



Universidad de Chile
Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas
Departamento de Ingeniería Civil

Estudio de tecnologías para la reducción del consumo energético destinado a confort térmico para el Edificio de Ingeniería Civil

MEMORIA PARA OPTAR AL TÍTULO DE INGENIERO CIVIL

CAMILO ENRIQUE CÓRDOVA TORNERÍA

PROFESOR GUÍA:
MIGUEL BUSTAMANTE SEPULVEDA

MIEMBROS DE LA COMISIÓN:
MAURICIO TOLEDO VILLEGAS
GABRIEL RODRÍGUEZ JAQUE

SANTIAGO DE CHILE
AGOSTO DE 2011

RESUMEN DE LA MEMORIA
PARA OPTAR AL TÍTULO DE
INGENIERO CIVIL
POR: CAMILO CÓRDOVA T.
FECHA: 03/08/2011
PROF. GUIA: Sr. MIGUEL BUSTAMANTE

“ESTUDIO DE TECNOLOGÍAS PARA LA REDUCCIÓN DEL CONSUMO ENERGÉTICO DESTINADO A CONFORT TÉRMICO PARA EL EDIFICIO DE INGENIERÍA CIVIL”

El presente trabajo de título tiene por finalidad proponer y evaluar tecnologías para la reducción del consumo energético destinado a confort térmico para el Edificio de Ingeniería Civil, especialmente en verano.

El edificio de Ingeniería Civil de la Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas de la Universidad de Chile presenta problemas de confort térmico para quienes ocupan estas dependencias, sobre todo en verano, a pesar de que el consumo energético es más elevado en invierno. En muchos sectores de este edificio, que está destinado a oficinas para docentes, salas de reuniones, salas de computadores y salas de memoristas mayoritariamente, no se alcanza un estado de confort térmico. Estudios previos identifican los sectores más críticos del edificio. Oficinas docentes ubicadas en los sectores perimetrales norte y poniente del edificio alcanzan los 35°C de temperatura. Ante esto, el sistema de climatización del edificio no logra cubrir la carga térmica que se necesita para mantener un estado térmico operable.

En primera instancia se modela el caso actual del edificio con el programa computacional Design Builder, llamándolo caso base. Éste considera aspectos como la orientación y posición geográfica del edificio. Además se simulan las cargas térmicas en su estado actual, tanto internas como externas, así como la iluminación, ocupación y los equipos de computación. Se determina la carga térmica en este caso base y se compara con la implementación en el modelo con las soluciones propuestas en este trabajo: sombreadamiento, fachada ventilada, ventilación nocturna y ventilación de confort.

El resultado final de la estimación de ahorro de energía para cada caso determina que el sombreadamiento sumado a la ventilación nocturna es la solución idónea para implementar en el edificio de Ingeniería Civil. Ambas soluciones son complementarias y unidas alcanzan la mayor reducción del consumo energético del aire acondicionado.

El gasto energético diario estimado para el caso base es de 1722kWh, mientras que el caso con sombreadamiento y ventilación nocturna se estima un consumo energético diario de 1248kWh. Esto se traduce en una reducción de un 27%. El sombreadamiento reduce las ganancias térmicas provenientes de la radiación solar mientras que la ventilación nocturna elimina el calor acumulado en las masas internas del edificio.

Se concluye que la implementación adecuada de ambas soluciones en conjunto mejorará las condiciones de confort del edificio, ya que le resta carga térmica al sistema de aire acondicionado posibilitando un mejor funcionamiento de éste.

Índice General

1	Antecedentes Generales	5
1.1.	<i>Motivación</i>	6
1.2.	<i>Objetivos</i>	6
1.4.	<i>Definiciones</i>	5
1.5.	<i>Normativa Vigente en Chile</i>	7
1.6.	<i>Ganancias Típicas de Edificios</i>	8
1.7.	<i>Guía de Lectura</i>	11
2	Fenómenos térmicos en edificios	12
2.1.	<i>Inercia Térmica</i>	12
2.2.	<i>Efecto Invernadero</i>	14
2.2.1.	La radiación solar	14
2.2.2.	La radiación infrarroja	15
2.2.3.	Comportamiento de Vidrio Simple	15
2.2.4.	Mecanismo de funcionamiento del Efecto Invernadero	16
2.3.	<i>Efecto Chimenea</i>	17
3	Edificio de Ingeniería Civil	18
3.1.	<i>Descripción Edificio Ingeniería Civil</i>	18
3.3.	<i>Análisis del estudio térmico</i>	27
4	Soluciones a Implementar	29
4.1.	<i>Sombreamiento (Shading)</i>	30
4.1.1.	Trayectoria solar	32
4.1.2.	Aplicaciones en Chile y experiencia	33
4.2.	<i>Fachadas Ventiladas</i>	35
4.2.1.	Principio bioclimático de la Fachada Ventilada	36
4.2.2.	Composición de Fachada Ventilada	35
4.2.3.	Características Fachadas Ventiladas	36
4.2.4.	Ejemplos aplicaciones en Santiago	37
4.3.	<i>Ventilación Nocturna</i>	39
4.4.	<i>Ventilación de confort</i>	44

5	Análisis Cuantitativo de Soluciones	44
5.1.	<i>Sombreamiento (Shading)</i>	<i>52</i>
5.2.	<i>Fachadas Ventiladas.....</i>	<i>57</i>
5.3.	<i>Ventilación Nocturna</i>	<i>58</i>
5.4.	<i>Ventilación de confort.....</i>	<i>61</i>
5.5.	<i>Sombreamiento y ventilación nocturna</i>	<i>61</i>
6	Evaluación Económica	64
7	Discusión.....	66
8	Conclusiones generales sobre el comportamiento térmico del edificio	668
9	Conclusiones	70
	REFERENCIAS.....	71
	ANEXO A	73
	ANEXO B	75
	ANEXO C	82
	ANEXO D	84
	ANEXO E.....	94

Índice de Figuras

Figura 1: Diagrama de flujo para estudio de soluciones para Edificio de Ingeniería Civil.....	4
Figura 2: Mapa de la zonificación climática habitacional para Chile	7
Figura 3: Ejemplo de Inercia térmica para un recinto cerrado	13
Figura 4: Relación entre temperatura de radiación y longitud de onda.....	14
Figura 5: Comportamiento vidrio simple a la radiación solar	15
Figura 6: Esquema de efecto invernadero en edificaciones	16
Figura 7: Esquema de efecto chimenea es un edificio.....	17
Figura 8: Fachada Norte edificio Ingeniería Civil.....	18
Figura 9: Fachada sur edificio Ingeniería Civil	18
Figura 10: Gastos de energía edificio Ingeniería Civil	20
Figura 11: Mediciones de temperatura de oficina de fachada Poniente quinto piso.....	23
Figura 12: Mediciones de temperatura de oficina con fachada norte del quinto piso.....	24

Figura 13: Mediciones de temperatura de oficina de fachada norte del cuarto piso	24
Figura 14: Mediciones de temperatura de oficina de fachada oriente del cuarto piso.....	24
Figura 15: Mediciones de temperatura de oficina de fachada Poniente.....	25
Figura 16: Mediciones de temperatura de oficina con fachada poniente del tercer piso.....	25
Figura 17: Mediciones de temperatura de oficina con fachada norte del tercer piso	25
Figura 18: Mediciones temperatura pasillos del tercer piso.....	26
Figura 19: Mediciones de temperatura de sala de computadores norte	26
Figura 20: Dibujo ejemplo de voladizo.....	30
Figura 21: Parasol en el edificio Scottish Office, Edimburgo.....	31
Figura 22: Parasol Toldo en el Royal Albert Hall, Londres	31
Figura 23: Quiebravistas.....	31
Figura 24: Trayectoria solar para hemisferio Sur	32
Figura 25: Aeropuerto Arturo Merino Benítez, Santiago	33
Figura 26: Vista Interior Clínica Avansalud	34
Figura 27: Componentes de fachadas ventiladas	35
Figura 28: Funcionamiento de la fachada ventilada	36
Figura 29: Clínica Bicentenario, Estación Central.....	37
Figura 30: Edificio C4 Clínica Las Condes.....	38
Figura 31: Interiores en un recinto con ventilación nocturna según Givoni, Israel	40
Figura 32: Diagrama psicrométrico en el que se muestra el efecto de la velocidad del aire interior en el confort térmico	42
Figura 33: Definición muros exteriores Design Builder.....	44
Figura 34: Definición de propiedades para divisiones interiores.....	45
Figura 35: Definición losas Design Builder	45
Figura 36: Definición de propiedades del cielo falso en Design Builder	46
Figura 37: Propiedades vidrio simple de espesor 5mm	46
Figura 38: Propiedades vidrio doble (termopanel)	46
Figura 39: Tipos de instalación para luminaria en Design Builder	47
Figura 40: Iluminación para edificio en Design Builder.....	47
Figura 41: Densidad de ocupación para edificio Design Builder	48
Figura 42: Ejemplo de configuración de ganancias producidas por equipos de computación para oficina	48
Figura 43: Ajuste de temperaturas para el aire acondicionado.....	49
Figura 44: Rendimiento de equipo de enfriamiento.....	49
Figura 45: Modelo Design Builder de Edificio Ingeniería Civil.....	50
Figura 46: Balance térmico para el Edificio de Ingeniería Civil para el día 15 de Enero.	50
Figura 47: Temperaturas para oficina norte del cuarto piso para el 15 de Enero 2002	51
Figura 48: Trayectoria y radiación solar para Santiago durante el día 15 de Enero	52
Figura 49: Protecciones locales de sombreado para ventanas	53
Figura 50: Parámetros para el diseño de quiebravistas en Design Builder.....	53
Figura 51: Modelo edificio con quiebravistas en Design Builder	54

Figura 52: Balance térmico para edificio con protección solar día 15 de Enero.....	54
Figura 53: Temperaturas estimadas para oficina norte cuarto piso con sombreado, día 15 de Enero	55
Figura 54: Simulación edificio con y sin sombreado para diferentes horas del día 15 de Enero ...	56
Figura 55: Propiedades de fachada ventilada para edificio	57
Figura 56: Ajuste de ventilación nocturna por zona para modelo.....	58
Figura 57: Balance térmico para edificio con ventilación nocturna día 15 de Enero.....	59
Figura 58: Temperaturas de oficina norte del cuarto piso con ventilación nocturna.....	60
Figura 59: Balance de calor para edificio con ventilación natural para el día 15 de Enero	61
Figura 60: Balance de calor para edificio con sombreado y ventilación nocturna para el día 15 de Enero	62
Figura 61: temperaturas para oficina norte de cuarto piso con sombreado y ventilación nocturna	63
Figura 62: Consumo energético diario para las soluciones propuestas para el edificio	63

Índice de Tablas

Tabla 1: Calor generado por persona según actividad realizada	9
Tabla 2: Tipo de luminaria y su rendimiento.....	9
Tabla 3: Poder de consumo promedio para equipos de oficina	10
Tabla 4: Retraso para materiales comunes de 1 metro de espesor	12
Tabla 5: Dimensiones área útil del Edificio de Ingeniería Civil.....	19
Tabla 6: Densidad de personas para todos los pisos	19
Tabla 7: Iluminación de áreas con distintos tipos de iluminación	21
Tabla 8: Consumo de equipos electrónicos según tipo de uso de espacios	21
Tabla 9: Consumo de energía en edificio	22
Tabla 10: Consumos de Extractores de aire estimados para instalar	65
Tabla 11: Ahorro en consumo de electricidad para la época de verano	65
Tabla 12: Inversión máxima realizable para cada solución para edificio	65
Tabla 13: Consumo de energía diario en aire acondicionado para edificio con soluciones implementadas.....	66

1 Antecedentes Generales

Los gastos energéticos de un edificio, ya sea habitacional o de oficinas, se enfocan en una medida no despreciable en satisfacer la sensación de confort térmico de sus habitantes u ocupantes. Para poder ofrecer confort térmico a las personas dentro de un edificio se recurre habitualmente a sistemas y tecnologías que en nuestros días ya no son sustentables debido a su elevado consumo. Esto lleva a idear nuevas formas de satisfacer nuestras necesidades de confort térmico pero con un consumo energético razonable y factible de aplicar. Los edificios antiguos, y quizás muchos de los que se están construyendo actualmente, en el gran Santiago no consideraron los gastos energéticos que se producirían en el futuro para satisfacer las necesidades de confort térmico de sus habitantes, lo que da como resultado edificios ineficientes.

El edificio de Ingeniería Civil presenta este problema de falta de confort térmico, especialmente en espacios de alta carga térmica interna como lo son las salas de computadores para alumnos, las oficinas de profesores y salas de reuniones [1]. Para acercarse a la zona de confort se utilizan equipos de enfriamiento con las consecuencias de altos costos de operación.

1.1. Motivación

El presente trabajo tiene por finalidad buscar soluciones para disminuir el gasto en confort térmico para el Edificio de Ingeniería Civil de la Facultad Ciencias Físicas y Matemáticas de la Universidad de Chile.

El edificio en cuestión presenta un elevado gasto energético destinado a confort térmico, el cual es más elevado en invierno que en verano. En verano las ganancias térmicas que tiene el edificio sobrepasan la capacidad de enfriamiento del equipo de refrigeración del edificio. Esta situación hace que no se alcance siquiera la temperatura mínima de confort necesaria.

La focalización del problema es posible debido al estudio térmico hecho al edificio desarrollado por Luis Guillermo Miranda Olave, donde se develan las patologías térmicas del edificio en verano, además de identificar los sectores más críticos térmicamente.[1]

1.2. Objetivos

Objetivos Generales:

- Evaluar alternativas para la disminución de gasto energético en confort térmico aplicable a edificios de oficina.

Objetivos Específicos:

- Determinar la cantidad de energía que se gasta en confort térmico en el edificio de ingeniería Civil y contextualizarlo en el gasto total que demanda este edificio.
- Determinar soluciones a implementar en el edificio de Ingeniería Civil en base a la baja en la carga térmica que produzca.

1.3. Metodología

El objetivo principal del trabajo es cuantificar el beneficio que conlleva la implementación de soluciones térmicas para el edificio de Ingeniería Civil. El problema de enfriamiento del edificio hace pensar en soluciones que sean posibles de analizar computacionalmente y compararlas con la misma herramienta. Las soluciones a implementar son sombreado, fachada ventilada, ventilación nocturna y ventilación de confort. Cada una de ellas produce una baja en la carga térmica que debe soportar el equipo de enfriamiento instalado en el edificio en cuestión.

Con la herramienta computacional Design Builder se puede estimar la baja en la carga térmica producida por cada solución. DesignBuilder es una herramienta computacional para verificar el comportamiento energético, de luminosidad y confort de edificios. Desarrollado para simplificar el proceso de la simulación de edificios, permite comparar rápidamente la función y el desempeño del diseño de edificio.

En Design Builder se modelará el estado actual del edificio de Ingeniería Civil, respetando orientación, porcentaje y tipo de vidriado (simple y termopanel), iluminación y uso del edificio (ocupación y equipos de escritorio), además de su condición de borde dada por la sombra que producen los edificios contiguos.

Se estudiará el mecanismo de funcionamiento de cada solución para así reproducirlo en la modelación.

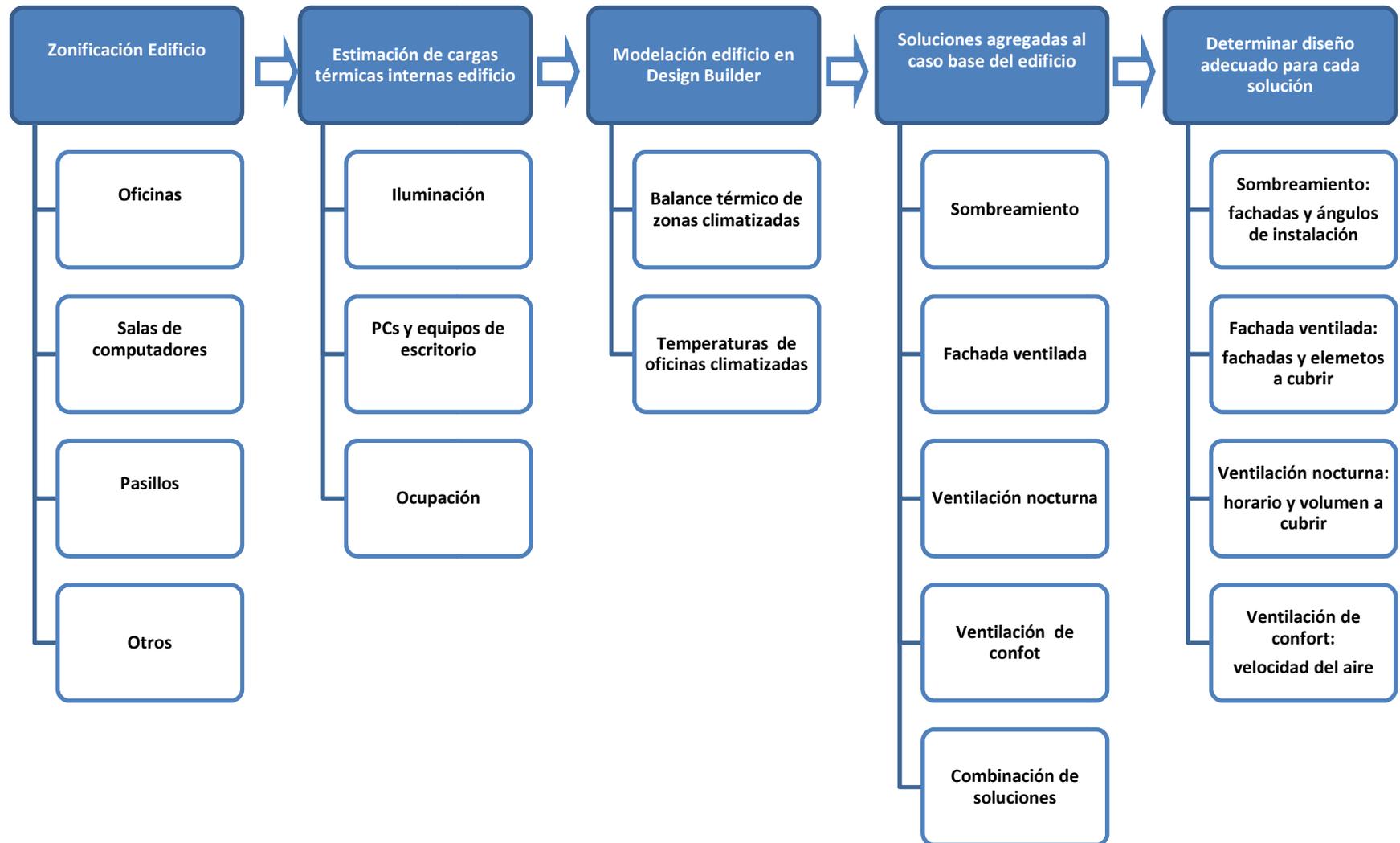
El estudio térmico del edificio de Ingeniería Civil hecho previamente muestra las falencias térmicas que se deben atacar en este caso. Identifica los focos problemáticos, pisos, y más específicamente oficinas más críticas.

Se calculará la potencia máxima que debe soportar el equipo de enfriamiento según la modelación hecha en el estado actual del edificio. Se incluirán luego las soluciones al modelo por separado para poder obtener el nuevo valor de potencia máxima que debe soportar el equipo de enfriamiento. La diferencia entre la potencia máxima del equipo antes y después entrega el beneficio diario en carga térmica ahorrada por cada solución.

El sombreado se modela implementando quebravistas (Louvre en Design Builder), en las fachadas necesarias, de acuerdo al estudio térmico. La fachada ventilada se modela de forma que produzca la aislación de muros perimetrales del edificio. La ventilación nocturna se modelará de forma mecánica, con extractores y ventiladores de muro capaces de renovar el número de veces necesario cada volumen que se indique en función de las necesidades del edificio.

La Figura 1 muestra el diagrama de flujo del trabajo a desarrollar.

Figura 1: Diagrama de flujo para estudio de soluciones para Edificio de Ingeniería Civil



1.4. Definiciones

Confort térmico: es la manifestación subjetiva de satisfacción con el ambiente térmico existente. [2]

Conductividad térmica (λ): cantidad de calor que en condiciones estacionarias pasa en una unidad de tiempo a través de una unidad de área de una muestra de material de espesor unitario, cuando se establece una diferencia unitaria de temperaturas entre sus caras. Se mide en (W/mK). [3]

Coefficiente superficial de transferencia térmica (h): flujo que se transmite por unidad de área desde o hacia una superficie en contacto con el aire cuando entre éste y la superficie existe una diferencia unitaria de temperaturas. Se expresa en (W/m²K). [3]

Resistencia térmica: oposición al paso del calor que presentan los elementos de construcción.

Se distinguen cuatro casos:

Resistencia térmica de una capa material (R): para una capa de caras planas y paralelas, de espesor e , conformada por un material homogéneo de conductividad térmica λ , la resistencia térmica R queda dada por:

$$R = \frac{e}{\lambda}$$

Se expresa en m²K/W. [3]

Resistencia térmica total de un elemento compuesto (R_T): inverso de la transmitancia térmica del elemento. Suma de las resistencias de cada capa del elemento. [3]

$$R_T = \frac{1}{U}$$

Se expresa en m²K/W.

Resistencia térmica de una cámara de aire no ventilada (R_g): resistencia térmica que presenta una masa de aire confinada (cámara de aire). Se expresa en m²K/W. [3]

Resistencia térmica de superficie (R_s): Inverso del coeficiente superficial de transferencia térmica h , es decir:

$$R_s = \frac{1}{h}$$

Se expresa en m²K/W. [3]

Transmitancia térmica (U): flujo de calor que pasa por unidad de superficie del elemento y por grado de diferencia de temperaturas entre los dos ambientes separados por dicho elemento. [3]

Envolvente térmica de un edificio: serie de elementos constructivos a través de los cuales se produce el flujo térmico entre el ambiente interior y el ambiente exterior del edificio. Está constituida básicamente por el complejo de techumbre, muros y ventanas. [4]

Temperatura de confort: Para la realización de este estudio la temperatura de confort se considerará entre 18°C y 22°C.

