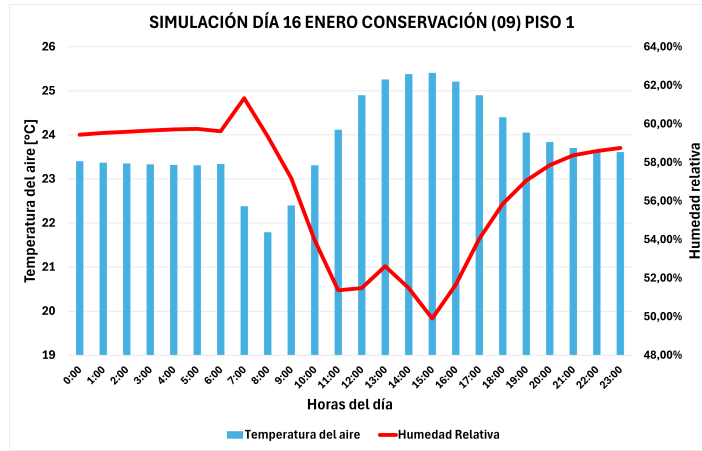


Figura G.15: Temperatura y humedad relativa de Conservación, piso 1 para día de verano.

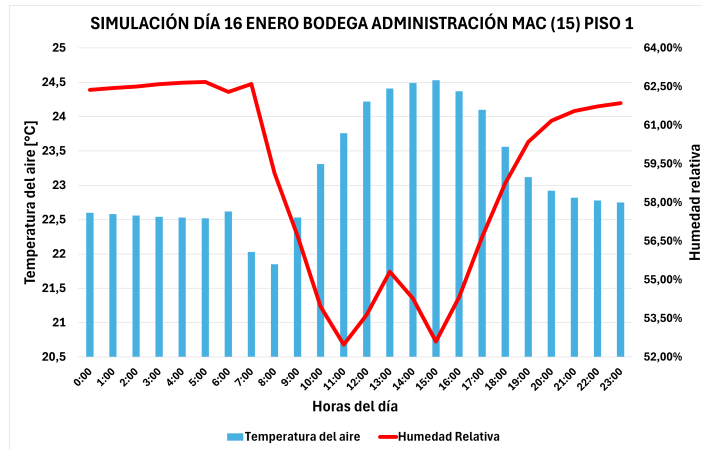


Figura G.16: Temperatura y humedad relativa de Bodega Administración MAC, piso 1 para día de verano.

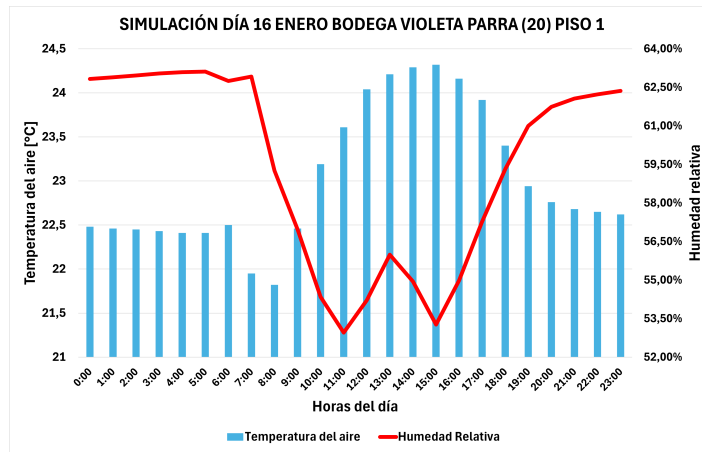


Figura G.17: Temperatura y humedad relativa de Bodega Violeta Parra, piso 1 para día de verano.

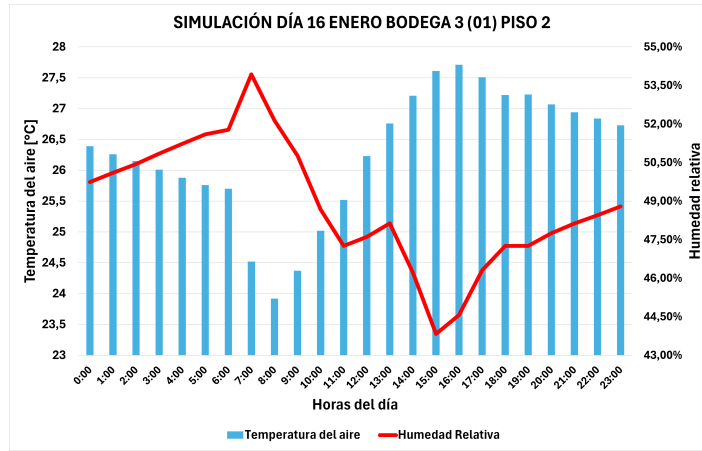


Figura G.18: Temperatura y humedad relativa de Bodega 3, piso 2 para día de verano.