Pérdidas por renovaciones de aire: pérdida de calor de un espacio interior que se produce por efecto de la renovación del aire. [5]

Puente térmico: parte de un cerramiento con resistencia térmica inferior al resto del mismo, lo que aumenta la posibilidad de producción de condensaciones y pérdidas en esa zona en invierno. [5]

1.5. Normativa Vigente en Chile

La Norma NCh1079, “Zonificación climático habitacional para Chile y recomendaciones para el diseño arquitectónico” establece una zonificación climática para Chile, que caracteriza cada zona. La Figura 2 muestra la zonificación de todo el país. [6]

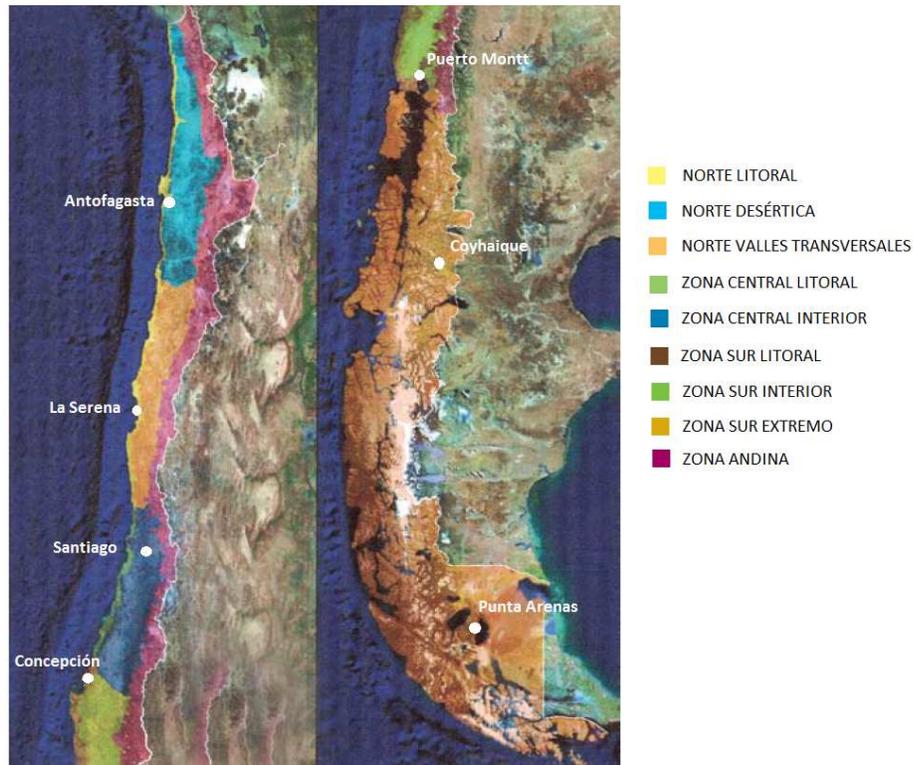


Figura 2: Mapa de la zonificación climática habitacional para Chile [7]

Santiago corresponde a la Central Interior:

Central Interior (CI): valle central comprendido entre la zona NL y la precordillera de los Andes por bajo los 1000 m. Por el norte comienza con el valle del Aconcagua y por el sur llega hasta el valle del Biobío excluido.

Características

Zona de clima mediterráneo. Temperaturas templadas. Inviernos de 4 a 5 meses. Vegetación normal. Lluvias y heladas en aumento hacia el sur. Insolación intensa en verano, especialmente hacia el noreste. Oscilación diaria de temperatura moderada, aumentando hacia el este. Viento del suroeste.

Según esta norma la transmitancia térmica máxima de los muros perimetrales de la envolvente debe ser:

$$U_{max} = 1,9 \left[\frac{W}{m^2K} \right]$$

1.6. Ganancias Típicas de Edificios

Ganancias exteriores

- *Radiación solar que entra a través de cerramientos transparentes.*

Debe tenerse en cuenta: la radiación incidente, factores de amortiguación debidos a persianas o cortinas y calidad del vidrio y sombras proyectadas por elementos exteriores. Debido a que una parte no despreciable del calor solar que entra en el recinto se utiliza para calentar la estructura del mismo y los objetos situados en su interior, calor que luego se devuelve al ambiente interior, en un cálculo más afinado de la carga instantánea puede tenerse en cuenta el efecto de este almacenamiento de calor. [8]

- *Radiación solar sobre cerramientos opacos.*

En régimen de verano, el calor penetra en la pared a través de su cara exterior debido a la acción combinada del aire exterior y de la radiación solar, con lo cual la pared se va calentando progresivamente desde fuera hacia dentro y cuando el aporte de calor desde el exterior disminuye, la pared se enfría también desde dentro hacia fuera. En definitiva hay almacenamiento de calor en la pared y un retraso en la llegada de la demanda de calor en el interior, esto hace que la demanda real no coincida con la instantánea calculada a partir de las condiciones interiores y exteriores. [8]

- *Temperatura del aire exterior.*

Una temperatura del exterior más alta que la del interior hace que el calor fluya a través de las ventanas, tabiques y suelos. [8]

- *Aire exterior necesario para la ventilación.*

Generalmente, se necesita aire exterior para renovar parte del interior a fin de mantener las condiciones de salubridad y bienestar. Como en el caso de las infiltraciones, esta sustitución de aire interior por exterior, impone una carga que puede ser importante y que deberá tenerse en cuenta. [8]

Ganancias Internas

- *Ocupantes*

El cuerpo humano, debido a su metabolismo, genera calor en su interior y lo cede por radiación, convección y evaporación desde su superficie, y por convección y evaporación a través del sistema respiratorio. La cantidad de calor generado y disipado depende de la temperatura ambiente y del grado de actividad de la persona. La tabla 1 muestra la potencia que genera una persona según la actividad que realiza. [8]

Tabla 1: Calor generado por persona según actividad realizada [9]

Actividad	Ganancia persona [W]
Sentado, inactivo	59
Sentado, trabajo liviano	63
Sentado, trabajo moderado (oficina)	65
Parado, trabajo liviano, caminando	66
Trabajo pesado	105

- *Iluminación*

El alumbrado constituye una fuente de calor sensible. Este calor se emite por radiación, convección y conducción. Un porcentaje del calor emitido por radiación es absorbido por los materiales que rodean el local, pudiendo también producirse estratificación del calor emitido por convección. La tabla 2 muestra diferentes tipos de luminarias y su rendimiento. [8]

Tabla 2: Tipo de luminaria y su rendimiento (Fuente: www.gechile.cl)

Iluminación	Potencia [W]	Luminosidad [lum]	Rendimiento [lum/W]
Tubo Fluorescente T10 20W blanco	20	1110	55,5
Tubo Fluorescente T10 40W blanco	40	2560	64
CFL tritubo 20 W	20	880	44
CFL tritubo 23 W	23	1020	44,3
CFL espiral 14 W	14	950	67,9
CFL espiral 20 W	20	1350	67,5
CFL espiral 24 W	24	1750	72,9
Incandescente 60W/220V	60	710	11,8

- *Aparatos electrónicos y equipos informáticos.*

Consultar los datos de fábrica para valorar su disipación de calor. Si no se conoce, una opción prudente es aceptar que es igual a la potencia eléctrica consumida multiplicada por un factor de utilización. La tabla 3 muestra el consumo de equipos típicos de oficina. [8]

Tabla 3: Poder de consumo promedio para equipos de oficina [9]

Tipo de equipo	Consumo [W]
Computador de escritorio	55
Notebook	15
Monitores LCD 15"	12
Monitores LCD 17"	17
Monitores LCD 20"	32
Impresora de inyección de tinta	43
Impresora laser pequeña de escritorio	130
Impresora laser de escritorio	215
Impresora laser pequeña de oficina	320
Impresora laser grande de oficina	550

1.7. Guía de Lectura

Los capítulos del presente trabajo tienen los siguientes contenidos:

Capítulo 1: Descripción de motivación y objetivos del presente trabajo. Descripción de la metodología para alcanzar dichos objetivos. Definiciones y antecedentes necesarios para introducir al tema planteado.

Capítulo 2: Se describen los fenómenos térmicos que ocurren en edificios. Se abordan fenómenos apreciables como la inercia térmica, el efecto invernadero y en menor medida el efecto chimenea.

Capítulo 3: Descripción del Edificio de Ingeniería Civil. Se describe materialidad exterior e interior del edificio (muros exteriores, divisiones interiores, losas techo, etc). Definición de los espacios, oficinas salas de computación, entre otros. Densidad de ocupación según uso de espacio. Estimación de consumo de electricidad actual del edificio. Descripción de estudio térmico previamente realizado y sus conclusiones.

Capítulo 4: Estudio de las soluciones propuestas, sombreado, fachada ventilada, ventilación nocturna y ventilación de confort. Se analizará el mecanismo de funcionamiento de cada solución para luego en el capítulo 5 analizarla cuantitativamente en el programa Design Builder. Al final de cada solución se presenta una propuesta de diseño para el caso específico del Edificio de Ingeniería Civil.

Capítulo 5: Simulación de las distintas soluciones estudiadas en el capítulo 4 en Design Builder comparándolas con un caso base de referencia. Determinación de balances de calor y análisis de temperaturas del edificio para cada caso. En este capítulo se obtiene la solución que disminuye la mayor cantidad de carga térmica.

Capítulo 6: Análisis económico de las soluciones propuestas. Determinación de la inversión máxima a realizar a través de herramientas de evaluación económica.

Capítulo 7: Análisis y discusión de los resultados obtenidos. El análisis de las soluciones propuestas y la razón de su rendimiento para el caso específico del edificio de Ingeniería Civil.

Capítulo 8: Conclusiones generales del comportamiento térmico del edificio y las medidas que se deben adoptar para aplacar sus deficiencias térmicas.

Capítulo 9: Conclusiones sobre los resultados obtenidos y comentarios finales.

2 Fenómenos térmicos en edificios

2.1. Inercia Térmica

La temperatura del aire más la temperatura de radiación solar tienen, para *días típicos promedio estacional*, una variación horaria de forma sinusoidal. También la temperatura interior de un espacio, sin otros aportes térmicos que no sean de los cerramientos exteriores, sigue la misma curva un poco más *amortiguada*, con valores extremos que son menores que los máximos y mínimos exteriores, y con cierto *retraso* horario. [10]

La relación entre máxima temperatura interior y máxima exterior, es la *amortiguación térmica*, y la distancia horaria entre los dos máximos es el *retraso térmico*. A una mayor amortiguación corresponde una mayor *inercia térmica*. El retraso térmico depende del coeficiente λ , del calor específico y de la densidad del material. El retraso para materiales típicos se muestra en la Tabla 4.

Tabla 4: Retraso para materiales comunes de 1 metro de espesor

Material	Retraso [horas]
fibra de madera prensada	72
agua	62
madera	58
tierra muy húmeda	49
vidrio	46
ladrillos	32
hormigón	30
piedras y mármoles	22-25
aire	5,4
tierra muy seca	2

Cuanto más masivo sea un edificio, mayor inercia térmica y mejor comportamiento tendrá en regiones de gran oscilación diaria de temperatura. Eligiendo adecuadamente el espesor y tipo de materiales de una envolvente (muros perimetrales, pisos y techo) se puede desplazar la onda térmica de tal manera que cuando el exterior pase por el máximo en el interior se tenga el mínimo y viceversa. Tal condición es la ideal [11].

Una envolvente con gran inercia térmica ayuda a conservar la temperatura del interior de los locales habitables con mayor estabilidad a lo largo del día, entregando el calor acumulado en horas de la noche. Al aplicar inercia térmica en un edificio se debe tener en cuenta que las masas térmicas pueden estar ubicadas en pisos, losas, muros perimetrales, muros interiores y techos, siempre y cuando no estén cubiertas con materiales aislantes. [11]

El retardo térmico depende de la masa interpuesta y de la configuración del sistema en sí, donde influye en forma importante la ubicación del aislante térmico. A mayor masa interpuesta mayor es el retardo térmico. [11]

La Figura 3 muestra la acción de la inercia térmica de una fachada de inercia térmica visible. El amortiguamiento y retraso de la temperatura interior en función de la temperatura exterior se explican por la acción del fenómeno ya mencionado. El material de la envolvente principalmente conserva energía y la libera con desfase.

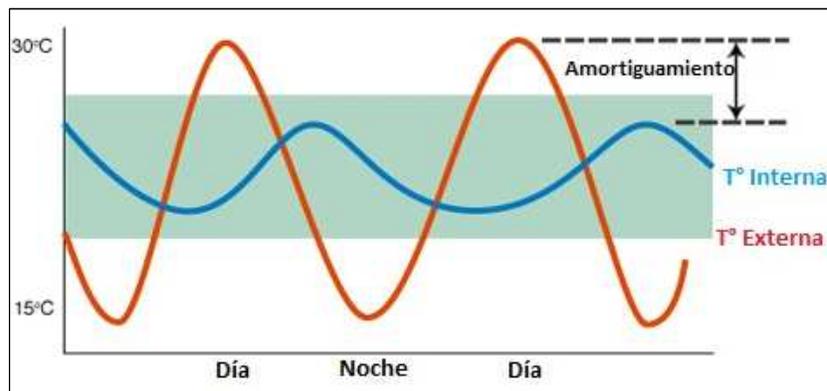


Figura 3: Ejemplo de Inercia térmica para un recinto cerrado

(Fuente: www.sustainablebuildingmaterials.co.uk)

2.2. Efecto Invernadero

2.2.1. La radiación solar

La radiación solar es el conjunto de radiaciones electromagnéticas emitidas por el Sol. La intensidad de la radiación solar en los confines de la atmosfera es de 1209kcal/hm², aproximadamente, el 21 de diciembre, cuando la tierra está en su perihelio, y de 1125kcal/hm² el 21 de junio, cuando está en su afelio. En otras épocas del año la intensidad de la radiación solar varía entre estos límites. Al atravesar la atmósfera disminuye considerablemente la intensidad de la radiación solar, de forma que una parte importante de ella se refleja hacia el espacio, dentro de la atmosfera, o es absorbida por diversas partículas atmosféricas. La radiación difusa, debida a la reflexión que se produce en las partículas de vapor de agua, de ozono, o de polvo atmosférica se reparte de una manera sensiblemente uniforme por la superficie de la tierra. Los valores relativos de estas dos radiaciones son variables y dependen de la distancia que deben recorrer los rayos a través de la atmosfera para alcanzar un punto de la tierra y de la limpieza de la atmosfera. [8]

Cuando la distancia a recorrer en el interior de la atmosfera aumenta, o la atmosfera se hace más opaca, disminuye la radiación directa y aumenta la difusa. Cuando una de las dos, o ambas, aumentan, el efecto resultante es reducir la cantidad de calor que llega a la superficie de la tierra.

La radiación solar está formada por una mezcla de ondas electromagnéticas de diferentes frecuencias. Las de longitud de onda comprendida entre 0,4 μm y 0,7 μm pueden ser detectadas por el ojo humano y constituyen la *luz visible*. Otras, aunque no son visibles, hacen notar igualmente sus efectos, al ceder a los cuerpos la energía que transportan. El espectro electromagnético completo se señala en la Figura 4.

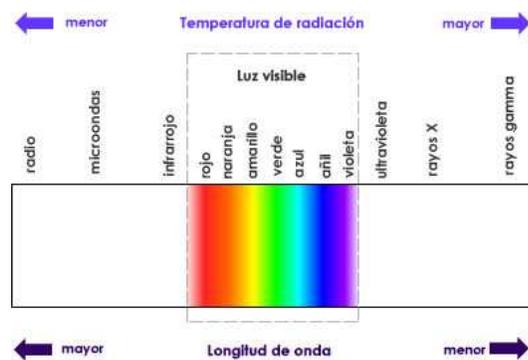


Figura 4: Relación entre temperatura de radiación y longitud de onda

(Fuente: www.protecsolfranquicias.com)

La radiación intermedia del espectro que se extiende de aproximadamente 0,1 a 100 μm e incluye una parte de la UV y de todo el visible y el infrarrojo (IR), se denomina radiación térmica y está relacionada con la transferencia de calor. [12]

2.2.2. La radiación infrarroja

La radiación infrarroja es un tipo de radiación electromagnética de una longitud de onda superior a la de la luz visible pero más corta que la de las microondas. Su longitud de onda está en el rango entre los 700 nanómetros y un milímetro, es la siguiente en longitud al rojo, el color de longitud de onda más larga de la luz visible. La radiación infrarroja se divide en:

Infrarrojo próximo: longitud de onda está comprendida entre los $0,8\mu\text{m}$ y los $2,5\mu\text{m}$.

Infrarrojo medio: longitud de onda está comprendida entre los $2,5\mu\text{m}$ y $50\mu\text{m}$.

Infrarrojo lejano: longitud de onda está comprendida entre los $50\mu\text{m}$ y los $1000\mu\text{m}$.

2.2.3. Comportamiento de Vidrio Simple

La radiación solar que llega directamente a un vidrio es absorbida por este pero no completamente. Una parte de la radiación traspasa el vidrio y se le llama *transmisión directa*, otra porción de esta radiación es absorbida por el vidrio la cual a su vez se re-irradiará hacia el interior y exterior. Esto se muestra en la Figura 5.

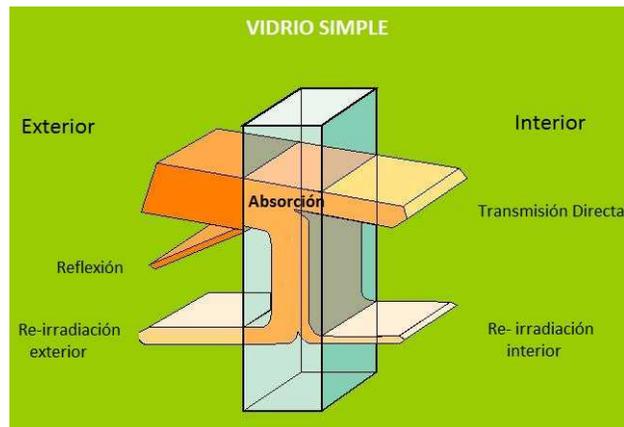


Figura 5: Comportamiento vidrio simple a la radiación solar

(Fuente: www.pilkington.com)

La proporción de cada una de las divisiones que tendrá la radiación sobre el vidrio depende de las propiedades de éste, como lo es el coeficiente de sombra. El **coeficiente de sombra (C.S.)** es un índice que mide la capacidad de filtrar el calor producido por los rayos directos del sol (radiación de onda corta). Mientras menor sea este número, mejor desempeño tiene el cristal. El coeficiente de sombra se calcula dividiendo el factor solar por 0.87, que corresponde al factor solar de un cristal incoloro de 3mm de espesor. El C.S. de un cristal de 3mm es 1.

2.2.4. Mecanismo de funcionamiento del Efecto Invernadero

El efecto invernadero se refiere a las circunstancias donde las ondas cortas de luz visible provenientes del sol pasan a través de medios transparentes y son absorbidos, pero las ondas más largas de re-irradiadas del infrarrojo proveniente de los objetos calentados son incapaces de pasar a través del medio. Que en este caso corresponde al vidrio. El encerramiento de la longitud de onda larga lleva a un mayor calentamiento y a una mayor temperatura resultante¹.

La Figura 6 grafica el efecto invernadero en un recinto con radiación solar hacia una fachada vidriada. El vidrio ordinario es transparente a la radiación infrarroja de longitud de onda más corta, más próxima a la luz visible, pero, prácticamente opaco a la radiación infrarroja de longitud de onda más larga.

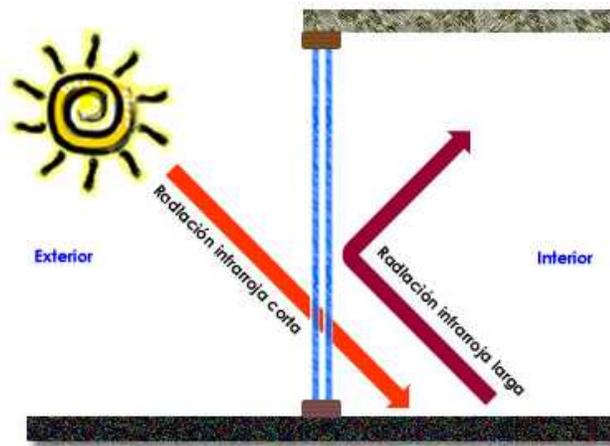


Figura 6: Esquema de efecto invernadero en edificaciones

(Fuente: www.absoluterprotecsol.com)

¹ <http://hyperphysics.phy-astr.gsu.edu/hbase/hframe.html>

2.3. Efecto Chimenea

El efecto chimenea se asemeja al producido en las chimeneas. La corriente de aire producida en una chimenea depende en la diferencia entre las temperaturas del gas fluido y el aire externo así como la altura de la chimenea. Durante el invierno una cosa similar ocurre en los edificios, aunque la diferencia entre el aire interior y exterior es mucho menor. Aparte de los edificios las fachadas ventiladas aprovechan este fenómeno de ascendencia del aire provocada por la diferencia de presiones, para renovar el interior de estas fachadas. Este fenómeno se muestra en la Figura 7.

La intensidad de este efecto chimenea dependerá de la distancia entre la apertura superior y la inferior, la diferencia entre la temperatura interior y exterior y la permeabilidad de los muros. A mayor distancia entre la apertura inferior y la apertura del superior, más intenso será el efecto chimenea².

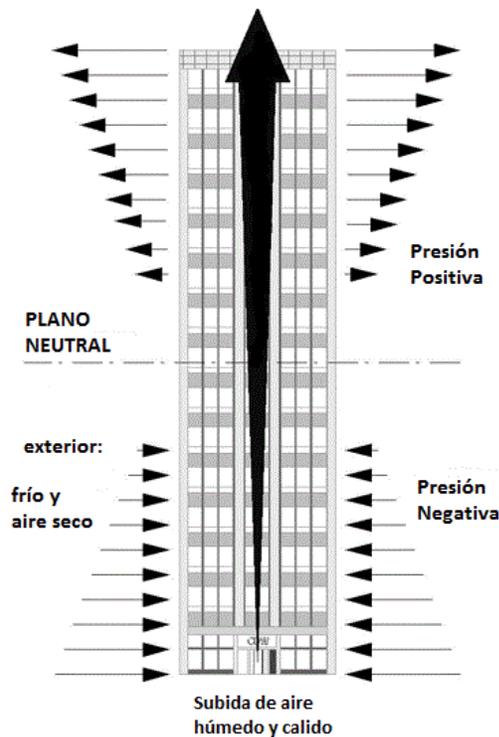


Figura 7: Esquema de efecto chimenea es un edificio

(Fuente: www.nrc-cnrc.gc.ca)

² <http://www.nrc-cnrc.gc.ca/eng/ibp/irc/cbd/building-digest-104.html>

3 Edificio de Ingeniería Civil

3.1. Descripción Edificio Ingeniería Civil

La Figura 8 muestra la apariencia exterior actual de la fachada norte del edificio. Muestra la distribución de las áreas vidriadas y singularidades. La Figura 9 muestra la cubierta de muro cortina que posee el edificio en su sección sur.



Figura 8: Fachada Norte edificio Ingeniería Civil



Figura 9: Fachada sur edificio Ingeniería Civil

Materialidad

- Muros perimetrales de hormigón armado de 35cm de espesor
- Muros interiores de tabiquería Volcametal³ de espesor 12 centímetros
- Losa de hormigón armado de 12 cm de espesor
- Sobre losa de hormigón 5cm
- Cubierta de piso oficinas de alfombra (no especificado)
- Cubierta de piso en pasillos de pisos de cerámica
- Cielo falso americano de fibra mineral
- Ventanas de termopanel Ingewall fachadas norte, poniente y sur
- Ventanas de vidrio simple de 5mm con perfiles de acero en fachada norte de primer y segundo piso de $A_{\text{Norte}}=76\text{m}^2$, fachada poniente $A_{\text{Poniente}}=35\text{m}^2$ aprox. (Ver anexo B, figuras B4 y B5)

Dimensiones

La Tabla 5 muestra el área útil de oficinas de profesores y otro tipo de oficinas, área útil de pasillos y área útil de sala de PC.

Tabla 5: Dimensiones área útil del Edificio de Ingeniería Civil

Piso	A Oficinas [m ²]	A pasillos [m ²]	A sala PC[m ²]
1	77	128	0
2	170	211	110
3	372	364	52
4	372	364	52
5	194	90	0
TOTAL	1185	1157	214

Utilización

La Tabla 6 muestra el promedio de personas que pueden utilizar cada piso, considerando que se utilizan los espacios a plenitud (ver tabla A5 del anexo A). La densidad de personas es similar a 0,13personas/m² para los pisos 2, 3 y 4.

Tabla 6: Densidad de personas para todos los pisos

Piso	personas	Área útil [m ²]	densidad [pers./m ²]
1	8	205,0	0,039
2	63	490,6	0,128
3	97	760	0,128
4	97	760	0,128
5	30	203	0,148

³ Solución constructiva compuesta por yeso-cartón y lana mineral.

Gasto Electricidad Edificio Ingeniería Civil

Para tener un orden de magnitud de los gastos que produce el edificio de ingeniería Civil se presentan en la Figura 10 el consumo de electricidad durante un año completo. El consumo corresponde al año 2006. En la actualidad la medición de la cantidad de kWh consumidos se encuentran fusionados con el edificio de geología por lo que un análisis de estos gastos eléctricos sería inadecuado.

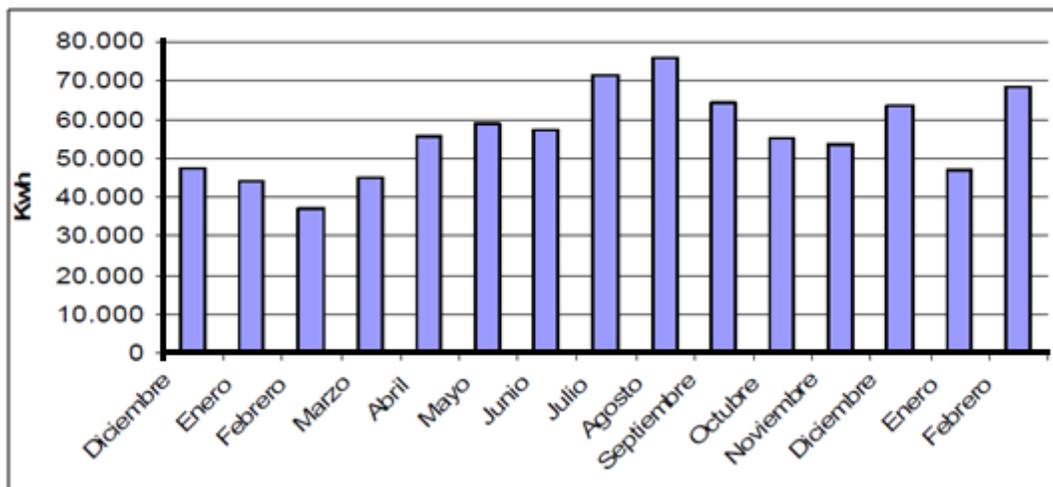


Figura 10: Gastos de energía edificio Ingeniería Civil [1]

El gasto anual para este edificio es de 685MWh con un área total de 6845m² se tiene un consumo de 100kWh/m²/año. El consumo promedio de electricidad para edificios ubicados en Santiago es de 165kWh/m²/año [1].

El ajuste de gasto de energía se debe hacer por el cambio de tecnologías y el tipo de luminaria instalada. Para contextualizar la magnitud de los posibles ahorros en aire acondicionado se analizan los gastos totales en electricidad.

Considerando de Noviembre a Marzo como época de verano el consumo promedio mensual en electricidad en esta época es de aproximadamente 51125kWh. Considerando 22 días hábiles se tiene un gasto diario de 2324kWh. Se entiende que los fines de semana y festivos igualmente existe consumo de electricidad, por lo que este promedio corresponde a una cota superior del consumo diario. Esta es una estimación gruesa pero permite tener una idea del gasto diario que se produce en las épocas de mayor carga térmica en el edificio.

Iluminación

Las oficinas se encuentran iluminadas por lámparas fluorescentes de 3x40W (diseño original) en oficinas de promedio 13m². Considerando que los tubos fluorescente T10 se hayan cambiado a tubos T10 de 20W que dan 1110 lúmenes cada uno se tiene que en cada oficina se entregan 512lum/m² aprox. (512lux). El mínimo para oficinas es 500lux.

Los espacios comunes como pasillos se iluminan a través de focos spot biselado embutido, de ampolleta incandescente de 60W, según modelo original de arquitectura. De este modo se alcanzan 320 lux. Posiblemente en la actualidad se alcance el mismo o un mayor nivel de luminosidad empleando CFL, de menor consumo para alcanzar por lo menos los 320lux. La iluminación mínima requerida para pasillo es de 150lux.

Tabla 7: Iluminación de áreas con distintos tipos de iluminación

Piso	Área T10 [m ²]	Área CFL [m ²]	Gasto diario [kWh]
1	217	760	105,1
2	351	211	64,1
3	372	414	87,7
4	372	414	87,7
5	194	140	37,8
TOTAL	1506	1939	382,4

Computadores y equipos de escritorio

Identificando el uso que se le da a los espacios del edificio se determinó a través de los cálculos el gasto que produce cada tipo de equipo electrónico indicado en la Tabla 3, así se obtiene el consumo indicado en la Tabla 8. El cálculo en detalle se encuentra en el anexo A (tablas A1, A2, A3 y A4).

Tabla 8: Consumo de equipos electrónicos según tipo de uso de espacios

Piso	Oficinas docentes	Memoristas	Sala PC	Sala reuniones	Consumo diario [kwh]
1	8	0	0	0	11,9
2	3	2	2	0	29,9
3	27	3	1	2	52,3
4	27	3	1	2	52,3
5	10	1	0	1	16,4
TOTAL	75	9	4	5	162,9

Espacios como oficinas secretarias se toman como oficinas docentes debido al consumo similar en equipos de escritorio.

Entonces se tiene un gasto en aire acondicionado diario en verano de:

$$E = 2324kWh - (163kWh + 382kWh) = 1779kWh$$

Consideremos que es una aproximación inicial ya para ver el orden de magnitud del consumo producido para confort térmico en verano. La Tabla 9 muestra la estimación del consumo eléctrico que produce el Edificio de Ingeniería Civil para cada ítem.

Tabla 9: Consumo de energía en edificio

Fuente	Consumo electricidad diario [kWh]	Porción del consumo diario total
Aire Acondicionado	1779	77%
Computadores	163	7%
Iluminación	382	16%

El consumo en climatización es mucho más significativo que el consumo en Iluminación y de computación para el edificio de Ingeniería Civil en particular.

3.2. Estudio Térmico del Edificio de Ingeniería Civil

En el periodo comprendido entre Diciembre de 2007 y Febrero de 2008 se realizó un estudio térmico para el edificio de ingeniería Civil, que correspondía a la memoria para optar al título de Ingeniero realizada por Luis Miranda Olave y dirigida por el profesor Miguel Bustamante. Esta memoria es el precedente principal para la realización del presente trabajo, ya que es en la memoria mencionada en donde se develan y dejan en claro patologías del edificio de Ingeniería Civil. [1]

Para realizar las mediciones se instalaron medidores de temperatura y humedad, los cuales registraban estos datos cada tres minutos durante ocho días, las zonas elegidas para la instalación de los sensores corresponde las oficinas en todas sus Orientaciones y en los pasillos interiores del edificio.

Dada la importancia que tienen las temperaturas exteriores, durante el periodo de mediciones interiores del edificio, se trabajo en paralelo a las mediciones con la base de datos del Departamento de Geofísica de la Facultad, el cual realiza mediciones diarias de temperatura, humedad y radiación, desde el año 2000. Estas lecturas son realizadas por instrumentos instalados en la terraza superior del edificio en estudio, por lo que representan en forma real el clima al cual éste es sometido.

A continuación se presentan algunos de los resultados de las mediciones, las cuales están ordenadas por piso y orientación:

Quinto Piso:

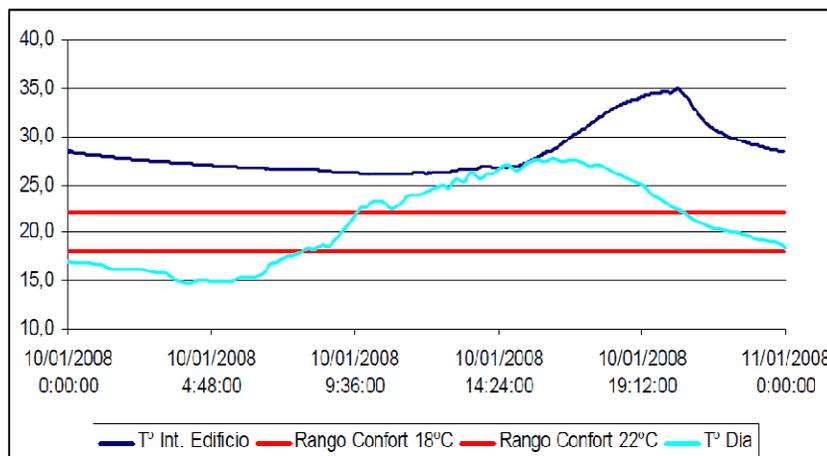


Figura 11: Mediciones de temperatura de oficina de fachada Poniente quinto piso [1]

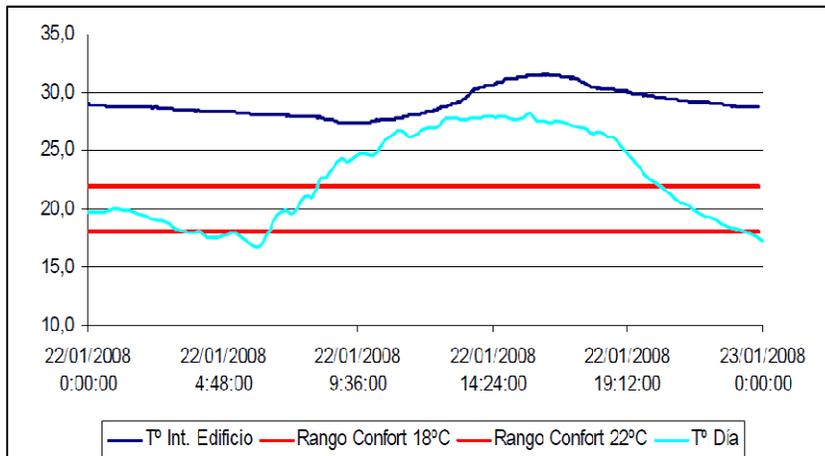


Figura 12: Mediciones de temperatura de oficina con fachada norte del quinto piso [1]

Cuarto Piso:

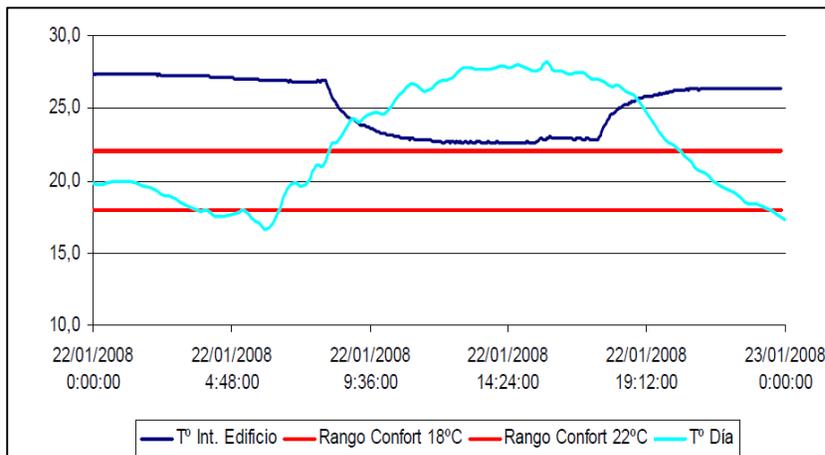


Figura 13: Mediciones de temperatura de oficina de fachada norte del cuarto piso [1]

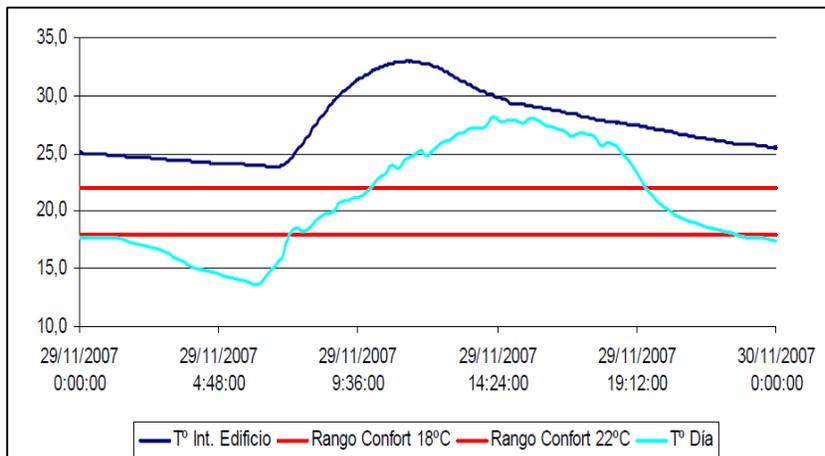


Figura 14: Mediciones de temperatura de oficina de fachada oriente del cuarto piso [1]

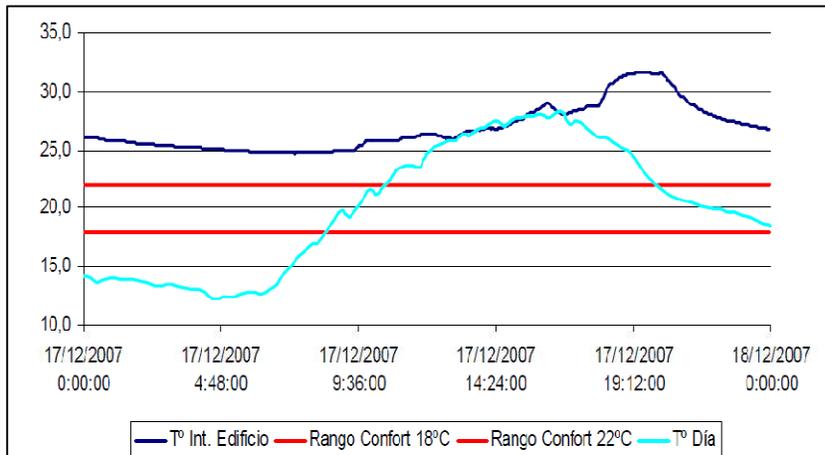


Figura 15: Mediciones de temperatura de oficina de fachada Poniente [1]

Tercer Piso:

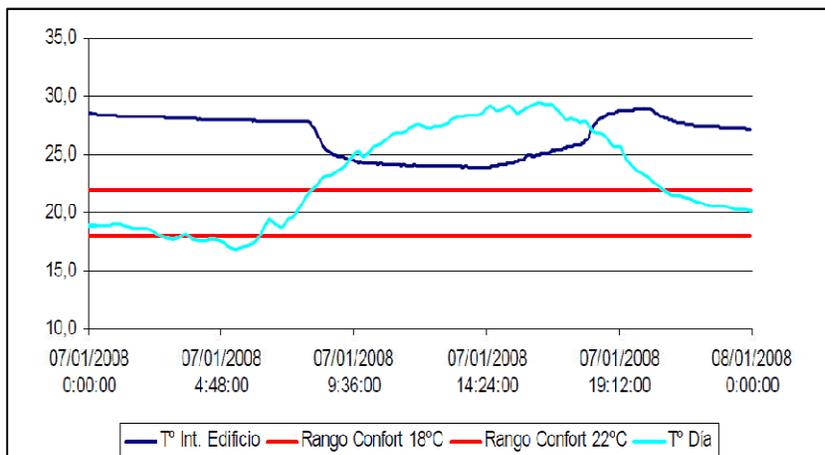


Figura 16: Mediciones de temperatura de oficina con fachada poniente del tercer piso [1]

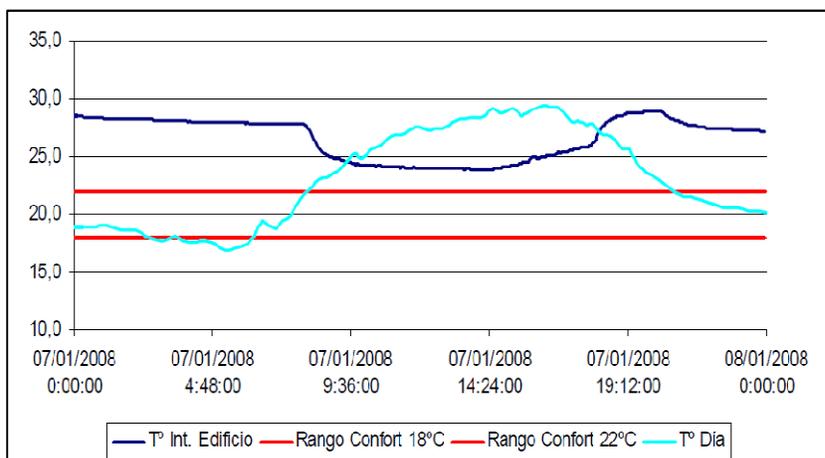


Figura 17: Mediciones de temperatura de oficina con fachada norte del tercer piso [1]

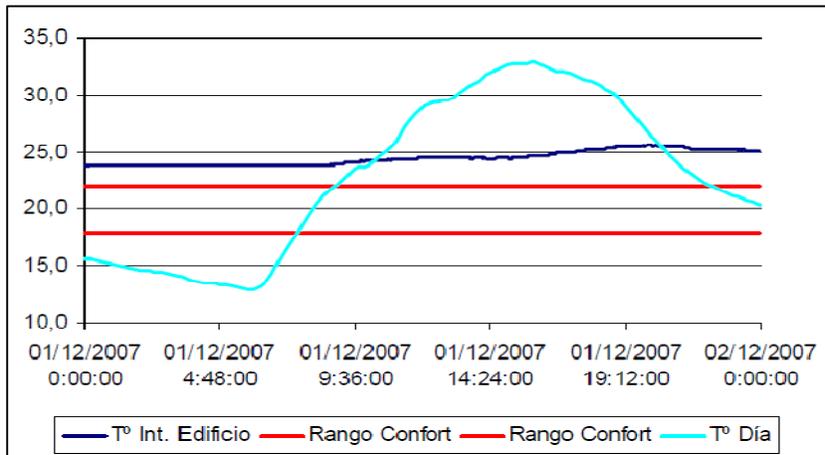


Figura 18: Mediciones temperatura pasillos del tercer piso [1]

Segundo Piso

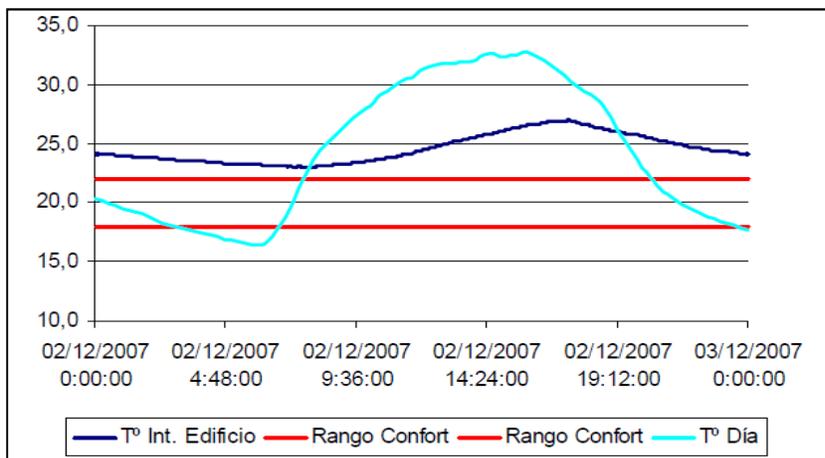


Figura 19: Mediciones de temperatura de sala de computadores norte [1]

3.3. Análisis del estudio térmico

Los problemas de comportamiento térmico del edificio que se describen a continuación fueron identificados a partir del análisis de los gráficos del estudio térmico realizado al Edificio de Ingeniería Civil. [1]

La Figura 11, la Figura 15 y la Figura 16 muestran que la orientación poniente es la de mayores temperaturas en el periodo de medición, el momento del día en que estas temperaturas llegan a su máxima es entre los 17:30 y las 20:00 horas, donde con facilidad superan los 35°C en los días más calurosos.

La Figura 14 muestra que las oficinas con orientación oriente presentan sus máximas temperaturas entre las 9:00 y 13:00 horas, llegando a los 33° C. alrededor de las 11:00 AM.

La Figura 12, la Figura 13 y la Figura 17 muestran que las oficinas con orientación norte presentan valores máximos de temperatura menores que las otras dos orientaciones, pero sobre éstos valores son más constantes durante todo el día, manteniéndose alrededor de los 30° C en forma permanente.

La Figura 18 muestra las temperaturas del pasillo del tercer piso, las mediciones de los pisos 4 y 5 son similares. Las temperaturas se caracterizan por alcanzar temperaturas máximas menores a la de las oficinas perimetrales del edificio, las temperaturas medidas rara vez superan los 25° C, y estas se mantienen constantes durante todo el día.

La Figura 19 muestra las temperaturas de la sala de computadores 1 de orientación norte. Las temperaturas medidas son un poco más bajas que las temperaturas de oficinas de pisos superiores con la misma orientación. Sin embargo las temperaturas siguen estando por sobre la temperatura máxima permitida en el rango de confort térmico.

La variable más importante que condiciona el comportamiento térmico de éste edificio es la incidencia de la radiación solar, esto explica los horarios en que se obtienen las máximas temperaturas en las fachadas oriente y poniente. Los termopaneles que se ocupa en las fachada, si bien son útiles para impedir el traspaso de calor por convección, no impiden el *ingreso de calor por radiación* al edificio, generando el efecto invernadero explicado en el capítulo 2.2, generando una concentración de calor al interior del edificio, que explica que se llegue a temperaturas interiores superiores a los 35°C.

También se logran identificar las diferencias existentes entre las temperaturas máximas que el edificio alcanza, las cuales varían según el piso, orientación e inclusive entre los pasillos y las oficinas existentes en cada piso. La razón por la cual se generan estas diferencias de temperatura se debe, principalmente, a la poca o nula circulación de aire entre los distintos ambientes del edificio, lo que se puede confirmar al ver las grandes diferencias de temperatura, las cuales llegan a ser de hasta 10 grados entre una oficina y su pasillo contiguo.

Otro aspecto importante en el comportamiento térmico del edificio, es la baja renovación del aire que éste tiene, en cada piso sólo existen 2 ventanas que se pueden abrir, las cuales se encuentran dentro de oficinas que no siempre son ocupadas, por lo que las puertas de las mismas por lo general se encuentran cerradas, limitando las renovaciones de aire en el interior e impidiendo al edificio eliminar calor.

Una cualidad importante de un edificio es su capacidad de absorber calor, ésta capacidad está dada principalmente por las masas de hormigón que lo conforman. En las mediciones realizadas se puede observar que las temperaturas del edificio son bastante constantes y muy altas durante el día y la noche. En la Figura 11 y la Figura 12 se muestran temperaturas de 30° C a las 0:00 AM, las cuales no bajan hasta que al día siguiente se vuelven a ocupar los sistemas mecánicos de enfriamiento con los que cuenta el edificio. La principal razón por la cual las temperaturas se mantienen altas y constantes se debe principalmente a la alta **inercia térmica** que presenta el edificio la cual está asociada a las masas de hormigón del mismo, alrededor de 1500 m³, y la capacidad aislante que tienen los termopaneles que retardan la pérdida de calor del mismo. Si bien éste retardo en la pérdida de calor es deseado en condiciones de invierno, debido a que reduce los costos asociados a calentar el edificio, en verano produce, durante gran parte del día, que las temperaturas internas de éste sean mayores que las externas, provocando incomodidad en los ocupantes.