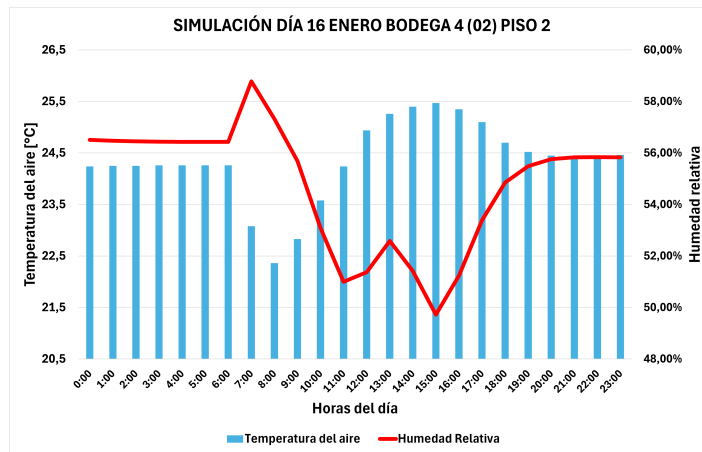


Figura G.19: Temperatura y humedad relativa de Bodega 4, piso 2 para día de verano.

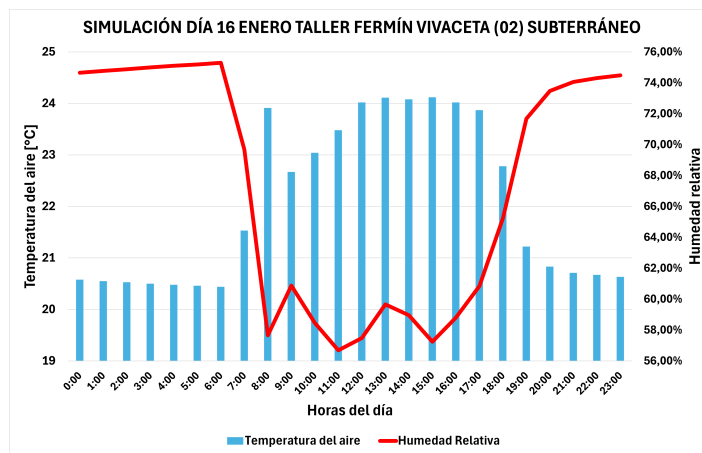


Figura G.20: Temperatura y humedad relativa de Taller Fermín Vivaceta, subterráneo para día de verano.

G.2. Consumos eléctricos según tasa de renovación

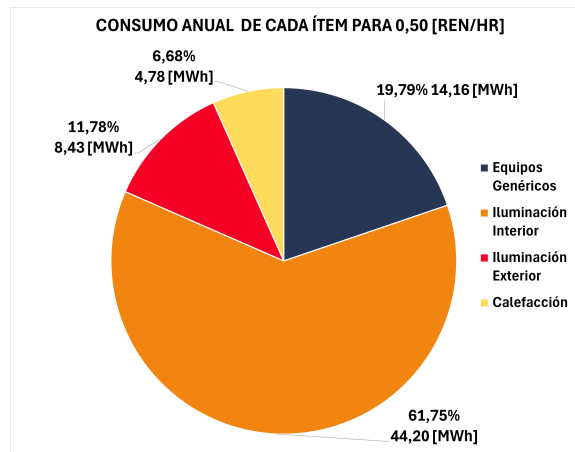


Figura G.21: Consumo eléctrico para 0,5 [ren/hr].

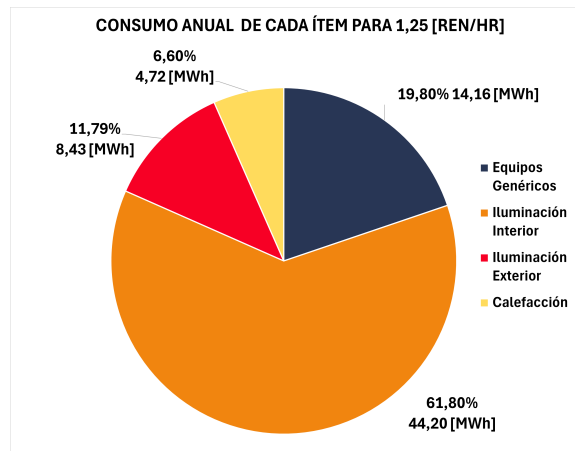


Figura G.22: Consumo eléctrico para 1,25 [ren/hr].