Los elementos internos de los edificios, como son las separaciones interiores, ayudan a almacenar calor en momentos del día donde el ingreso de calor supera a la capacidad de los sistemas mecánicos. Un factor importante de éste edificio son los materiales ocupados para las terminaciones interiores del mismo. La tabiquería liviana y las separaciones de vidrio tienen baja masa térmica, lo que limita la capacidad de estos materiales de absorber el calor en el interior.

4 Soluciones a Implementar

Para poder solucionar los problemas presentes en el edificio de ingeniería Civil se debe primero analizar las soluciones posibles a implementar, tomando en cuenta ejemplos aplicados en Chile y en el mundo. Comprender como funciona cada solución es primordial para luego poder hacer un cálculo de orden de magnitud del posible efecto que pueda tener en el edificio.

La principal razón para estudiar más a fondo las soluciones que se mencionarán, es la factibilidad de calcular los posibles beneficios que traerán al comportamiento térmico del edificio.

Evitar y eliminar ganancias térmicas son las dos formas de atacar el problema que se presenta en el edificio de ingeniería Civil.

Es por eso que se analizan soluciones de ambas naturalezas.

- Sombreamiento
- Fachada Ventilada
- Ventilación Nocturna
- Ventilación de confort

4.1. Sombreamiento (Shading)

Esta solución tiene como objeto evitar las ganancias térmicas que se puedan producir a través de la radiación solar directa sobre las ventanas de la fachada de los edificios.

Los protectores solares deben orientarse en función a la trayectoria y ángulo solar a lo largo del año, así como a la orientación de las ventanas en cada fachada. Estos factores definirán el tipo de protector solar más conveniente; los parasoles fijos más utilizados son horizontales, verticales y frontales.

Las protecciones horizontales y los aleros de techo funcionan bien para ventanas y aberturas en fachadas norte. Para ángulos elevados de incidencia del sol, es decir, a las horas del mediodía, las protecciones horizontales protegen para todas las orientaciones. Para ángulos bajos de incidencia del sol, es decir, en las horas de la tarde, los protectores solares verticales y frontales son adecuados para ventanas en fachadas este, oeste, noreste, noroeste, sureste y suroeste.

Sombreamiento exterior

La forma más efectiva para controlar el sobrecalentamiento proveniente de la luz solar es evitar que esta llegue a las ventanas. El sombreado exterior es particularmente apropiado para edificios con grandes porcentajes de vidrio en su fachada donde las ganancias de calor solar serían de otro modo un problema mayor.

Dispositivos de Sombreamiento exterior

Voladizos Simples (Simple Overhangs) [9]

Los voladizos simples pueden ser altamente efectivos al bloquear altos ángulos de rayos de sol de verano. Estos trabajan particularmente bien en las ventanas de las fachadas orientadas hacia el norte, cuando el ángulo de incidencia es elevado.

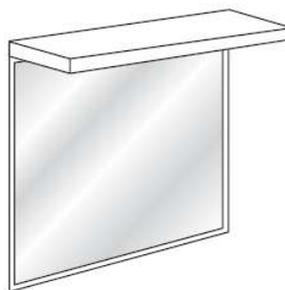


Figura 20: Dibujo ejemplo de voladizo [9]

Parasol (Brise Soleil, Sun Breaker) [9]

Los parasoles pueden ser fijados en una fachada existente. Estos no obstaculizan la apertura de las ventanas y tiene la cualidad de mantener una vista completa del exterior.



Figura 21: Parasol en el edificio Scottish Office, Edimburgo [9]

Toldo (Awning) [9]

En una serie de tipos de edificios, un toldo puede ser un atractivo y simple de instalar forma de proveer un voladizo retráctil.



Figura 22: Parasol Toldo en el Royal Albert Hall, Londres [9]

Quebravistas horizontales (louvres) [9]

Los quebravistas y otros tipos de persianas tienen el menor coeficiente de sombra de todos los sistemas de sombreado, el inconveniente es el bloqueo de la vista exterior.



Figura 23: Quebravistas [9]

4.1.1. Trayectoria solar

La trayectoria solar cambia según la estación del año y también según transcurren las horas del día. Para el caso específico de Santiago que se encuentra la (33° Latitud Sur), el sol siempre soleará más las fachadas Norte de los edificios, teniendo un ángulo de incidencia variable según la época del año.

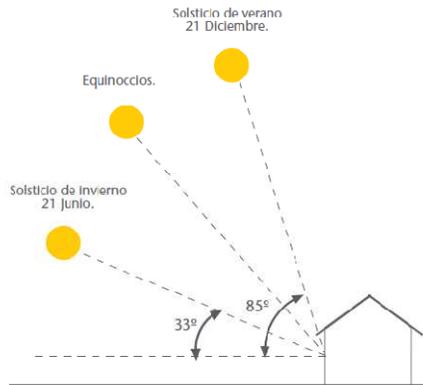


Figura 24: Trayectoria solar para hemisferio Sur [13]

El estudio geométrico que se debe hacer teniendo como base y punto de partida esta información de la trayectoria del sol, debiera dar la información necesaria con tal de construir e instalar la protección solar adecuada para cada edificio.

La optimización de la solución de dispositivos de protección solar se logra a través de la incorporación de otros factores importantes como lo es la luminosidad proveniente del sol, ya que no se puede negar la entrada de luz natural al edificio.

La protección solar debe ser pensada para que su máximo rendimiento sea alcanzado alrededor del solsticio de verano, en caso que los dispositivos de protección solar sean fijos.

4.1.2. Aplicaciones en Chile y experiencia

Aeropuerto de Santiago [14]

El aeropuerto de Santiago tenía el problema de asoleamiento directo que llegaba especialmente sobre el personal del aeropuerto, sobre las maquinas y sobre los mismos pasajeros, del lado poniente.

La solución fue de un quebravistas que reviste la fachada por el exterior como una doble piel. El sistema está compuesto por paneles perforados de aluzinc de 0,6 milímetros, fijos sobre costillas de aluminio, que se insertan en tubos de aluminio extruido.



Figura 25: Aeropuerto Arturo Merino Benítez, Santiago [14]

Los estudios previos indicaron que la fachada poniente del Aeropuerto recibía el sol perpendicularmente en la hora de más calor (15:30 horas), con un ángulo de 40°, lo mismo ocurría en el ala norte, por lo que la celosía se fijó en esos grados. La separación entre unas y otras se dejó en 26 cm como máximo. Los costos de la instalación de sombreadores en el ala norte y poniente del Aeropuerto fueron de 12.300 UF.

Los resultados de la instalación de protección solar han sido satisfactorios en el Aeropuerto. La instalación del quebravistas mejoró el confort de los pasajeros y de los trabajadores, manteniendo la visual hacia el exterior, aspecto muy importante para el lugar.

Clínica Avansalud [14]

En el caso del edificio de la clínica Avansalud, los estudios arrojaron que el asoleamiento más fuerte se efectuaba en la fachada poniente. En las horas de mayor temperatura (15:00 horas) la inclinación del sol quedaba entre los 42° y los 48°, por lo que la celosía se fijó en el promedio, en 45°. El color elegido para los quebravistas, fue de gris metálico, para así tener una emisividad baja. El montaje se realizó a través de soportes y pernos de fijación que se anclaron a la fachada.



Figura 26: Vista Interior Clínica Avansalud [14]

Los beneficios de la protección solar son el mejor funcionamiento de la climatización general del edificio y por ende las salas de espera son mucho más confortables, además, las salas mantuvieron su estética dado que no se perdió la visión hacia el exterior. Los ahorros deberían estar entre un 15% y un 20% en los costos mensuales de aire acondicionado, recuperándose la inversión entre 5 y 7 años.

Sombreamiento para edificio Ingeniería Civil

Para el Edificio de Ingeniería Civil se necesita evitar la entrada de la radiación solar tanto en el sector norte como en el sector poniente. Para la fachada norte se necesitan quebravistas horizontales fundamentalmente, debido a la inclinación del sol. El ángulo de inclinación de estos quebravistas debe ajustarse en función de la hora de mayor radiación solar tal como en los casos mostrados.

Las orientaciones norte y poniente del edificio son las de mayor soleamiento durante la época de verano. Por otro lado los halls de entrada de los pisos 3, 4 y 5 no tienen acondicionamiento térmico, por lo que no se debe aplicar sombreado exterior en estos sectores. Otro sector que debe quedar libre del sombreado externo es la entrada poniente del edificio. El área total a cubrir por quebravistas es de 408 m² para la fachada norte y de 169 m² para la fachada poniente.

Los ángulos de inclinación de los quebravistas de las fachadas norte y poniente dependen de los ángulos de inclinación para el momento de mayor radiación para cada fachada y se indicarán en el capítulo 5.

4.2. Fachada ventilada

Una fachada ventilada o FV es un sistema construido por un elemento de aplacado o revestimiento exterior soportado por elementos soportables interiores, a través de una subestructura, mediante fijaciones y anclajes, quedando entre el revestimiento y la zona portante un espacio donde el aire puede circular libremente por convección, evaporando el agua que pudiese haber penetrado o condensado, protegiendo de esta forma el aislamiento térmico.

4.2.1. Composición de fachada ventilada

La Figura 27 muestra los componentes de una fachada ventilada, que se explican a continuación.

1. **Sustrato base:** cerramiento del edificio o sistema de muro perimetral.
2. **Aislante térmico:** poliuretano proyectado, placa de poliestireno expandido (EPS), lana mineral, lana de vidrio u otro material colocado directamente sobre la pared exterior.
3. **Cámara de aire:** puede variar de 3 a 10 cm situada entre el aislante y el revestimiento.
4. **Sistema de fijación:** subestructura soportante de madera o perfiles de aluminio adosados al muro portante.
5. **Placa de revestimiento:** terminación con resistencia a la intemperie, alta elasticidad y resistencia mecánica, realizada en múltiples materiales, desde el mármol a la piedra, del fibrocemento a la cerámica, del aluminio a los aglomerados de mármol o piedra, etc.

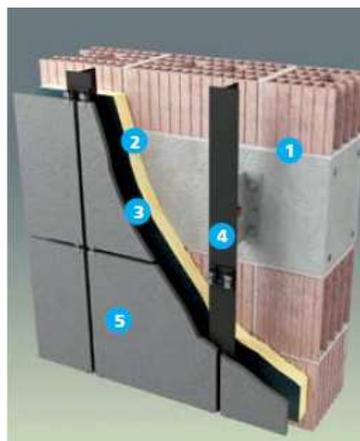


Figura 27: Componentes de fachadas ventiladas [15]

4.2.2. Principio bioclimático de la fachada ventilada

La física de la Fachada Ventilada basa su funcionamiento en el principio del efecto chimenea. La incidencia de radiación solar en la delgada envolvente produce un calentamiento del material que, por conducción, llega a la superficie interior del mismo. Entonces el aire de la cámara comienza a elevar su temperatura por medio de la convección.

A medida que la cámara de aire sigue aumentando su temperatura, la diferencia de presión aumenta, el aire comienza a elevarse al interior de la cámara ejerciendo en la parte baja de la cámara una succión de aire fresco exterior, al mismo tiempo que en la parte superior de la cámara se evacua el aire del interior. [13]

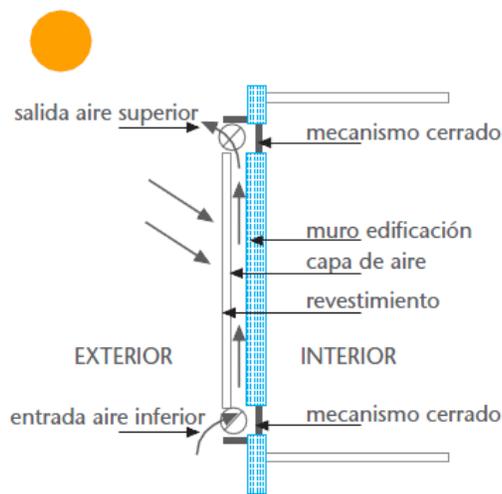


Figura 28: Funcionamiento de la fachada ventilada [13]

4.2.3. Características fachadas ventiladas [11]

Algunas de las ventajas de la FV frente a un muro sin aislación exterior son:

- **Evita los puentes térmicos:** Debido a que el material aislante se instala en la parte exterior del muro estructural, éste puede ser montado fácilmente sin interrupciones causadas por las losas de entre piso. De esta manera, cualquier puente térmico en las losas de piso puede ser evitado. Si estos puentes térmicos traspasan hacia el interior, podrían generar focos de condensación superficial.
- **Disipa el calor exterior:** El sistema de fachada ventilada tiene un efecto refrescante cuando la temperatura exterior es alta. El calor que penetra a través de la placa exterior se disipa por el efecto de la ventilación del espacio formado entre la placa exterior del revestimiento y el muro estructural, por lo cual es mínimo el calor que logra penetrar al edificio.

- **Cortina - corta lluvia:** Las placas de revestimiento arquitectónico actúan en el exterior del edificio como una cortina corta lluvia manteniendo el muro estructural seco. El espacio intermedio libera el agua y la humedad que pudiera haber penetrado por la parte posterior de las placas de revestimiento, a través de juntas verticales u horizontales.
- **Protege la envolvente contra los cambios de temperatura:** Como el material aislante se aplica al exterior del edificio, los cambios de temperatura son mínimos en comparación con aquellos edificios convencionales que lo colocan en el interior. Este principio es válido, tanto en invierno como en verano, en climas calurosos o fríos y para muros perimetrales con apreciable inercia térmica.
- **Evita la condensación interna:** Se puede aplicar material aislante en el exterior de un muro perimetral, ya que el mismo está efectivamente protegido por el revestimiento exterior, lo cual conjuntamente con la ventilación generada por el sistema, evita la transferencia de vapor de agua al muro perimetral.
- **Todo tipo de superficies:** Las fachadas ventiladas se aplican a cualquier tipo de edificios. Para su instalación no existen impedimentos de altura, edad del inmueble, localización o condiciones sísmicas.

4.2.4. Ejemplos aplicaciones en Santiago

La Figura 29 muestra una solución de revestimiento transparente. El objetivo de contar con un revestimiento transparente es tener beneficios en invierno, ocupando la fachada como un colector.



Figura 29: Clínica Bicentenario, Estación Central

La Figura 30 muestra una fachada con revestimiento opaco, que protege totalmente a los muros de la fachada de la radiación solar, dejando un bajo porcentaje de vidriado en las fachadas.



Figura 30: Edificio C4 Clínica Las Condes

Fachada ventilada para Edificio de Ingeniería Civil

La principal función que se busca con la fachada ventilada para el edificio de Ingeniería Civil es la de aislar los muros perimetrales de hormigón con el fin de que no absorban toda la radiación del día y no acumulen calor que luego transfieran al interior del edificio, tanto a oficinas como pasillos.

Se busca mejorar el comportamiento térmico en verano por lo que la solución de fachada ventilada se aplicará a los muros perimetrales que presenten las mayores ganancias térmicas durante el día. La Figura 30 muestra un ejemplo de aplicación posible para el edificio, dejando superficies vidriadas intactas.

Las fachadas norte y poniente son las fachadas que reciben más soleamiento durante el día, aunque como tiene consecuencias positivas para la época de invierno, ya que la fachada ventilada tiene propiedad aislante, se debería cubrir todos los muros perimetrales del edificio.

Los detalles de instalación para la solución constructiva de fachada ventilada se encuentran en el Anexo C.

4.3. Ventilación nocturna

La ventilación nocturna consiste básicamente en la estrategia de mantener el edificio cerrado (sin ventilación) durante las calurosas horas del día y ventilar la masa estructural a la noche, cuando las temperaturas son menores, por la circulación de aire exterior ya sea a través del espacio interior o a través de pasajes de aire entre los elementos de la masa estructural del edificio. La masa enfriada actúa al día siguiente como acumulador de calor, absorbiendo el calor que entra al edificio así como el calor que se genera dentro del mismo. [16]

El flujo de calor durante el día, desde el aire interior a la masa acumuladora fría ocurre pasivamente por convección natural y radiación de onda larga. Durante la noche, la masa del edificio irradia calor hacia la bóveda celeste enfriando la masa estructural del edificio, esto ocurre porque existen importantes diferencias entre las temperaturas terrestres y las temperaturas de las capas de la atmósfera situadas a alturas importantes. [16]

En caso contrario, la radiación emitida por el cuerpo calentado, es interceptada y absorbida por las nubes o el vapor será mucho más evidente en horarios nocturnos, porque así se evita la interferencia que produce la radiación solar incidente sobre ese cuerpo radiante, pero como fenómeno en general funciona en forma permanente pues sólo depende de las diferencias relativas de temperaturas. [16]

Como se habrá notado la masa térmica es un factor muy importante en la eficiencia de la ventilación nocturna, y existen varias opciones para utilizarla como acumuladores de calor:

- Ventilando directamente la masa estructural del edificio: paredes, divisiones internas, pisos, etc, enfriados por ventilación del recinto interior.
- Haciendo pasar el aire por conductores a través de pisos, cielorrasos o paredes de manera que circule aire exterior por ellos.
- Empleando acumuladores especiales: lechos de piedra, tanques de agua, contenido conductos de aire empotrados, enfriados durante la noche por el aire exterior.

Esta técnica es sólo aplicable en climas donde la temperatura exterior esté por debajo de la temperatura de confort durante varias horas por noche, y el punto de rocío del aire exterior esté siempre por debajo de la temperatura de confort.

Algunos principios básicos para asegurar una eficiente ventilación nocturna son:

- Evitar ganancias de calor, tanto como sea posible, a través de aislaciones térmicas y **protección solar** controlada.

- El edificio debería contar con una gran inercia térmica interna: la constante de tiempo del edificio definida como la relación entre el coeficiente de pérdida de calor y la capacidad térmica debería ser mayor a 100 horas. Esta inercia debería estar en contacto directo con el aire interior.
- Las aberturas que se utilicen para ventilación nocturna deben ser seguras (contra lluvia, insectos, ladrones, etc.) aún cuando estén abiertas.
- El caudal de aire entrante deberá ser lo mayor posible cuando la temperatura exterior es inferior a la interior.

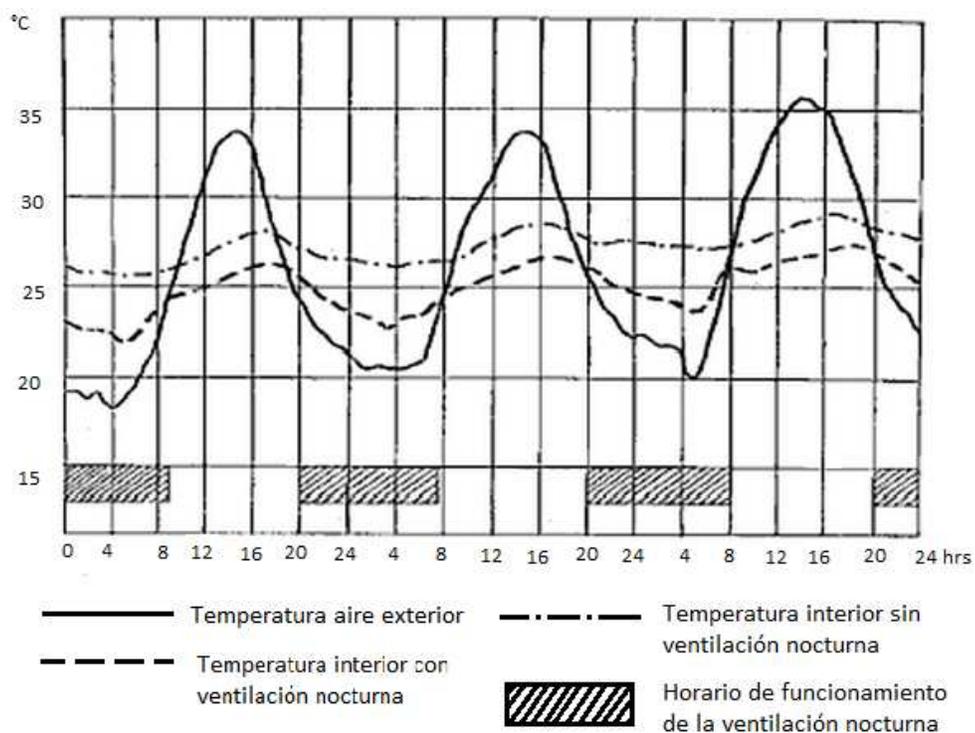


Figura 31: Interiores en un recinto con ventilación nocturna según Givoni, Israel [16]

Su uso más extendido es en los edificios de oficina, ya que solo son ocupados en horarios diurnos, pero también es una muy buena solución para edificios comerciales, gubernamentales y educativos.

El empleo de ventilación nocturna permite **el uso de instalaciones de menor potencia** produciendo un ahorro en el costo de la instalación, si fuera el caso, que se suman al ahorro en costos de energía.

Ventilación Nocturna para Edificio de Ingeniería Civil

El volumen de aire estimado que se debe renovar para el piso 3 es de 2070m^3 , para el piso 4 se debe renovar un volumen de 2070m^3 y para el piso 5 se deben renovar 713m^3 (tomando en cuenta que la altura útil es de 2,45m).

Para renovar el aire que se menciona se debe:

- Instalar ventanas basculantes que sean fácilmente operables por los ocupantes. De este modo se permite el flujo de aire hacia el interior del edificio. Se debe crear un hábito de mantener las ventanas abiertas en la noche para favorecer la ventilación.
- Intervenir los muros interiores que dividen las oficinas del pasillo. Las secciones superiores de las oficinas de vidrio se deben cambiar por rejillas o louveres que permitan el flujo de aire entre las oficinas y el pasillo.
- Instalar extractores de muro en los pisos 3, 4 y 5 por separado capaces de realizar 2 renovaciones de aire por hora en cada uno de los pisos. Para alcanzar 2 renovaciones por hora se necesitan extractores con capacidad de caudal de $4140\text{m}^3/\text{h}$ como mínimo.

La posición de los extractores de muro en cada uno de los pisos se muestra en la figura B6 del anexo B. Se instalan en el sector norte del edificio.

Una alternativa a la posición anterior es instalar los extractores en la conexión entre el hall de entrada de cada piso y sacar el aire a través extractores eólicos en el techo (ver figura B7 del anexo B).

La ventilación en los pisos debe ser los sectores que posean alta inercia térmica y que no posean aislación importante. Los pisos y techos de los pasillos aprovecharán de buena manera la ventilación nocturna. Las oficinas al poseer una mayor aislación de los elementos que poseen inercia térmica aprovecharan menos la ventilación nocturna.

4.4. Ventilación de confort

La transferencia de calor se realiza directamente desde la persona al flujo de aire en movimiento que la envuelve con resultados casi nulos las temperaturas radiantes superficiales. Esto hace muy dificultosa su evacuación sobre todo si se tiene en cuenta que a ciertas horas del día, la temperatura que ingresa al recinto puede ser sensiblemente mayor que la temperatura media radiante interior. [16]

Mientras que la ventilación para mantener una calidad de aire interior óptima es independiente de las condiciones climáticas, la ventilación de confort depende particularmente de la temperatura y presión de vapor. [16]

Modificando el movimiento del aire alrededor del cuerpo humano puede también ayudar a controlar el confort térmico. Introduciendo aire exterior con una cierta velocidad al edificio puede provocar un efecto fisiológico y directo de enfriamiento aun cuando la temperatura del aire interior sea elevada. [16]

Este confort es deseable, desde el punto de vista fisiológico, aun cuando la temperatura del aire exterior sea mayor a la temperatura interna, porque el límite superior de temperatura de confort es mayor con velocidades de aire mayores. [16]

En la Figura 32 se puede ver como se amplía la zona de confort por el aumento de la velocidad del aire interior.

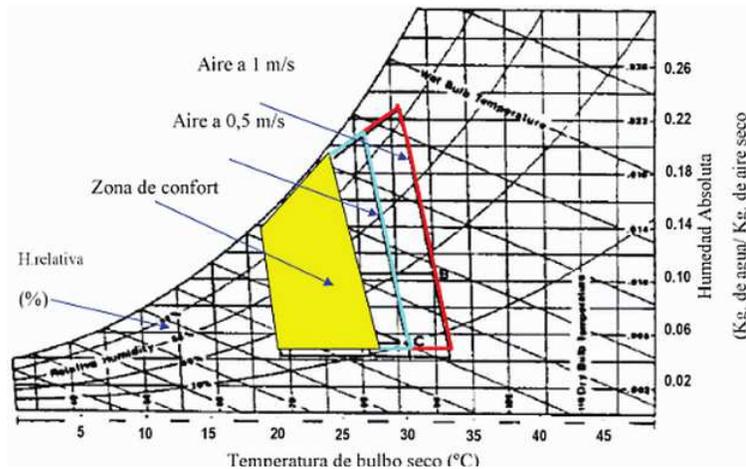


Figura 32: Diagrama psicrométrico en el que se muestra el efecto de la velocidad del aire interior en el confort térmico [16]

Se debe apreciar que cuando están involucradas grandes caudales de aire, como es necesario para la ventilación de confort, la distribución de velocidades no es homogénea y notables variaciones aparecen en todo recinto.

Por esta razón la ventilación para refrescamiento siempre debería ser especificada en términos de velocidad de aire y no en renovaciones/hora ya que no hay una relación directa entre caudal y velocidad a través de un edificio.

La ventilación de confort puede ser provista en cualquier momento en que sea beneficiosa fisiológicamente, ya sea durante el día o la noche, en contraste con la ventilación nocturna sobre la masa del edificio. Con una tasa de ventilación elevada la temperatura interna tiende a igualarse con la externa.

Cuando se utiliza la ventilación en el contexto de su efecto en el confort, debe recordarse que el factor más importante es la **velocidad del aire** sobre el cuerpo humano.

Además de la velocidad del aire, otro factor importante son los patrones de flujo, es decir, el recorrido que hace el aire cuando circula por el local, por lo que se deberá estudiar con cuidado el tipo de aberturas a utilizar ya que estas determinarán los distintos patrones de flujo. La clave está en seleccionar tipos de ventanas que dirijan el caudal hacia las personas, para obtener un máximo de eficiencia en el refrescamiento pasivo. En el caso de una oficina el aire debería ingresar a la altura de una persona sentada.

Ventilación de confort para el Edificio de Ingeniería Civil

Se deben instalar ventanas basculantes que sean fácilmente operables por los usuarios para cada oficina. Esto generará una ventilación natural que actuará sobre el cuerpo de las personas, especialmente sobre los ocupantes de las oficinas perimetrales del edificio, en sus pisos 3, 4, y 5.

Las ventanas basculantes son las mismas instalaciones que se deben hacer para la ventilación nocturna.

5 Análisis Cuantitativo de Soluciones

El análisis que se hará sirve para comparar las soluciones presentadas anteriormente. Es por esto que se aprovechará el edificio de Ingeniería Civil, simulando sus condiciones de borde e iniciales para así calcular el rendimiento o efectividad de cada solución al evitar cierta ganancia térmica o eliminarla.

Lo que se busca en definitiva es encontrar la cantidad de energía térmica total que se puede restar del edificio. Esto hará que el equipo de climatización, al tener una menor carga podrá tener un mejor desempeño, sin embargo no es condición suficiente para asegurar que pueda alcanzar el rango de confort térmico.

El cálculo si bien pretende ser un antecedente a lo que puede llegar a ser cada solución es una aproximación a los rendimiento reales que pueden tener las soluciones, ya que para conseguir un desempeño realista se tiene que medir experimentalmente cada una de ellas.

Simulación caso base Edificio Ingeniería Civil

La geometría del edificio se modeló a partir de los planos del Edificio de Ingeniería Civil. Los edificios adyacentes se integran en el modelo debido a la sombra que proyectan sobre el edificio en cuestión durante las horas del día. Se simularán las ganancias térmicas actuales del edificio y no una carga térmica de diseño.

Propiedades y geometría de componentes del edificio

Los muros exteriores son de hormigón armado de 35 cm de espesor, mientras que la tabiquería de espesor 12 centímetros en todos los pisos del edificio. Las propiedades se muestran en la Figura 33.

Inner surface	
Convective heat transfer coefficient (W/m ² -K)	2,152
Radiative heat transfer coefficient (W/m ² -K)	5,540
Surface resistance (m ² -K/W)	0,130
Outer surface	
Convective heat transfer coefficient (W/m ² -K)	19,870
Radiative heat transfer coefficient (W/m ² -K)	5,130
Surface resistance (m ² -K/W)	0,040
No Bridging	
U-Value surface to surface (W/m ² -K)	6,571
R-Value (m ² -K/W)	0,322
U-Value (W/m²-K)	3,104
With Bridging (BS EN ISO 6946)	
Upper resistance limit (m ² -K/W)	0,322
Lower resistance limit (m ² -K/W)	0,322
U-Value surface to surface (W/m ² -K)	6,571
R-Value (m ² -K/W)	0,322
U-Value (W/m²-K)	3,104

Figura 33: Definición muros exteriores Design Builder

Las losas corresponden a hormigón armado de 12 cm de espesor. Posee además una sobrelosa de hormigón de 5mm de espesor. Las propiedades térmicas para la losa se muestran en la Figura 34 y Figura 35.



Figura 34: Definición de propiedades para divisiones interiores

Inner surface	
Convective heat transfer coefficient (W/m ² K)	0,342
Radiative heat transfer coefficient (W/m ² K)	5,540
Surface resistance (m ² K/W)	0,170
Outer surface	
Convective heat transfer coefficient (W/m ² K)	19,460
Radiative heat transfer coefficient (W/m ² K)	5,540
Surface resistance (m ² K/W)	0,040
No Bridging	
U-Value surface to surface (W/m ² K)	19,167
R-Value (m ² K/W)	0,262
U-Value (W/m²K)	3,814
With Bridging (BS EN ISO 6946)	
Upper resistance limit (m ² K/W)	0,262
Lower resistance limit (m ² K/W)	0,262
U-Value surface to surface (W/m ² K)	19,167
R-Value (m ² K/W)	0,262
U-Value (W/m²K)	3,814

Figura 35: Definición losas Design Builder

El cielo falso se encuentra a una distancia de 85 cm de la losa del piso superior, formando una capa de aire. La Figura 36 muestra las propiedades del cielo falso y su conformación.

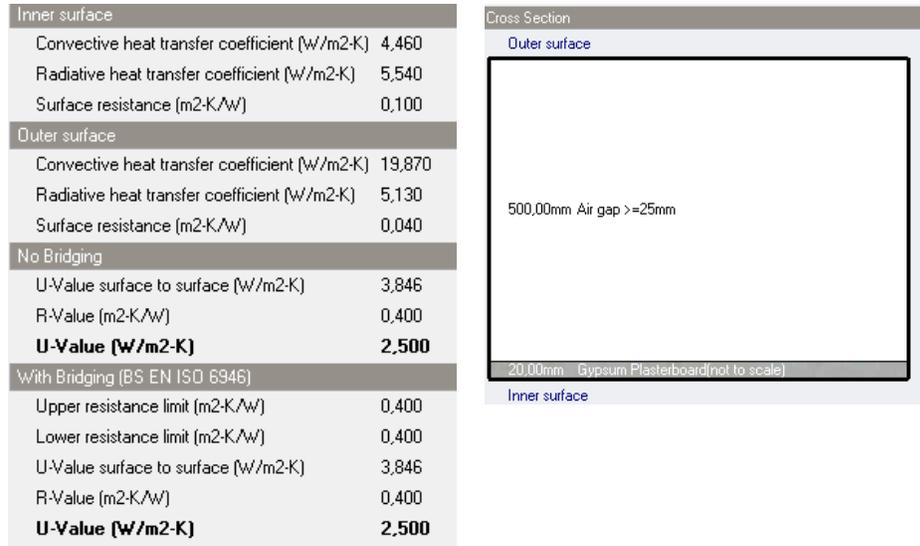


Figura 36: Definición de propiedades del cielo falso en Design Builder

Las ventanas se dividen en termopaneles y ventanas simples de 5mm de espesor con marco de acero. Las Figura 37 y la Figura 38 muestran las propiedades térmicas de los vidrios.

Calculated Values	
Total solar transmission (SHGC)	0,819
Direct solar transmission	0,775
Light transmission	0,881
U-Value (W/m²·K)	5,778

Figura 37: Propiedades vidrio simple de espesor 5mm

Calculated Values	
Total solar transmission (SHGC)	0,762
Direct solar transmission	0,705
Light transmission	0,812
U-Value (W/m²·K)	3,159

Figura 38: Propiedades vidrio doble (termopanel)

La ubicación de vidriado de 5mm con perfiles de acero se encuentra graficado en las figuras B4 y B5 del Anexo B.

Iluminación del edificio

La iluminación del edificio en su estado actual se calculó en el capítulo 3. El caso de las oficinas que se iluminan con tubos fluorescentes de 20W produce una densidad de $9\text{W}/\text{m}^2$ en promedio, además de estar empotrada en el cielo falso. La Figura 39 muestra el tipo de instalación mientras que la Figura 40 muestra el ejemplo para la luminaria de pasillos.

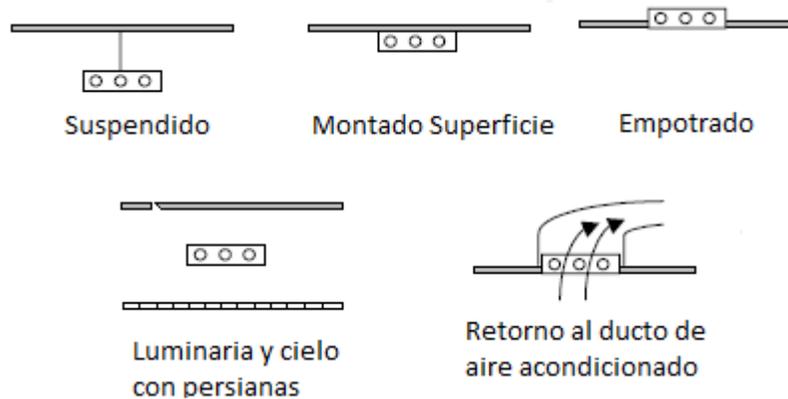


Figura 39: Tipos de instalación para luminaria en Design Builder [17]



Figura 40: Iluminación para edificio en Design Builder

Para el caso de pasillos, sobre todo para los pisos 3 4 y 5, la instalación es empotrada y se produce una concentración de $8\text{W}/\text{m}^2$ aproximadamente, considerando que se encuentran en funcionamiento todos los lugares de instalación con CFL tritubo de 20W de potencia.

Ocupación del edificio

Se tomará como densidad de todo el edificio 0,15 personas/m² como se muestra en la Figura 41, menos los lugares que tienen mayor concentración, como por ejemplo las salas de computación. La ocupación del edificio es tomada de 09:00 a 18:00 horas. La tabla A5 del anexo A muestra los cálculos y las suposiciones hechas para llegar a la densidad ya mencionada. Se ocupa la mayor densidad de ocupación estimada por piso.

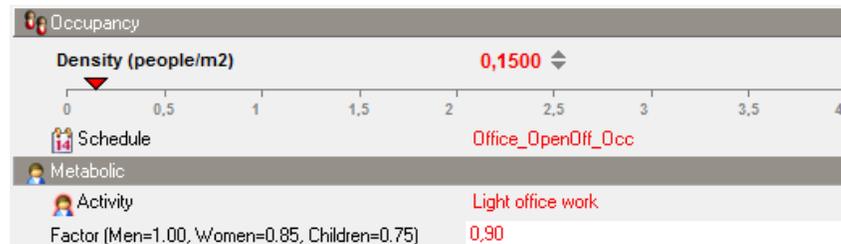


Figura 41: Densidad de ocupación para edificio Design Builder

La norma ASHRAE sugiere una densidad de 0,05 personas /m² para oficinas.

Equipos electrónicos de oficina

Para oficinas se toma una ganancia de 10W/m² entre computadores y equipos de oficina como se muestra en la Figura 42. Se considera una operación a toda capacidad de 09:00hrs a 18:00hrs y las restantes horas una operación *stand by*. Espacios como salas de computación que concentran los equipos se usa un valor de 20W/m². El detalle de los cálculos se muestra en las tablas A1, A2, A3 y A4 del anexo A.

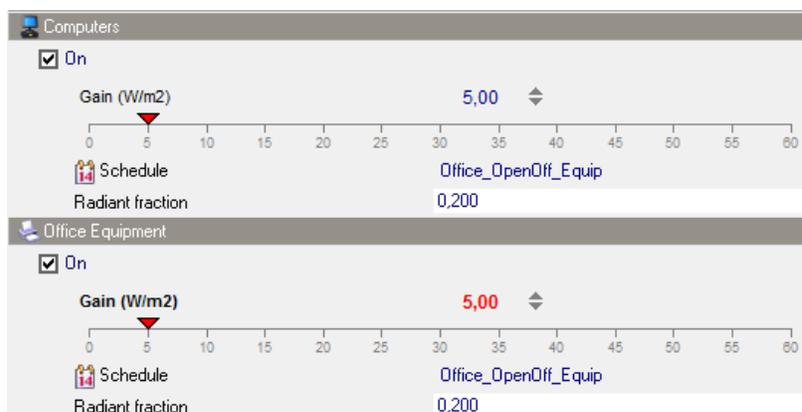


Figura 42: Ejemplo de configuración de ganancias producidas por equipos de computación para oficina

Aire acondicionado del edificio

La Figura 43 muestra el ajuste de temperaturas para el equipo de aire acondicionado. Para enfriar la temperatura a alcanzar es de 24°C. Nótese que en un principio se definió como rango de confort térmico el rango de temperaturas de 18°C a 22°C. Como el sistema de climatización no logra bajar la temperatura de muchas oficinas a menos de los 22°C, se conviene que sólo logra llegar a 24°C, así como lo indican las mediciones de temperaturas presentes en la Figura 17.

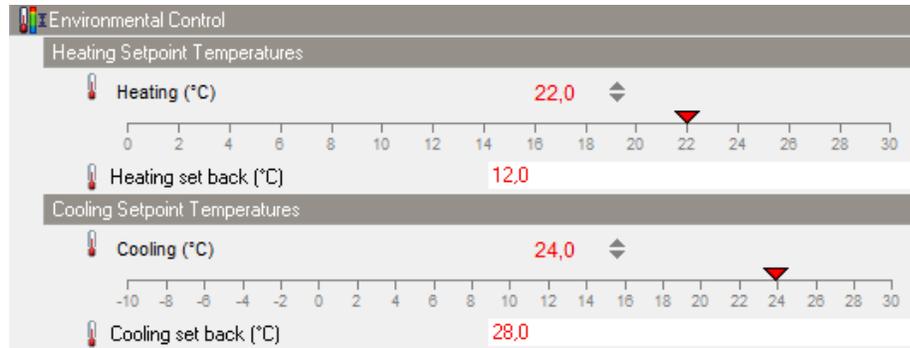


Figura 43: Ajuste de temperaturas para el aire acondicionado

El rendimiento del equipo (CoP) para el caso de enfriamiento se toma como 1,5. En la actualidad en EEUU, se toma como mínimo de CoP de los equipo de 3,5. En la Figura 44 se muestra como se establece el rendimiento del equipo de enfriamiento del edificio.

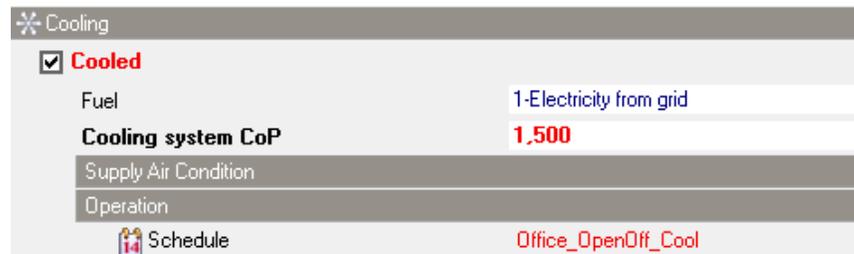


Figura 44: Rendimiento de equipo de enfriamiento

El edificio queda modelado como se ve en la Figura 45, respetando la geometría del edificio así como las condiciones de sombra existentes, producidas por los edificios adyacentes.



Figura 45: Modelo Design Builder de Edificio Ingeniería Civil

Resultados simulación caso base

La simulación analizada se hace para el día 15 de Enero que corresponde al día de diseño detectado por el Design Builder. En la Figura 46 se puede apreciar que las ganancias solares a través de las ventanas son mucho más elevadas que las ganancias producidas por la ocupación, la iluminación o los computadores.



Figura 46: Balance térmico para el Edificio de Ingeniería Civil para el día 15 de Enero.

El balance de energía para cada piso y oficinas en particular se encuentra en el anexo D.

La capacidad de frío que debe tener el equipo central de enfriamiento del edificio para llegar a los 24° C en las áreas acondicionadas térmicamente se calcula a través del Coolig Design de Design Builder y es de:

$$\dot{Q} = 286,97kW$$

Considerando una utilización del aire acondicionado continuo durante las horas de ocupación del edificio que es de 09:00 a 18:00hrs y con un coeficiente de rendimiento de 1,5 para enfriar, se estima un gasto diario de electricidad de:

$$E_{diario} = 1722kWh$$

La temperatura para una oficina con orientación Norte del piso 4 se presenta en la Figura 47. La temperatura objetivo para el equipo de enfriamiento es de 24°C.

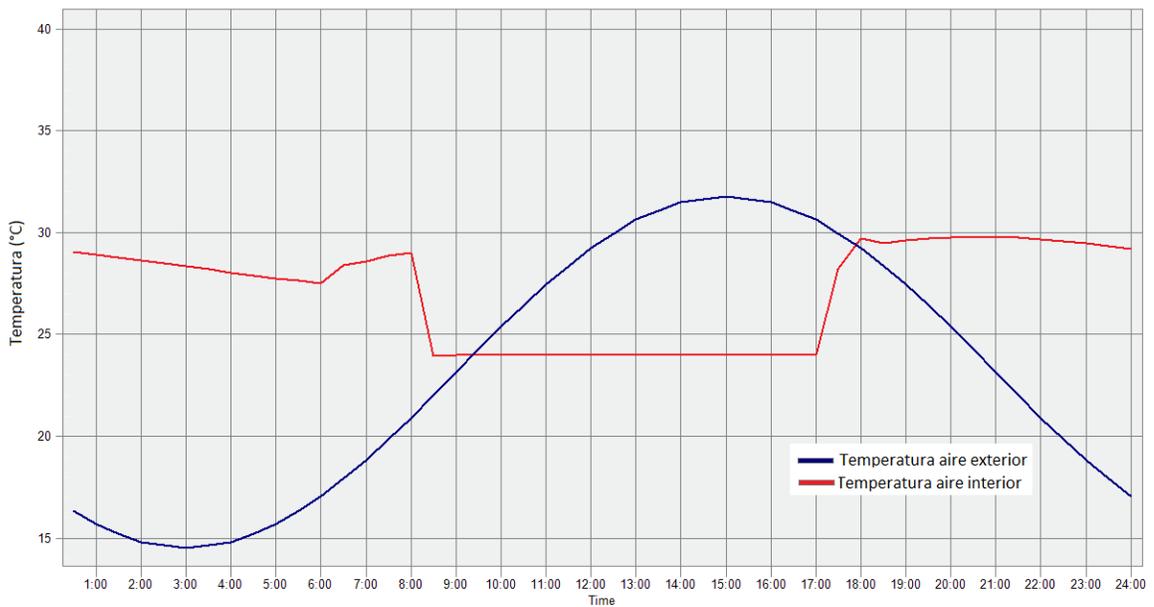


Figura 47: Temperaturas para oficina norte del cuarto piso para el 15 de Enero 2002

La Figura 13 del capítulo 3 muestra experimentalmente la temperatura de una oficina con orientación norte del cuarto piso. Presentan un comportamiento térmico similar, con altas temperaturas nocturnas.

5.1. Sombreamiento

Tomando los datos del tiempo presentes en el programa Design Buidier se puede obtener la trayectoria solar para un día cualquiera. La Figura 48 muestra la trayectoria solar en Santiago para el día 15 de Enero, ya que se tomará un día de verano representativo. La altitud máxima que toma en este día es de 74° aproximadamente a las 13:30 horas (el día 21 de diciembre es de 81°). A esta hora el sol irradia sobre el lado norte del edificio. Desde las 15:00 hrs a las 18:00hrs el asoleamiento está prácticamente en el lado poniente del edificio. La altitud del sol a las 15:00hrs es de 59° mientras que a las 18:00hrs es de 22° .

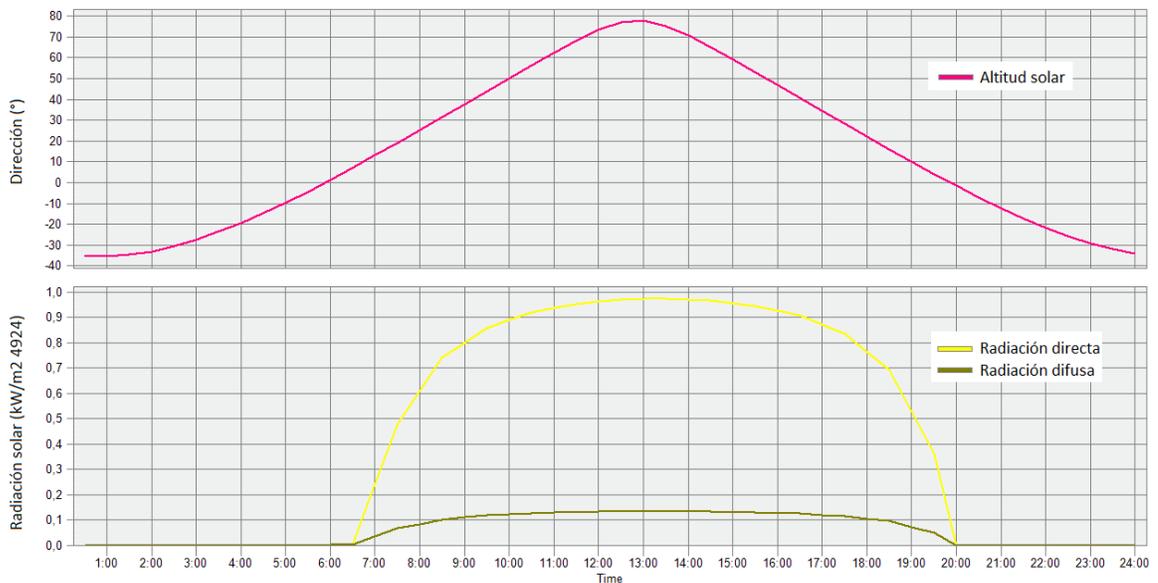


Figura 48: Trayectoria y radiación solar para Santiago durante el día 15 de Enero

Dispositivos Solares para el edificio

La Figura 49 muestra que se cuenta con 3 tipos de dispositivos solares de sombreado para implementar en el modelo del edificio. Los quebravistas (louvres) son los elegidos en este caso debido a que pueden cubrir áreas grandes sin depender en una medida importante de su ancho.