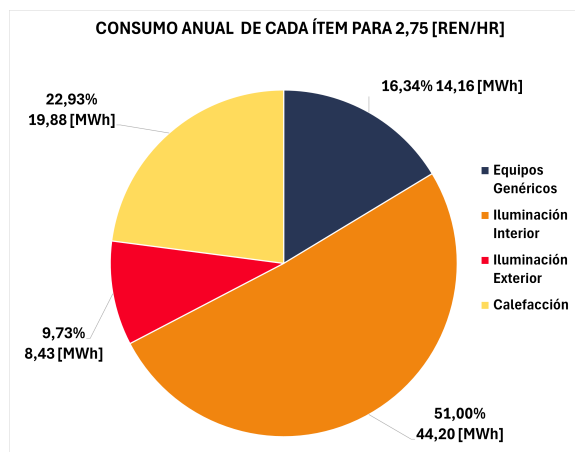


Figura G.23: Consumo eléctrico para 2,75 [ren/hr].

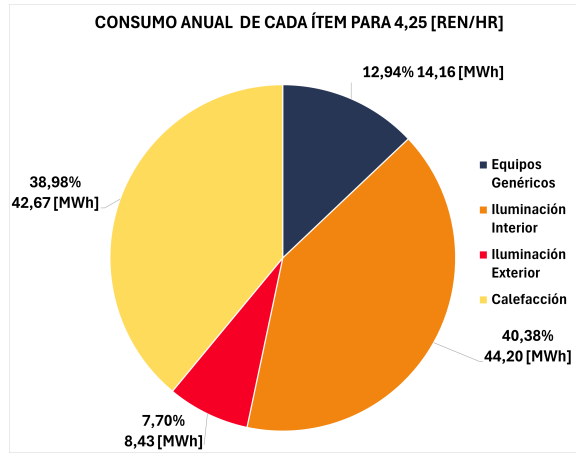


Figura G.24: Consumo eléctrico para 4,25 [ren/hr].

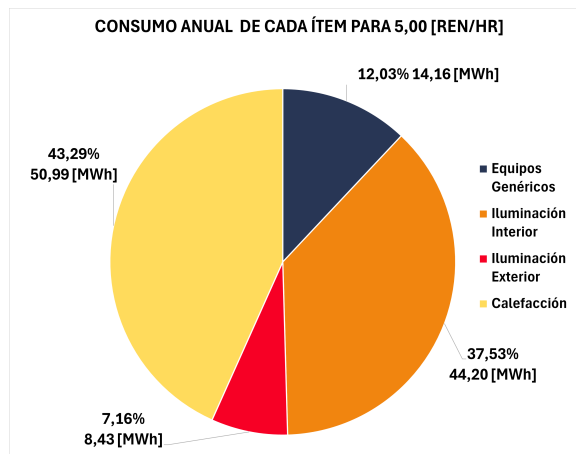


Figura G.25: Consumo eléctrico para 5,0 [ren/hr].