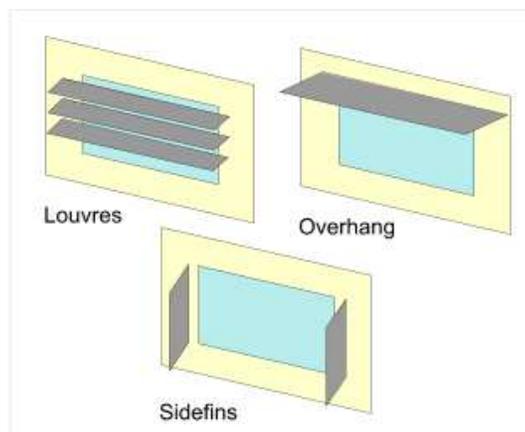


Figura 49: Protecciones locales de sombreado para ventanas [17]

El ángulo de instalación del quebravistas varía en relación a la fachada en la que será instalado. La fachada poniente tendrá quebravistas con un ángulo de instalación como se indica en la Figura 50 de 45° . Para la fachada norte será un ángulo de 74° . La idea es interceptar los rayos solares de verano ya que en invierno estos son necesarios para la calefacción de edificio.

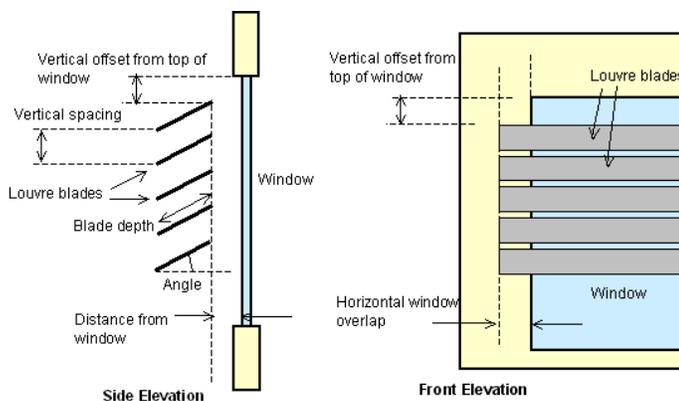


Figura 50: Parámetros para el diseño de quebravistas en Design Builder [17]

El ancho de la hoja del quebravistas es de 20 cm con un espaciado vertical de 30 cm, y una distancia a la ventana de 30 cm. Emulando dimensiones comerciales.

La Figura 51 muestra todas las áreas cubiertas por los quebravistas que son de interés. La fachada norte a excepción de las ventanas que pertenecen al hall de entrada de cada piso.



Figura 51: Modelo edificio con quebravistas en Design Builder

La fachada poniente cubre las zonas vidriadas de los pisos 3, 4 y 5 completamente y una porción de los pisos 1 y 2, que corresponden a las zonas administrativas y de secretaria. El área a cubrir es como máximo 600m².

Resultados simulación edificio con sombreado

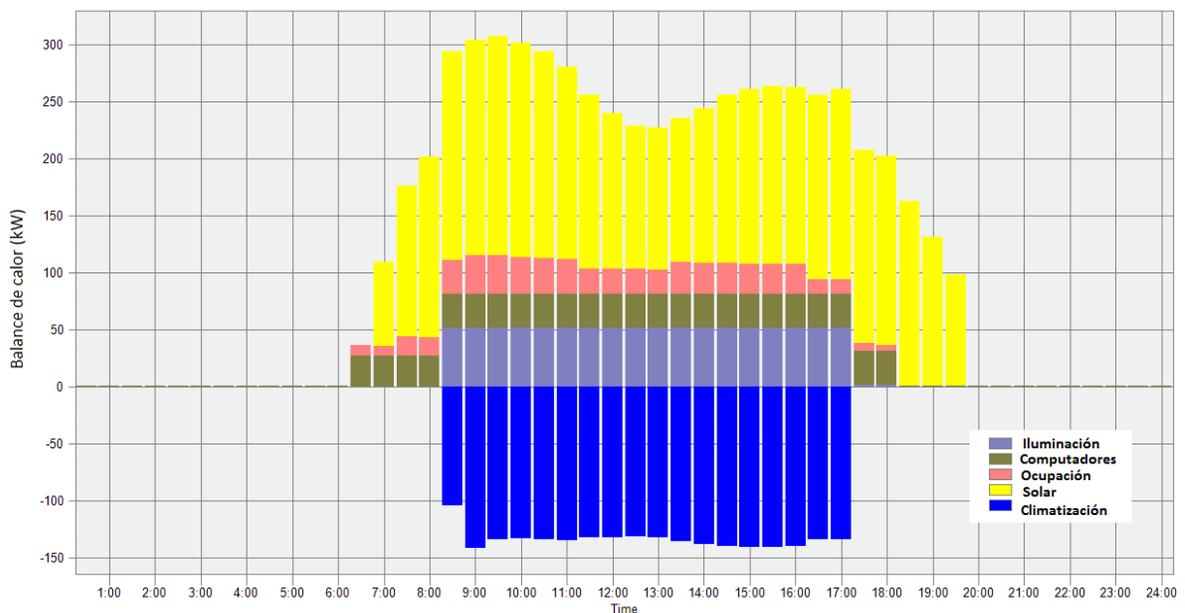


Figura 52: Balance térmico para edificio con protección solar día 15 de Enero

Comparando la Figura 52 con la Figura 46 se puede apreciar el efecto del sombreado aplicado a las fachadas norte y poniente. El máximo estimado de ganancias térmicas se producen a las 17 horas con una intensidad de 350kW, y en este caso a la misma hora bajan a 260kW las estimaciones de ganancias térmicas.

La capacidad de frío que debe tener el equipo central de enfriamiento del edificio para llegar a los 24° C en las áreas acondicionadas térmicamente se calcula a través del Coolig Design de Design Builder y es de:

$$\dot{Q} = 226,94kW$$

Considerando una utilización del aire acondicionado continuo durante las horas de ocupación del edificio que es de 09:00 a 18:00hrs y con un coeficiente de rendimiento de 1,5 para enfriar, se estima un gasto diario de electricidad de:

$$E_{diario} = 1361,6kWh$$

El efecto de esta baja en el aporte de radiación solar al edificio se grafica en la Figura 53. Las estimaciones de temperaturas mostradas corresponden a la misma oficina de las estimaciones de temperaturas de la Figura 47.

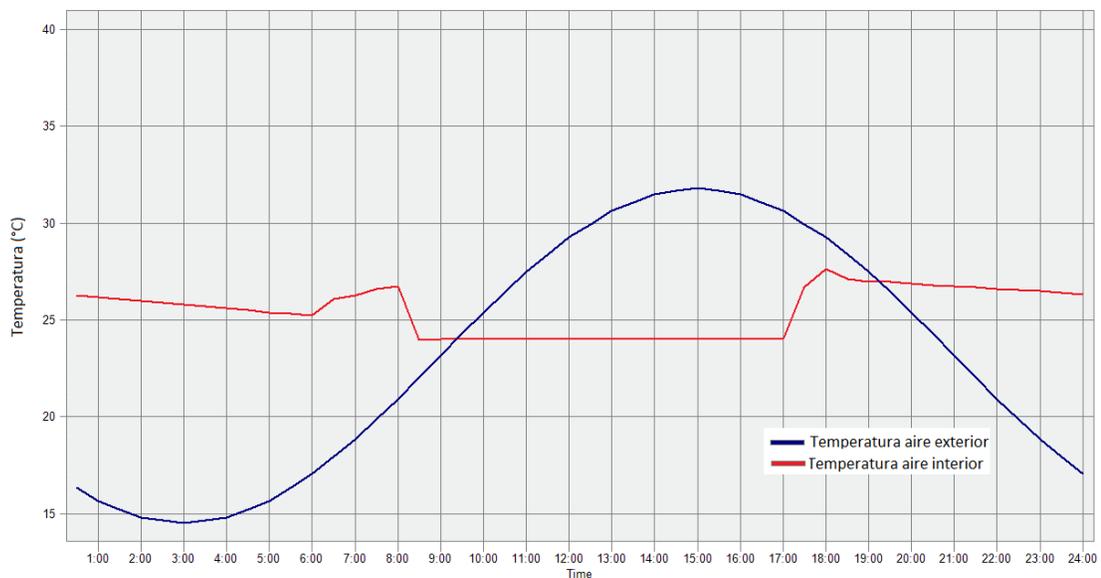


Figura 53: Temperaturas estimadas para oficina norte cuarto piso con sombreado, día 15 de Enero

Comparando la Figura 47 con la Figura 53 se puede apreciar el efecto de la solución en las temperaturas del interior de la oficina. Las temperaturas máximas estimadas del día bajan de 30°C a las 22:00 horas a los 27°C a la misma hora.

La Figura 54 muestra las proyecciones que se hacen para dos horarios del día 15 de Enero, que es según Design Builder el día más desfavorable del punto de vista térmico.

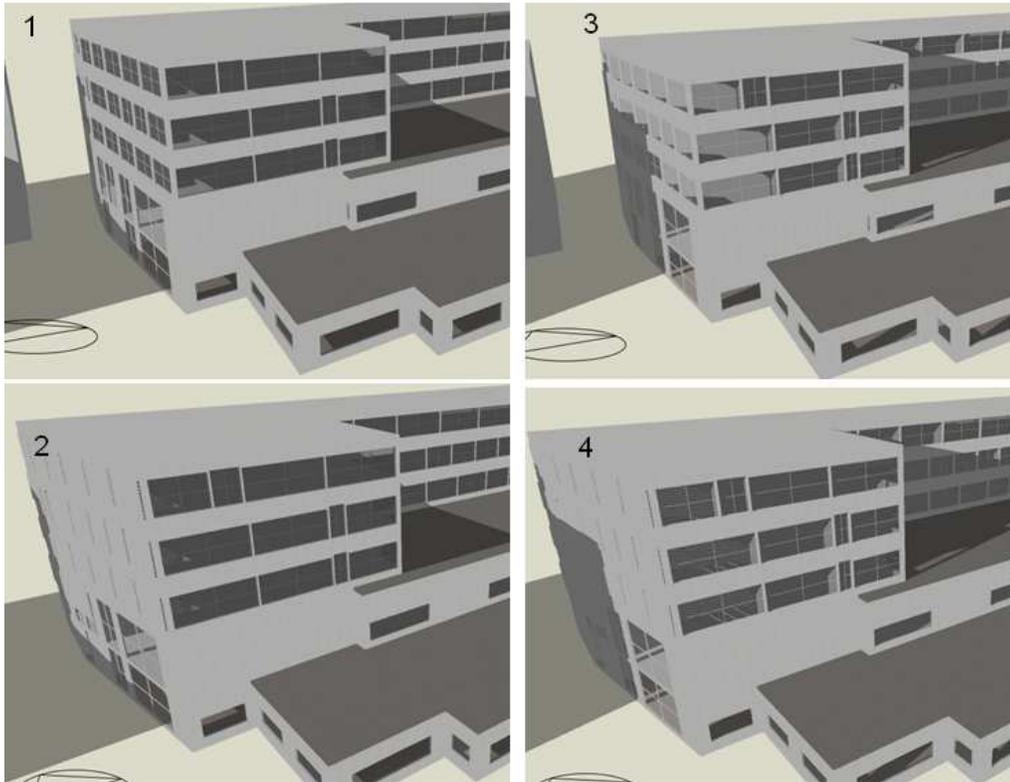


Figura 54: Simulación edificio con y sin sombreado para diferentes horas del día 15 de Enero

1. Edificio sin sombreado a las 16:00 hrs
2. Edificio con sombreado a las 16:00 hrs.
3. Edificio sin sombreado a las 18:00 hrs
4. Edificio con sombreado a las 18:00 hrs.

Entonces después del análisis del sombreado en el edificio se tiene una baja en la carga que debe soportar el equipo de enfriamiento es de 360kWh. Una baja del **21%** con respecto al caso base. La única causa de la baja es que no permite la ganancia solar a través de las ventanas.

5.2. Fachada ventilada

La fachada ventilada cubre el hormigón del edificio en todas sus fachadas con el fin de aislar a través de este sistema constructivo. La convección del aire dentro de la fachada hace que tenga nuevas condiciones de borde el hormigón.

La Figura 55 muestra las propiedades de la nueva fachada para el modelo.

Inner surface	
Convective heat transfer coefficient (W/m ² ·K)	2,152
Radiative heat transfer coefficient (W/m ² ·K)	5,540
Surface resistance (m ² ·K/W)	0,130
Outer surface	
Convective heat transfer coefficient (W/m ² ·K)	19,870
Radiative heat transfer coefficient (W/m ² ·K)	5,130
Surface resistance (m ² ·K/W)	0,040
No Bridging	
U-Value surface to surface (W/m ² ·K)	0,355
R-Value (m ² ·K/W)	2,984
U-Value (W/m²·K)	0,335
With Bridging (BS EN ISO 6946)	
Upper resistance limit (m ² ·K/W)	2,984
Lower resistance limit (m ² ·K/W)	2,984
U-Value surface to surface (W/m ² ·K)	0,355
R-Value (m ² ·K/W)	2,984
U-Value (W/m²·K)	0,335

Figura 55: Propiedades de fachada ventilada para edificio

La transmitancia térmica cambia de $U = 3,1 \text{ W/m}^2\text{K}$ mostrada en la Figura 33, a un valor de $U=0,335 \text{ W/m}^2\text{K}$ de la fachada ventilada. Su función de aislación externa permite cumplir ampliamente con la normativa que permite como máximo un valor de $U = 1,9 \text{ W/m}^2\text{K}$ para muros perimetrales. [6]

Caso edificio con fachada ventilada

La capacidad de frío requerido para el caso del edificio con sombreado es de:

$$\dot{Q} = 283,63 \text{ kW}$$

Considerando una utilización del aire acondicionado continuado durante las horas de ocupación del edificio que es de 09:00 a 18:00hrs y con un coeficiente de rendimiento de 1,5 para enfriar, se tiene un gasto diario de electricidad aproximado de:

$$E_{\text{diario}} = 1701,8 \text{ kWh}$$

Se logra una disminución muy baja en la carga del sistema de climatización comparada con la solución ya analizada de sombreado. Aislar las masas de hormigón exteriormente en este caso no parece ser la solución idónea.

5.3. Ventilación nocturna

La ventilación nocturna consiste en hacer ingresar grandes cantidades de aire en época de verano a una temperatura muy inferior a la que se encuentra el interior del edificio.

La ventilación se focalizará en las zonas más críticas y necesitadas. Los espacios de los pisos 3, 4 y 5 serán ventilados, ya que según el estudio térmico realizado al edificio, estos son los pisos que tienen mayores problemas de confort térmico, especialmente las oficinas ubicadas en el sector norte y poniente. Entrarán en las renovaciones de aire todas las oficinas académicas, salas de reuniones, salas de memoristas y pasillos.

El sector oriente y el sector poniente del edificio recibirán igual número de ventilaciones por hora.

La hermeticidad de los espacios necesaria para poder realizar una ventilación nocturna adecuada puede alcanzarse en los pisos 3, 4 y 5 del edificio de Ingeniería Civil. Los pisos 1 y 2 poseen aberturas hacia los otros pisos que no hacen posible la implementación de la ventilación nocturna.

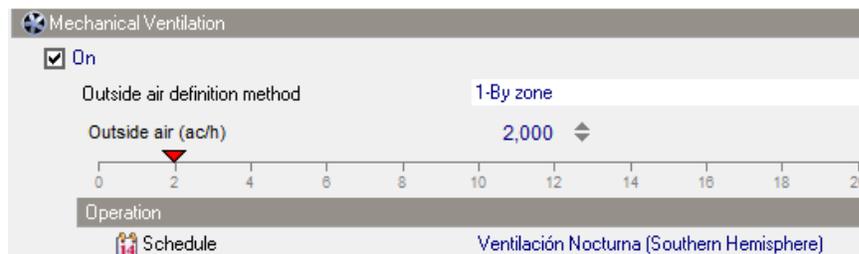


Figura 56: Ajuste de ventilación nocturna por zona para modelo

El horario de aplicación de ventilación nocturna es de las 00:00hrs hasta las 06:00hrs. En este horario la temperatura para Santiago bordea los 15°C como se puede apreciar en la Figura 53.

La Figura 57 muestra el balance de calor para el caso que el edificio cuente con ventilación nocturna. Alcanza un flujo de calor estimado de 50kW en las horas de aplicación de la ventilación nocturna.

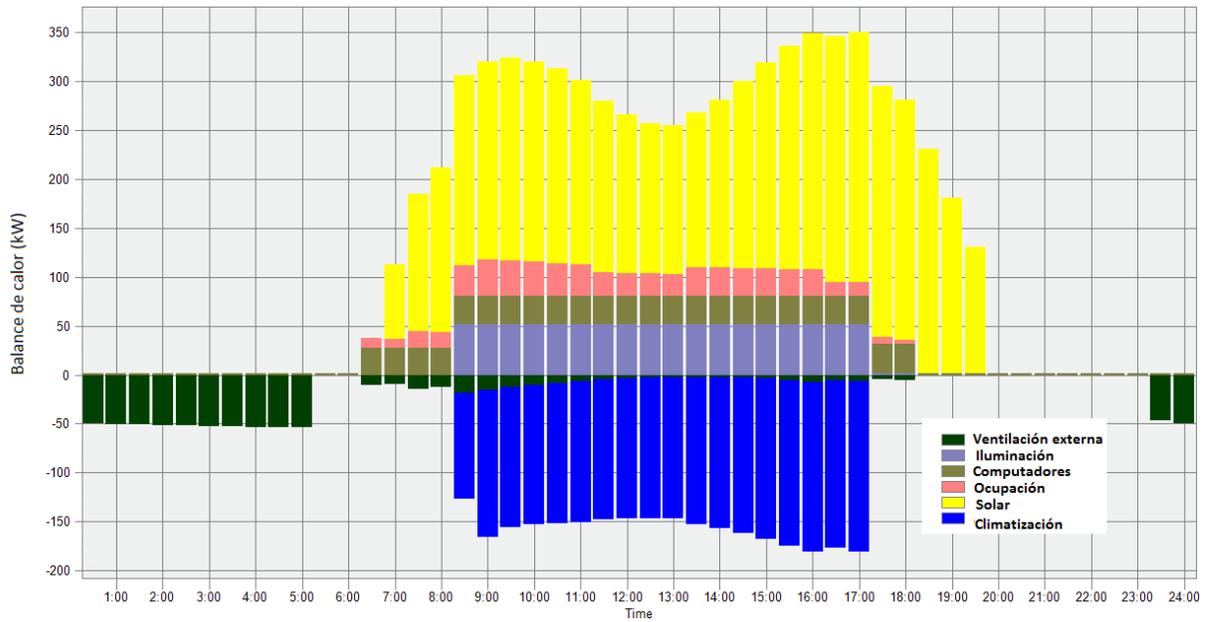


Figura 57: Balance térmico para edificio con ventilación nocturna día 15 de Enero

La capacidad de frío que debe tener el equipo central de enfriamiento del edificio para llegar a los 24° C en las áreas acondicionadas térmicamente se calcula a través del Coolig Design de Design Builder y es de:

$$\dot{Q} = 272,31kW$$

Considerando una utilización del aire acondicionado continuo durante las horas de ocupación del edificio que es de 09:00 a 18:00hrs y con un coeficiente de rendimiento de 1,5 para enfriar, se estima un gasto diario de electricidad de:

$$E_{diario} = 1633,9kWh$$

En la Figura 58 se puede apreciar la baja estimada de temperatura que produce la ventilación nocturna con 2 renovaciones por hora de una oficina del piso 4.

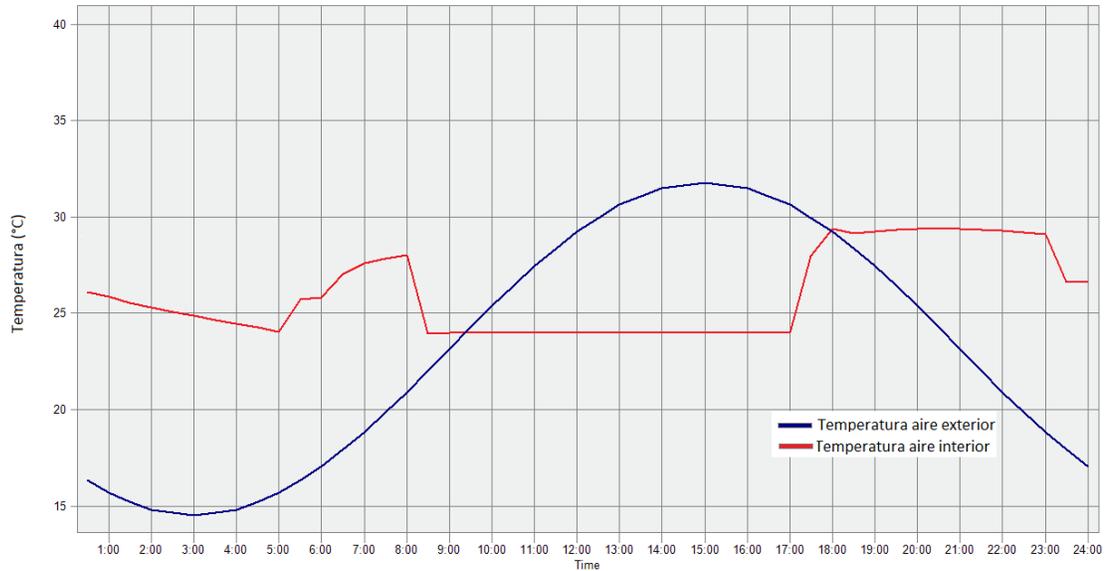


Figura 58: Temperaturas de oficina norte del cuarto piso con ventilación nocturna

El día empieza con una carga térmica menor debido a la ventilación nocturna. En la práctica quizás se pueda usar los espacios del edificio sin depender del sistema de climatización durante buena parte de la mañana. Se estima que esto cambia con el transcurso de las horas, el edificio ganará calor por el soleamiento y por las cargas internas. Se reduce **5%** el consumo de electricidad del equipo de enfriamiento.

5.4. Ventilación de confort

Para la ventilación natural se consideran 0,5 renovaciones/hora de las zonas de los pisos 3, 4 y 5. La Figura 59 muestra el flujo de calor que produce la ventilación natural en el edificio.

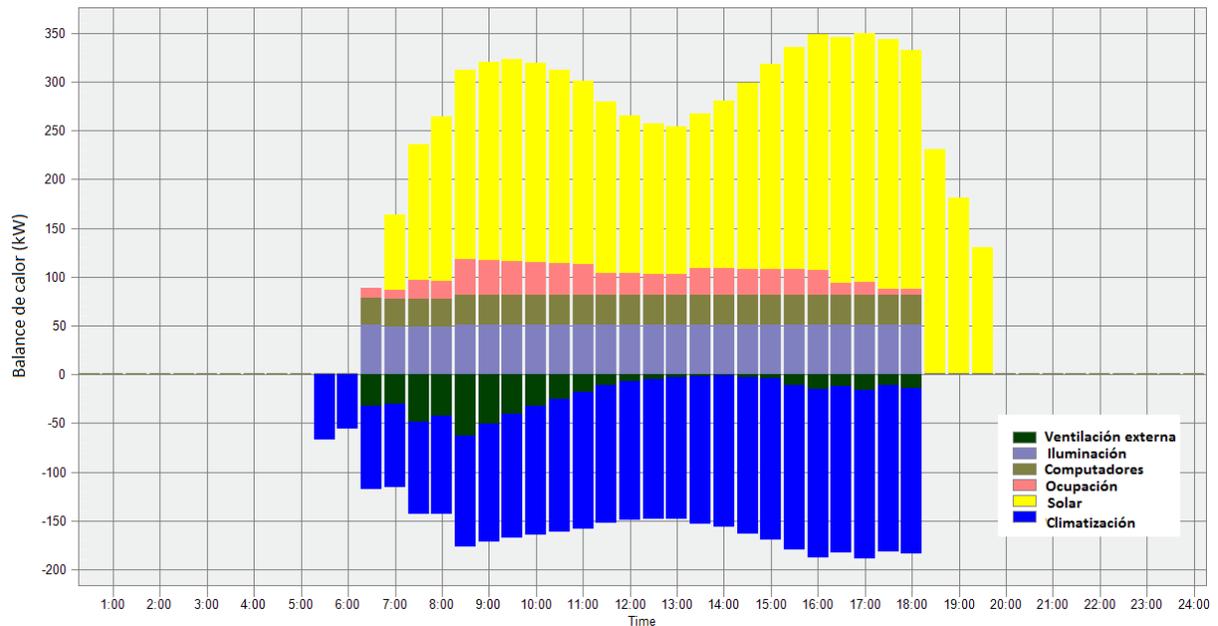


Figura 59: Balance de calor para edificio con ventilación natural para el día 15 de Enero

Aunque la función de la ventilación natural aplicada directamente sobre las personas es la de bajar la temperatura de confort producida por la velocidad del viento y no tanto por su temperatura.

La capacidad de frío que debe tener el equipo central de enfriamiento del edificio para llegar a los 24° C en las áreas acondicionadas térmicamente se calcula a través del Coolig Design de Design Builder y es de:

$$\dot{Q} = 284,17kW$$

Considerando una utilización del aire acondicionado continuo durante las horas de ocupación del edificio que es de 09:00 a 18:00hrs y con un coeficiente de rendimiento de 1,5 para enfriar, se estima un gasto diario de electricidad de:

$$E_{diario} = 1705kWh$$

Se reafirma entonces que el tener una ventilación de confort apunta a un fenómeno fisiológico. La baja de la carga térmica baja de 1722kWh del caso base a 1705kWh para este caso. Corresponde a una baja del **1%** en el consumo diario de energía.

5.5. Sombreamiento y ventilación nocturna

La combinación de sombreado y ventilación nocturna es totalmente complementaria. El sombreado impide el paso de la radiación solar a través de las ventanas impidiendo ganancias térmicas. La ventilación nocturna elimina el calor ganado durante el día por el edificio.

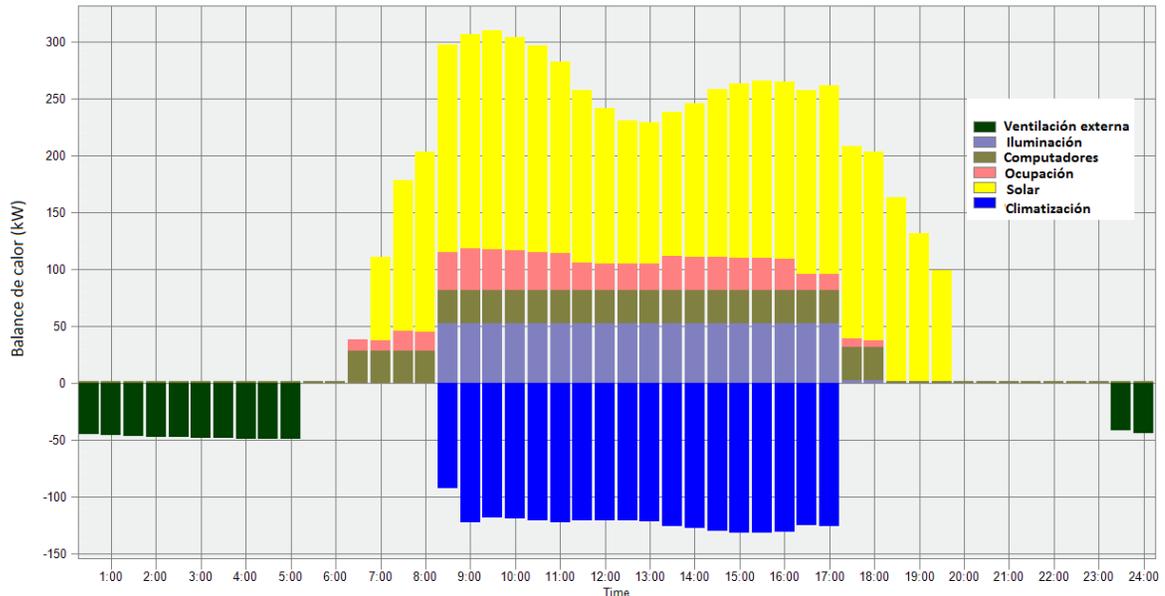


Figura 60: Balance de calor para edificio con sombreado y ventilación nocturna para el día 15 de Enero

La capacidad de frío que debe tener el equipo central de enfriamiento del edificio para llegar a los 24° C en las áreas acondicionadas térmicamente se calcula a través del Coolig Design de Design Builder y es de:

$$\dot{Q} = 208,06kW$$

Considerando una utilización del aire acondicionado continuo durante las horas de ocupación del edificio que es de 09:00 a 18:00hrs y con un coeficiente de rendimiento de 1,5 para enfriar, se estima un gasto diario de electricidad de:

$$E_{diario} = 1248,4kWh$$

La Figura 61 muestra el efecto que produce la aplicación de ambas soluciones. Se disminuye la temperatura en horas de la tarde debido al sombreado que disminuye las ganancias térmicas debidas a la radiación solar y se baja la temperatura de 27°C a casi 22°C en horas de la noche debido a la pérdida de calor por ventilación nocturna.

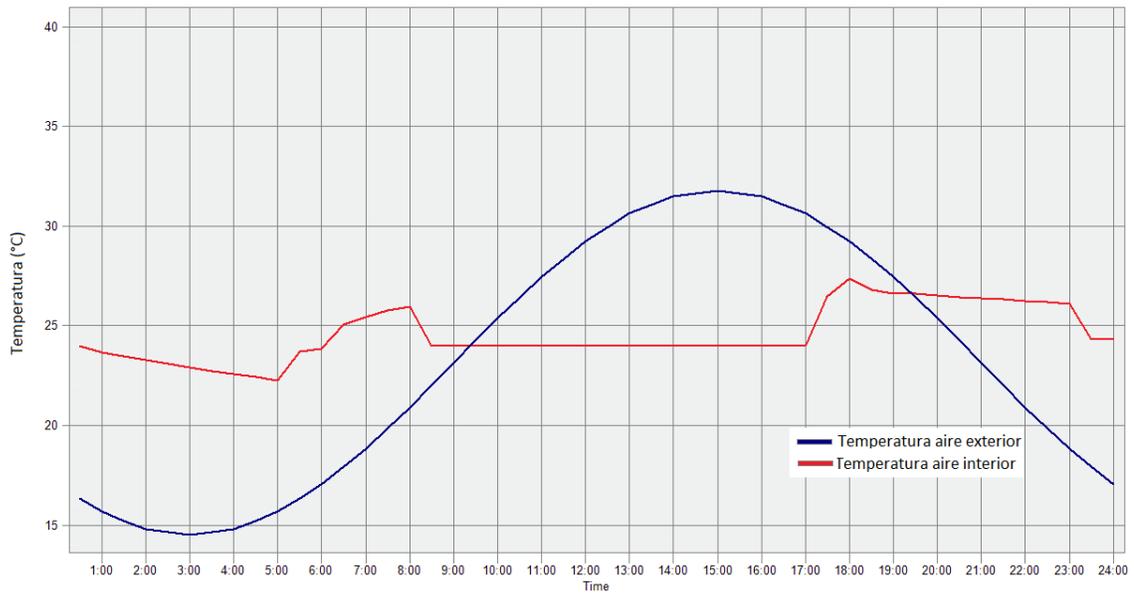


Figura 61: temperaturas para oficina norte de cuarto piso con sombreado y ventilación nocturna

Se analiza esta combinación puesto que es la mejor complementación de soluciones, bajando las ganancias térmicas producidas por la radiación solar, y eliminando el calor del interior del edificio. Se baja en un **27%** el consumo energético diario del sistema de climatización con respecto al caso base.

Los consumos eléctricos para climatización obtenidos se muestran en la Figura 62.

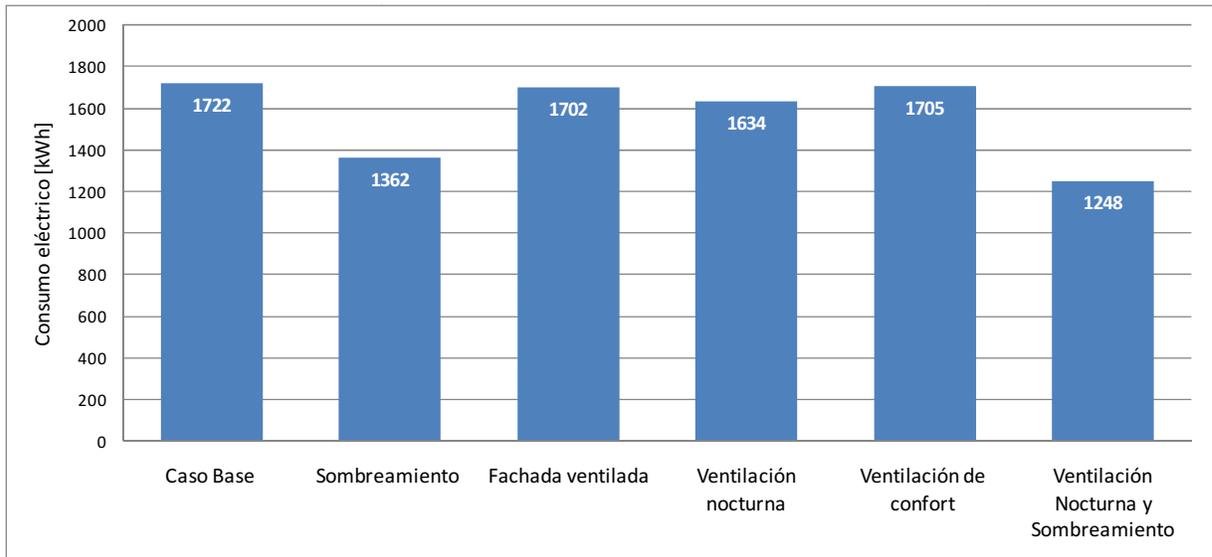


Figura 62: Consumo energético diario para las soluciones propuestas para el edificio

La solución de mayor impacto para la reducción de carga térmica en el edificio de Ingeniería Civil es la combinación de ventilación nocturna y sombreado.

6 Evaluación Económica

El análisis presente en este capítulo tiene como finalidad determinar la inversión máxima permitida para cada solución analizada tomando en cuenta los ahorros y costos estimados que producen cada una de ellas. Determinar la inversión exacta de cada solución es inviable debido a que los costos de instalación, el costo mismo de los materiales y diseño de implementación es difícil de conseguir, además varían con respecto al proyecto, justamente debido al diseño que se debe hacer para cada caso.

La herramienta económica para estimar la inversión máxima que puede alcanzar en cada caso será el VAN.

VAN

El VAN mide la rentabilidad de un proyecto en valores monetarios deducida la inversión. Actualiza a una determinada tasa de descuento i los flujos futuros. Este indicador permite seleccionar la mejor alternativa de inversión entre grupos de alternativas mutuamente excluyentes. [18]

$$VAN = \sum_{i=1}^{50} \frac{C_i}{(1+r)^i} - I_0$$

Donde:

r = tasa de descuento

C_i = Flujo de caja en el periodo i

I_0 = Inversión hecha en el periodo 0.

Se utilizará un periodo de evaluación de **50 años**, que es la vida útil promedio de un edificio para efectos económicos⁴. Se utilizará una tasa de descuento típica para proyectos inmobiliarios del **8%**.

$VAN > 0 \rightarrow$ *Inversión se debe hacer*

$$\sum_{i=1}^{50} \frac{C_i}{(1+r)^i} > I_0$$

La inversión máxima está acotada por la expresión indicada anteriormente.

⁴ RESOLUCION EXENTA N°43 DEL 26 DE DIC. DEL 2002, <http://www.sii.cl/documentos/resoluciones/2002/reso43.htm>

Costos Operacionales

El sombreado y la fachada ventilada no producen costos operacionales, pero si lo tiene la ventilación nocturna debido al uso de energía eléctrica de ventiladores que fuerzan la ventilación.

Tabla 10: Consumos de Extractores de aire estimados para instalar

Extractores Industriales	Dospel Woks 400	4235 m ³ /h
cantidad	6	2 x piso
Potencia eléctrica	160	W
gasto diario total	\$ 576	
gasto mensual	\$ 12.672	
gasto anual	\$ 50.688	

Ahorro anual

Se consideraron 5 meses de aplicación de las soluciones, ya que fueron calculadas para la época de verano del edificio. Los meses de Noviembre, Diciembre, Enero, Febrero y Marzo. El tipo de tarifa de suministro de energía eléctrica para el edificio es AT-4.3⁵. Incluyendo la potencia al valor de la energía se obtiene un valor de \$100/kWh aproximadamente.

Tabla 11: Ahorro en consumo de electricidad para la época de verano

Solución	ahorro energía [kwh]	ahorro
Sombreado	39620	\$ 3.961.980
Fachada ventilada	2204	\$ 220.440
Ventilación nocturna	9676	\$ 967.560
Ventilación de confort	1848	\$ 184.800
Sombreado y ventilación nocturna	52081	\$ 5.208.060

Inversión Máxima

Considerando que no se puede hacer una estimación ajustada de la inversión necesaria para cada solución se calculará la inversión máxima que resiste cada solución tal que sea viable aplicarla, considerando una tasa de descuento del 8% que no representa una tasa de riesgo elevada.

Tabla 12: Inversión máxima realizable para cada solución para el edificio

Solución	Inversión
sombreado	\$ 48.468.821
fachada ventilada	\$ 2.696.749
ventilación nocturna	\$ 11.216.540
ventilación de confort	\$ 1.375.982
sombreado y ventilación nocturna	\$ 63.092.631

⁵ Valor energía eléctrica \$60,86/ kWh, según Chilectra S.A. a partir del 01 de Abril de 2011

7 Análisis y Discusión

A partir del estudio térmico llamado “Estudio térmico del edificio de Ingeniería Civil” se aprecia que los sectores más críticos del edificio en época de verano son las oficinas perimetrales ubicadas en el sector Poniente y Norte. En el sector Poniente se presentan los máximos de temperatura, llegando a los **35°C** entre las 17:30 y las 20:00 horas, mientras que en el sector Norte se presentan temperaturas relativamente constantes durante el día de temperatura promedio **30°C**. La radiación solar es la principal causa del mal comportamiento térmico del edificio. Las fachadas vidriadas no impiden el ingreso de calor al edificio pero sí impiden su salida provocando una acumulación de calor en su interior, fenómeno llamado efecto invernadero. Las temperaturas nocturnas del edificio en las oficinas perimetrales alcanzan los 30°C y no bajan de los 25°C, esto es debido a la alta inercia térmica del edificio provocado por la masa de hormigón armado, que es de **2171 m³** aprox.

El objetivo principal del estudio de las soluciones es comparar el ahorro de energía que se produce con cada uno, ya sea dejando de percibir calor o eliminándolo del edificio. Para analizar las soluciones se utilizó el programa Design Builder simulando un caso base para luego hacer la comparación con cada solución implementada en el modelo.

El beneficio estimado diario que se produce en la época de verano para cada solución estudiada se muestra en la Tabla 13, tomando en cuenta que el consume eléctrico diario estimado para el caso base del edificio es 1722kWh.

Tabla 13: Consumo de energía diario en aire acondicionado para edificio con soluciones implementadas

Solución	Capacidad de frío requerida [kW]	Ahorro energético diario [kWh]
Sombreamiento	226,9	360
Fachada Ventilada	283,6	20
Ventilación Nocturna	272,3	88
Ventilación de confort	284,2	17
Sombreamiento + Ventilación nocturna	208,1	473

El sombreadamiento se hace cargo de la principal causa de ganancias térmicas del edificio. La radiación del sol es amortiguada por los quebravistas instalados en los sectores norte y poniente del edificio, fachadas que reciben la mayor cantidad de radiación solar.

La fachada ventilada tiene la función de proveer de una segunda piel al edificio, aumentando la aislación de las fachadas cubiertas por la solución. Los muros exteriores poseen una transmitancia térmica de $U=3,1\text{W}/\text{m}^2\text{K}$ y con una solución de fachada ventilada se llega a una transmitancia térmica de $U=0,335\text{W}/\text{m}^2\text{K}$, cumpliendo con lo que exige la NCh1079, transmitancia térmica de $U=1,9\text{W}/\text{m}^2\text{K}$ como mínimo.

La ventilación nocturna enfría las masas de hormigón de los pisos 3, 4 y 5 del edificio. La hermeticidad de estos pisos destinados a oficinas, hace que no se ventile de forma adecuada el edificio en los pisos ya mencionados. Realizar 2 renovaciones por hora de los espacios de los pisos 3, 4 y 5 se llega a una reducción en la carga térmica diaria para el equipo de enfriamiento de **132kWh**.

La ventilación natural diurna del edificio que se aplica de forma directa a las personas, provoca una pequeña cantidad de baja en las ganancias térmicas del edificio estimado en **25kWh** diarios en la época de verano, debido a que se toman 0,5 renovaciones por hora y la temperatura exterior es más alta que la usada en la ventilación nocturna. El objetivo es bajar la temperatura de confort de las personas, haciendo circular este aire a cierta velocidad tal de no interrumpir las actividades de oficina.

Los cálculos realizados en el capítulo 6 estiman la inversión máxima que se puede hacer en cada solución. Sin embargo no se introduce en el análisis el valor que se le puede asignar a la sensación de bienestar térmico de los ocupantes del edificio, por lo cual la inversión máxima a realizar puede ser mayor hasta cierto punto.

8 Conclusiones generales sobre el comportamiento térmico del edificio

8.1. Comportamiento térmico del edificio

8.1.1. El edificio alcanza en época de verano elevadas temperaturas en el ambiente interior

Esto se evidencia en los registros de temperatura. En oficinas con orientación poniente las temperaturas pueden alcanzar con facilidad los 30°C.

El edificio presenta una alta ganancia térmica en la época de verano proveniente de la radiación solar. Además el edificio no tiene mecanismos de eliminación de este calor, por lo que se acumula alcanzando las temperaturas ya descritas.

8.1.2. El edificio no cuenta con ventilación natural ni ventilación forzada

Los pisos 3, 4 y 5 del edificio son herméticos y no permiten la circulación del aire durante el día. No existen ventanas operables suficientes capaces de favorecer una corriente de aire por sí sola. Los pisos 1 y 2 poseen ventilación natural debido a que están conectados con el ambiente exterior.

8.1.3. Distribución deficiente de los espacios de alta ocupación.

Las salas de computación del piso 2 se encuentran en la zona perimetral norte y poniente del edificio, siendo que con un diseño correcto se ubicarían en el sector sur oriente. Estas salas siendo de alta ocupación, presentan ganancias térmicas importantes por soleamiento, equipos de computación y personas.

8.1.4. Equipo de aire acondicionado subdimensionado

En la actualidad el equipo de climatización, aún trabajando a máxima capacidad no es capaz de mantener la temperatura en el rango de confort (entre los 18°C y los 22°C).

El equipo está subdimensionado para las altas cargas térmicas que debe soportar en la época de verano, sobre todo la que proviene de la radiación solar. Esta afirmación podría cambiar con la instalación de quiebravistas para el edificio.

8.2. Aplicación de soluciones

8.2.1. Disminución de ganancias térmicas

La disminución de calor puede lograrse con ventilación nocturna, natural o forzada. Para forzar la ventilación en la noche se deben instalar a lo menos dos extractores de muro por piso capaces de realizar dos o más renovaciones de aire por hora. Por otro lado la instalación de quebravistas en las fachadas norte y poniente evitara la excesiva radiación solar.

Para favorecer la ventilación natural se deben habilitar ventanas perimetrales basculantes en todas las oficinas.

8.2.2. Redistribución de los espacios de alta ocupación.

Las salas de computación del segundo piso de alta ocupación, deben intercambiar posición con la biblioteca de Ingeniería Civil, la cual cubre un área similar a las dos salas. La biblioteca, al ubicarse en el sector sur tiene una menor carga térmica proveniente de la radiación solar que las salas de computación.

8.2.3. Mejora del rendimiento del sistema de climatización

La aplicación de sombreado en conjunto con la ventilación nocturna hará que el sistema de climatización actual mejore su desempeño, ya que soportará un 27% menos de carga térmica. Sin embargo, no es condición suficiente para que se alcance el rango de confort térmico.

En el caso que se desee implementar estas soluciones propuestas el cambio del sistema de climatización debe considerar las cargas térmicas que actúan actualmente sobre el edificio, para dimensionarlo adecuadamente.

La eficiencia del equipo debe cumplir con lo exigido por las normativas de EEUU, que no permite equipos con rendimiento inferior a 13 SEER⁶.

⁶ 13 SEER corresponden a un $CoP=3.43$ (Coeficiente de rendimiento)

9 Conclusiones

El presente trabajo evidencia que la principal causa de las ganancias térmicas para el Edificio de Ingeniería Civil de la Facultad de Ciencias Físicas y matemáticas de la Universidad de Chile en particular es la radiación solar a través de las ventanas.

Para obtener un comportamiento térmico del edificio aceptable, se debe aplicar una medida tal de reducir la ganancia térmica producida por la radiación solar a través de las ventanas. La aplicación de quiebravistas propuesta provoca la mayor baja en la carga térmica estimada para el edificio. Con la aplicación de sombreado se obtendrán las mayores bajas de cargas térmicas para el edificio en la época de verano. Se obtiene una baja en la carga térmica diaria estimada de 540kWh.