G.3. Balances térmicos según tasa de renovación

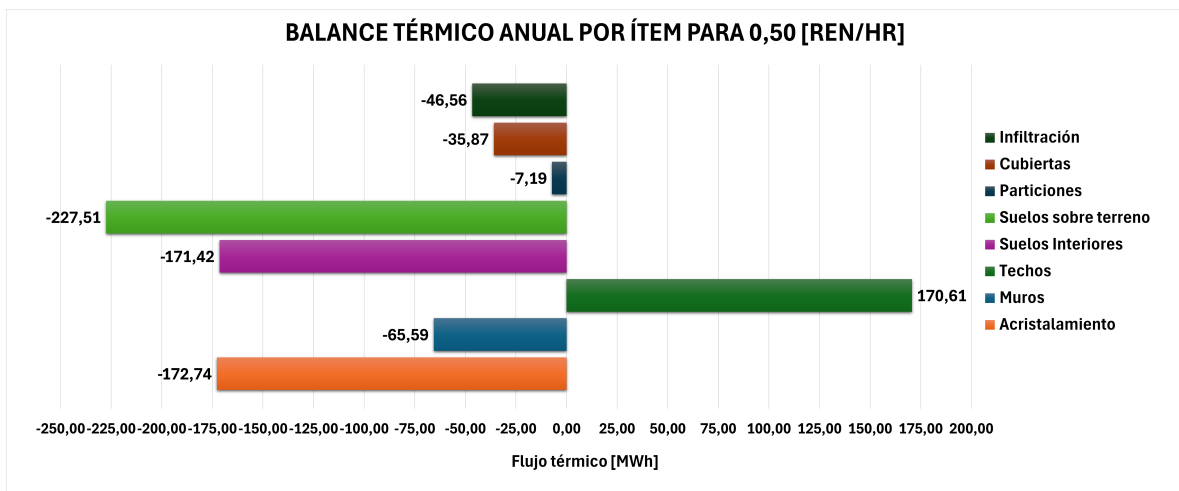


Figura G.26: Balance térmico para 0,5 [ren/hr].

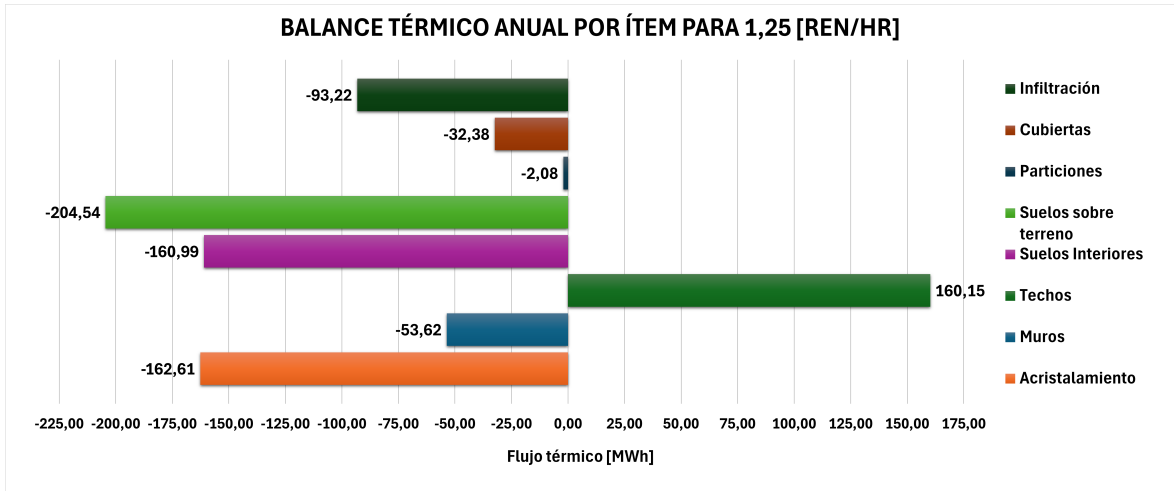


Figura G.27: Balance térmico para 1,25 [ren/hr].

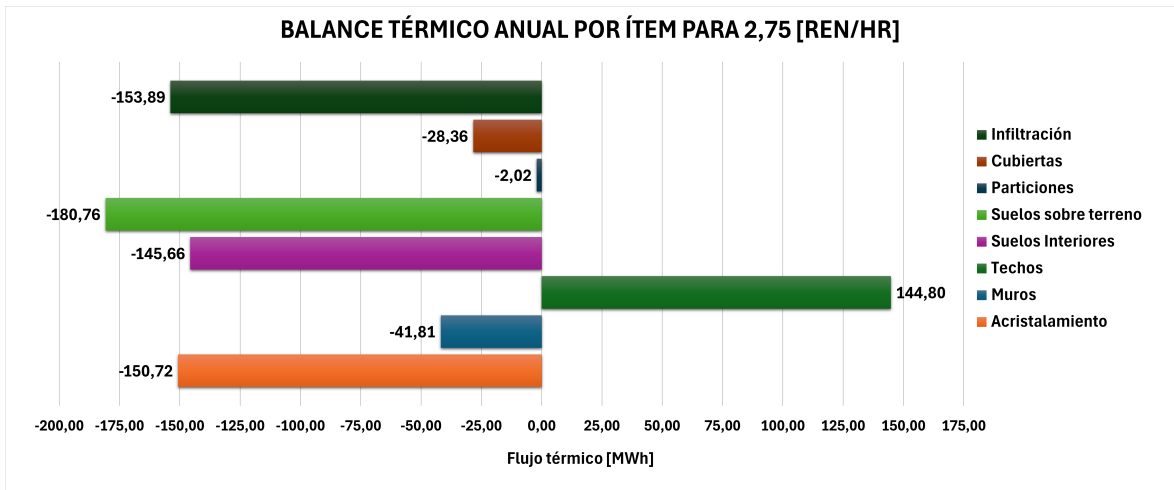


Figura G.28: Balance térmico para 2,75 [ren/hr].

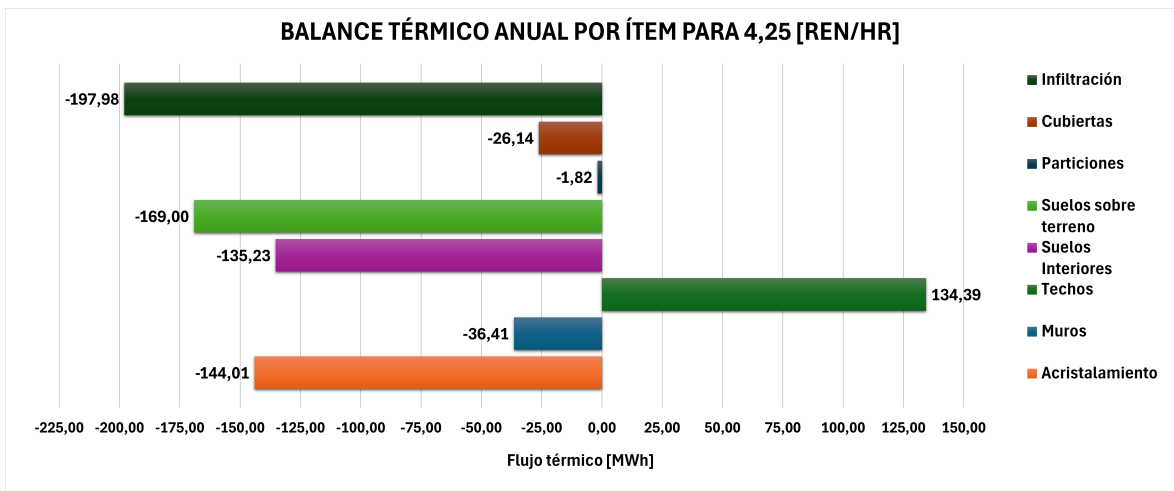


Figura G.29: Balance térmico para 4,25 [ren/hr].

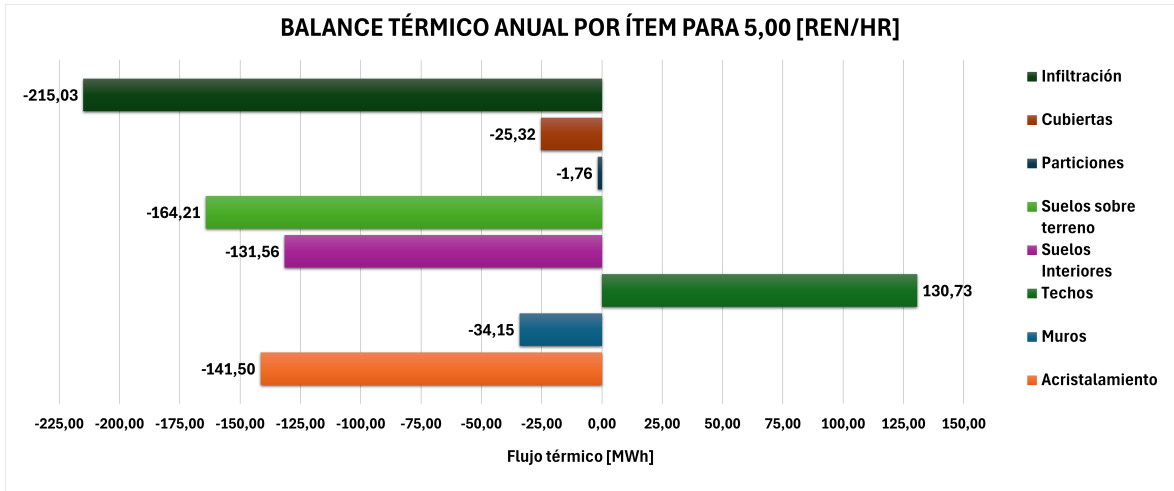


Figura G.30: Balance térmico para 5,0 [ren/hr].