Otro aspecto que se evidencia en el presente trabajo es la acumulación de calor en el edificio causada por su alta inercia térmica y por la baja ventilación del edificio, especialmente en los pisos 3, 4 y 5. La ventilación nocturna obtiene una baja en la carga térmica de 161kWh, menor que el sombreado. La masa térmica del edificio es la principal característica que utiliza la ventilación nocturna. Se usa como acumulador de calor durante el día.

Utilizar la ventilación natural en el día trae más beneficios en el confort de las personas que en la reducción de calor del interior del edificio. Los efectos fisiológicos de esta solución es lo que importa a fin de cuentas, alcanzar el confort térmico de los ocupantes en el verano.

La fachada ventilada tiene un leve impacto en la reducción de las ganancias térmicas en verano, ya que se centra en la aislación de los muros perimetrales del edificio. Su efecto puede ser más beneficioso en invierno por su capacidad aislante.

En conclusión la implementación de **sombreado** en conjunto con una adecuada **ventilación nocturna** produce una baja en la carga térmica del edificio, estimada en **710kWh** por día, lo que se traduce en un ahorro diario de 473kWh de electricidad. La combinación de estas dos soluciones absolutamente complementarias se hace cargo del efecto invernadero, que es uno de los aspectos negativos de las fachadas vidriadas de edificios en especial con fachadas con orientación norte y además contaría con un mecanismo de eliminación del calor ganado durante la jornada. La ventilación de confort es un acompañamiento a las soluciones ya mencionadas que producirá un beneficio cualitativo.

El estudio específico que se hizo del edificio de Ingeniería Civil es extrapolable a otros edificios en Santiago con la condición que tenga características parecidas. La orientación, el porcentaje de vidriado de las fachadas, la materialidad y el uso del edificio son factores a considerar en caso que se quiera comparar los resultados para otros edificios.

REFERENCIAS

1. **Miranda, Luis Guillermo (2008).** *Estudio termico del Edificio de Ingeniería Civil de la Universidad de Chile*, Memoria para optar a título de ingeniero civil, FCFM Universidad de Chile, Santiago.
2. **Mondelo, Pedro, Gregori, Enrique y Comas, Santiago (1995).** *Ergonomía 2 Confort y estrés térmico*. Mutua Universal, Barcelona.
3. **NCh853 (1991).** *Envoltente térmica de edificios - Cálculo de resistencias y transmitancias térmicas*. Santiago.
4. **NCh1960 (1989).** *Aislación térmica - Cálculo de coeficientes volumétricos globales de pérdidas térmicas*. Santiago.
5. **Instituto de la construcción (2006).** *Manual de aplicación: Reglamentación Térmica*. Edicolor, Santiago.
6. **NCh1079 (1977).** *Zonificación climatico habitacional para Chile y recomendaciones para el diseño arquitectónico*, Santiago.
7. **Rodríguez, Gabriel (2009).** *El clima y la construcción habitacional II*. Revista BIT, 64. 34/37.
8. **Carrier Air Conditioner (1980).** *Manual de Aire Acondicionado*. Marcombo, Barcelona .
9. **Chartered Institution of Building Services CIBSE (2006)** . *Design for improved solar shading control*. Londres.
10. **Puppo, Ernesto (1976).** *Sol y diseño*. Marcombo, Barcelona.
11. **CDT (2008).** *Aislación termica exterior*. Santiago.
12. **Incropera, Frank (1996).** *Fundamentos de transferencia de calor*. Pearson, Mexico.
13. **Hunter Douglas (2009).** *Guía basica para fachadas ventiladas y protección solar*. Santiago.
14. **Maldonado, Daniela (2009).** *Protector Solar*. Revista BIT, 64. 82/85.
15. **Maldonado, Daniela (2010).** *Instalación de fachadas ventiladas*. Revista BIT, 72. 72/76.
16. **Mermet, Alejandro (2005).** *Ventilacion natural de edificios*. Eduardo Yarke, Buenos Aires.
17. **Software, Design Builder (2008).** *Design Builder Simulation + CFD Training Guide*.
18. **Guzmán, Cesar Aching (2009).** *Matemáticas financieras para toma de decisiones empresariales*. Cengage Learning, Lima.

INDICE ALFABETICO

A	
<i>Aire exterior necesario para la ventilación.....</i>	<i>8</i>
C	
<i>Coefficiente superficial de transferencia térmica</i>	<i>5</i>
<i>Conductividad térmica</i>	<i>5</i>
<i>Confort térmico</i>	<i>5</i>
E	
<i>Efecto Chimenea.....</i>	<i>17</i>
<i>Efecto Invernadero</i>	<i>14</i>
<i>Envolvente térmica de un edificio</i>	<i>6</i>
F	
<i>Fachada ventilada</i>	<i>35</i>
I	
<i>Inercia Térmica.....</i>	<i>12</i>
L	
<i>La radiación infrarroja.....</i>	<i>15</i>
<i>La radiación solar</i>	<i>14</i>
P	
<i>Parasol.....</i>	<i>31</i>
<i>Pérdidas por renovaciones de aire</i>	<i>6</i>
<i>Placa de revestimiento</i>	<i>35</i>
<i>Puente térmico</i>	<i>6</i>
Q	
<i>Quebravistas horizontales.....</i>	<i>31</i>
R	
<i>Radiación solar que entra a través de</i> <i>cerramientos transparentes</i>	<i>8</i>
<i>Radiación solar sobre cerramientos opacos....</i>	<i>8</i>
<i>Resistencia térmica de superficie</i>	<i>5</i>
<i>Resistencia térmica de una cámara de aire no</i> <i>ventilada</i>	<i>5</i>
<i>Resistencia térmica de una capa material</i>	<i>5</i>
<i>Resistencia térmica total de un elemento</i> <i>compuesto</i>	<i>5</i>
S	
<i>Sombreamiento.....</i>	<i>30</i>
T	
<i>Toldo.....</i>	<i>31</i>
<i>Transmitancia térmica</i>	<i>6</i>
<i>Trayectoria solar</i>	<i>32</i>
V	
<i>VAN</i>	<i>64</i>
<i>Ventilación natural.....</i>	<i>42</i>
<i>Ventilación nocturna</i>	<i>39</i>
<i>Voladizos Simples</i>	<i>30</i>

ANEXO A

Cálculos de Ganancias densidad de iluminación, densidad de equipos electrónicos de escritorio y densidad de ocupación.

Densidad de equipos de computacionales

Tabla A1: Densidad de equipos computacional para oficina promedio de Área útil 13m²

Equipo	Consumo encendido[W]	Probabilidad encendido	Consumo stand by [W]	Probabilidad Stand by	W/m ²
laptop	15	0,75	3	0,25	0,9
pc	55	0,75	25	0,25	3,7
lcd 17"	17	0,75	9	0,25	1,2
imp. laser	130	0,25	10	0,75	3,1
Total					8,8

Tabla A2: Densidad de equipos computacionales para sala de PC1 de área útil 57,6m²

Equipo	Consumo encendido[W]	Probabilidad encendido	Consumo stand by [W]	Probabilidad Stand by	W/m ²
pc	55	0,75	25	0,25	16,5
lcd 15"	12	0,75	3	0,25	3,4
Total					19,9

Tabla A3: Densidad de equipos computacionales para sala de PC2 de área útil 52m²

Equipo	Consumo encendido [W]	Probabilidad encendido	Consumo stand by [W]	Probabilidad Stand by	W/m ²
pc	55	0,75	25	0,25	9,1
lcd 15"	12	0,75	3	0,25	1,9
Total					11,0

Tabla A4: Densidad de equipos computacionales para sala de memoristas de área útil 52m²

Equipo	Consumo encendido [W]	Probabilidad encendido	Consumo stand by [W]	Probabilidad Stand by	W/m ²
laptop	15	0,75	3	0,25	2,3

Densidad de personas

Tabla A5: Densidad de personas promedio para cada piso en base a la utilización de los espacios. (Máxima ocupación posible)

Piso	Docentes	Memoristas	Sala PC	Sala reuniones	Suma	Área útil [m ²]	densidad [personas/m ²]
1	8	0	0	0	8	205,0	0,039
2	3	20	40	0	63	490,6	0,128
3	27	30	20	20	97	760	0,128
4	27	30	20	20	97	760	0,128
5	10	10	0	10	30	203	0,148
TOTAL	75	90	80	50	295	2418,6	0,122

El piso 5 tiene la mayor densidad de ocupación, por lo que se tomará como referencia una densidad de 0,15 personas /m² para todo el edificio.

Tabla A6: Densidad de iluminación

Piso	Área T10 [m ²]	Área CFL [m ²]
1	217	760
2	351	211
3	372	414
4	372	414
5	194	140
TOTAL	1506	1384

Iluminación oficinas	9	[W/m ²] T10 20W
Iluminación pasillos	8	[W/m ²] CFL 20W

ANEXO B

Figuras explicativas del Edificio de Ingeniería Civil (Planos y Elevaciones).

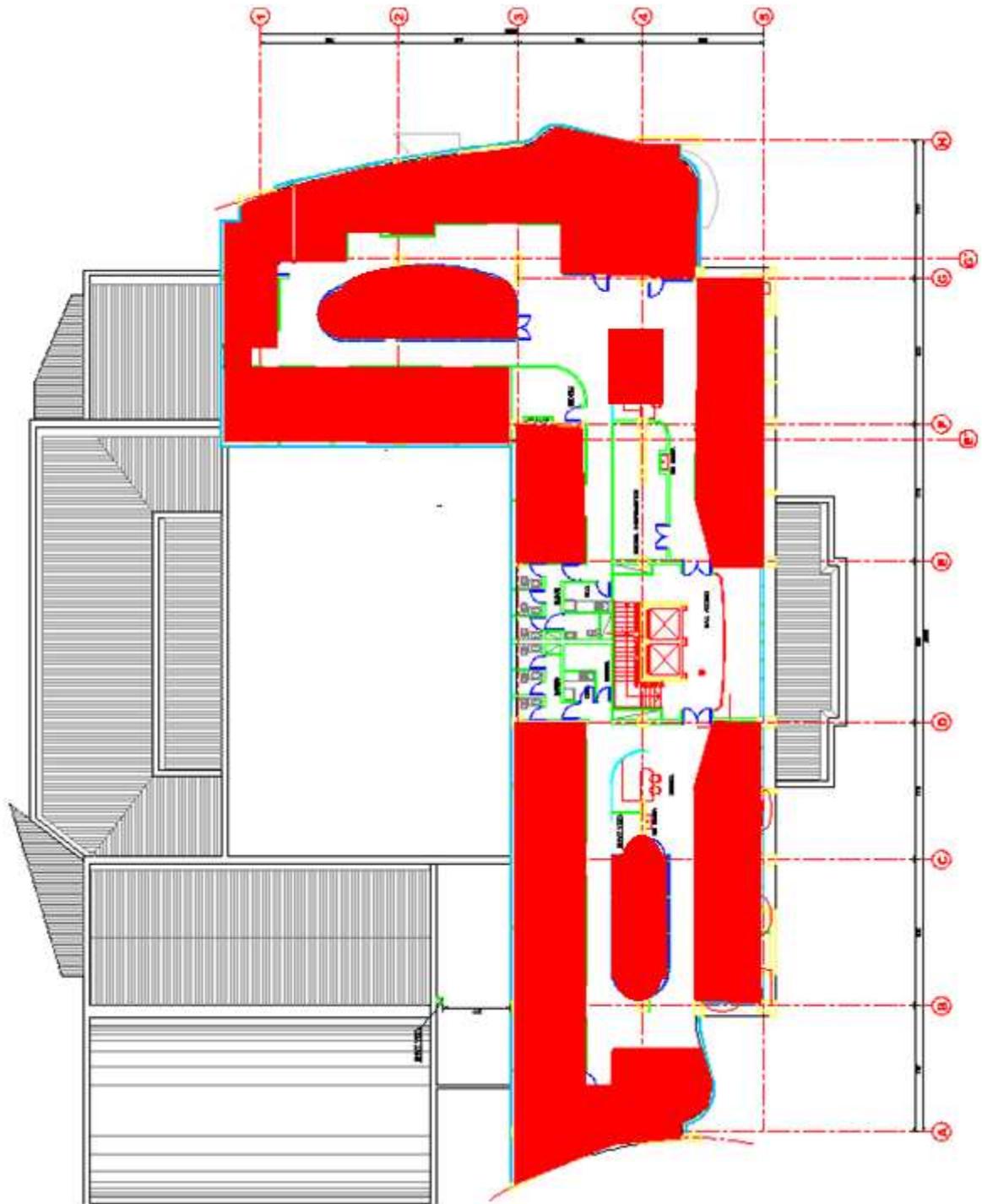


Figura B1: Zonas consideradas con aire acondicionado de pisos 3

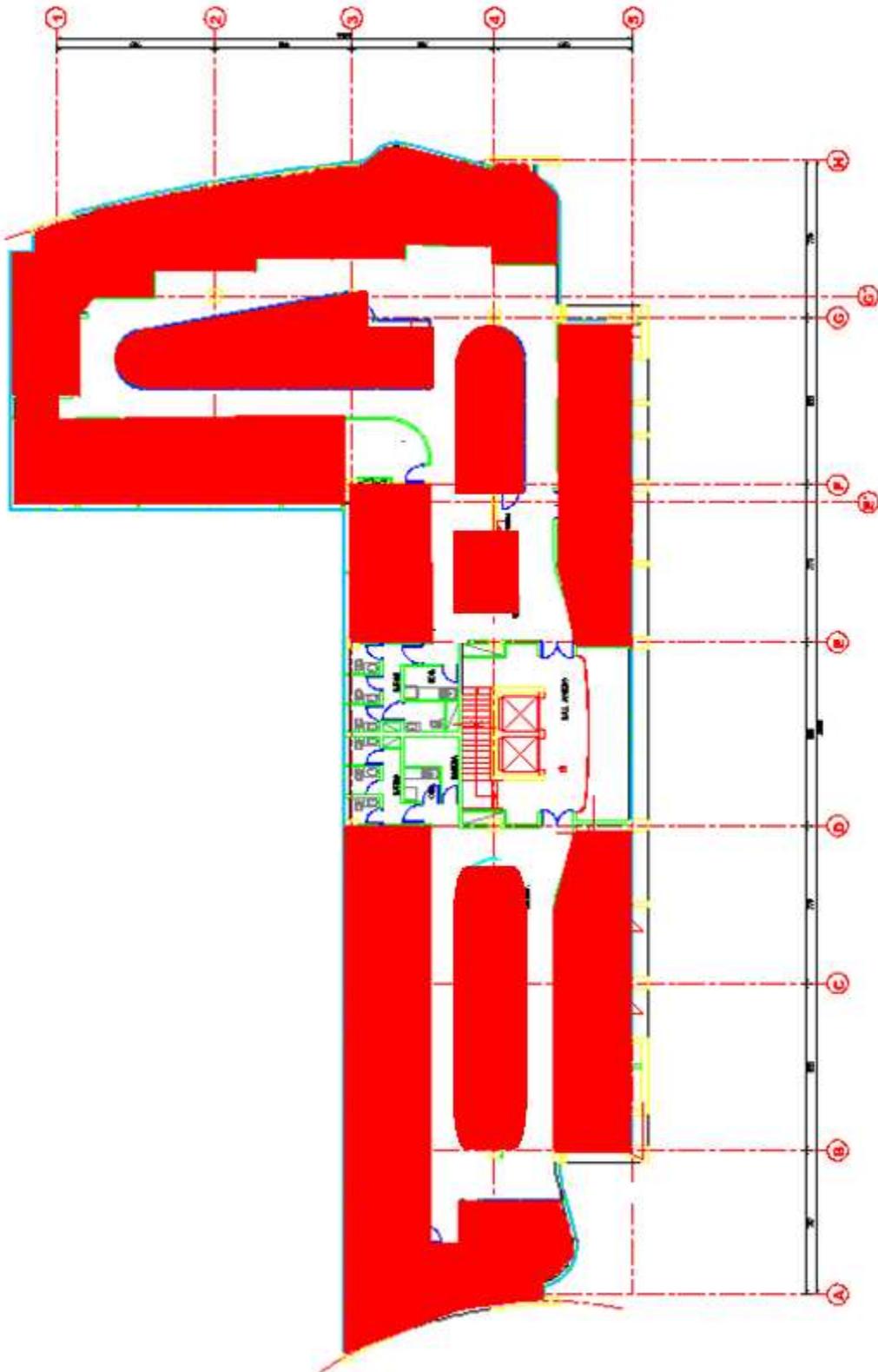


Figura B2: Zonas consideradas con aire acondicionado de pisos 4

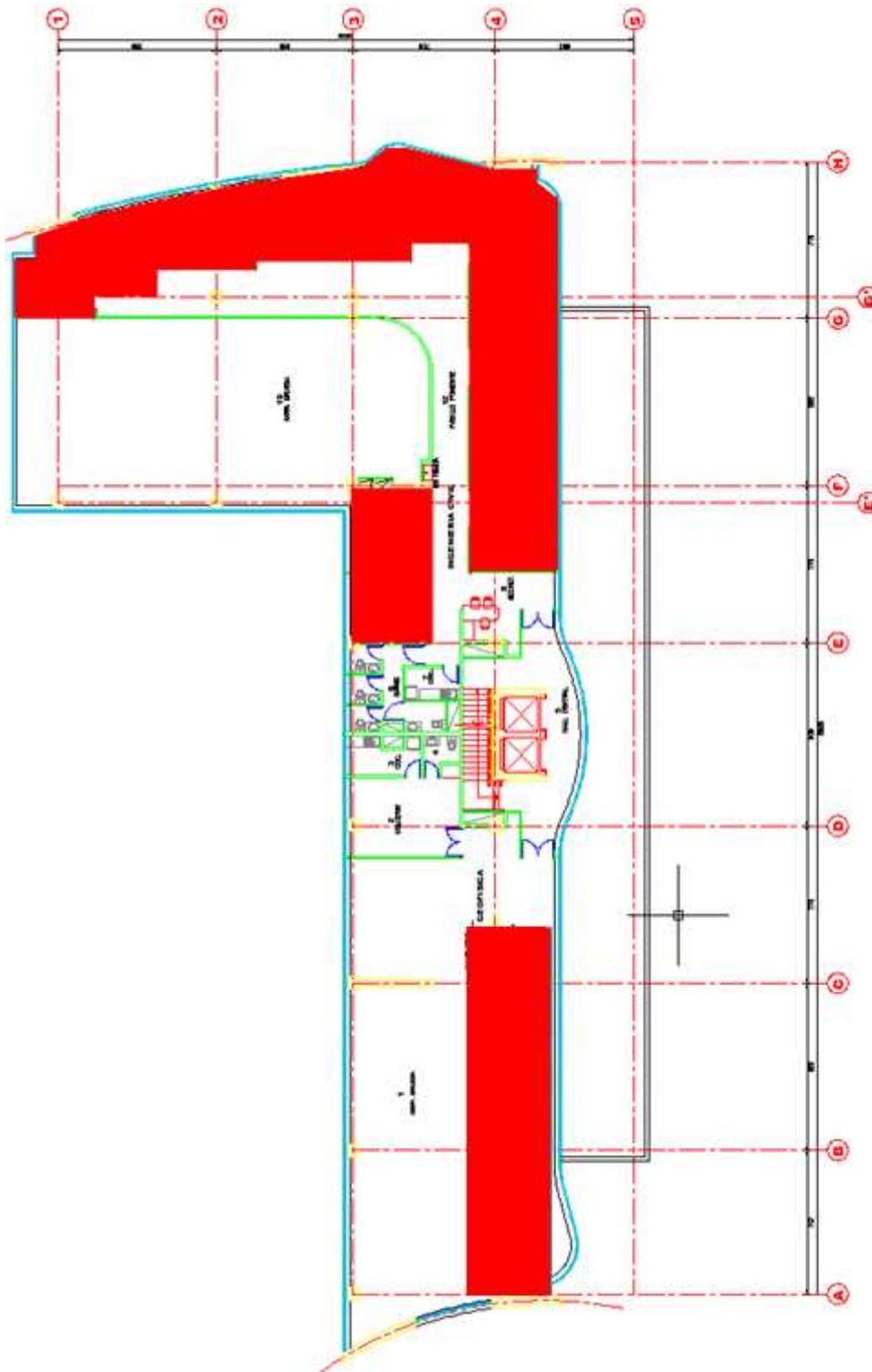


Figura B3: Zonas consideradas con aire acondicionado de pisos 5

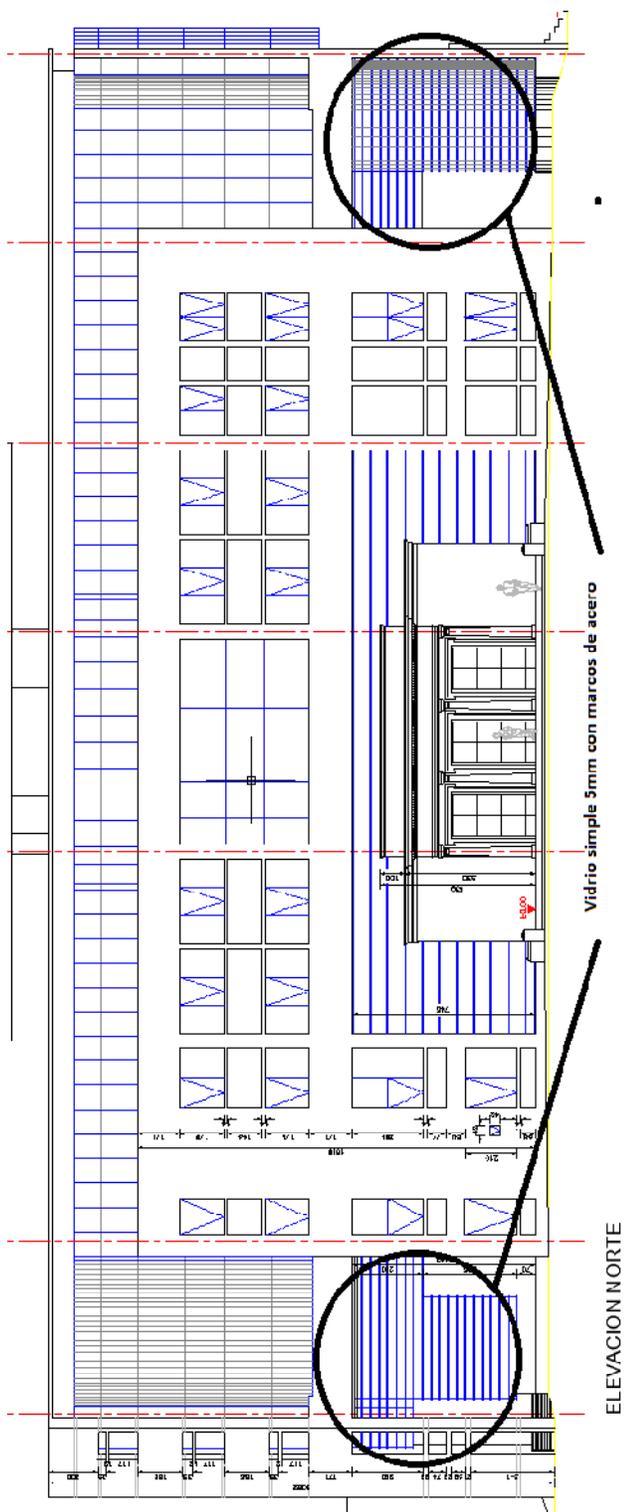
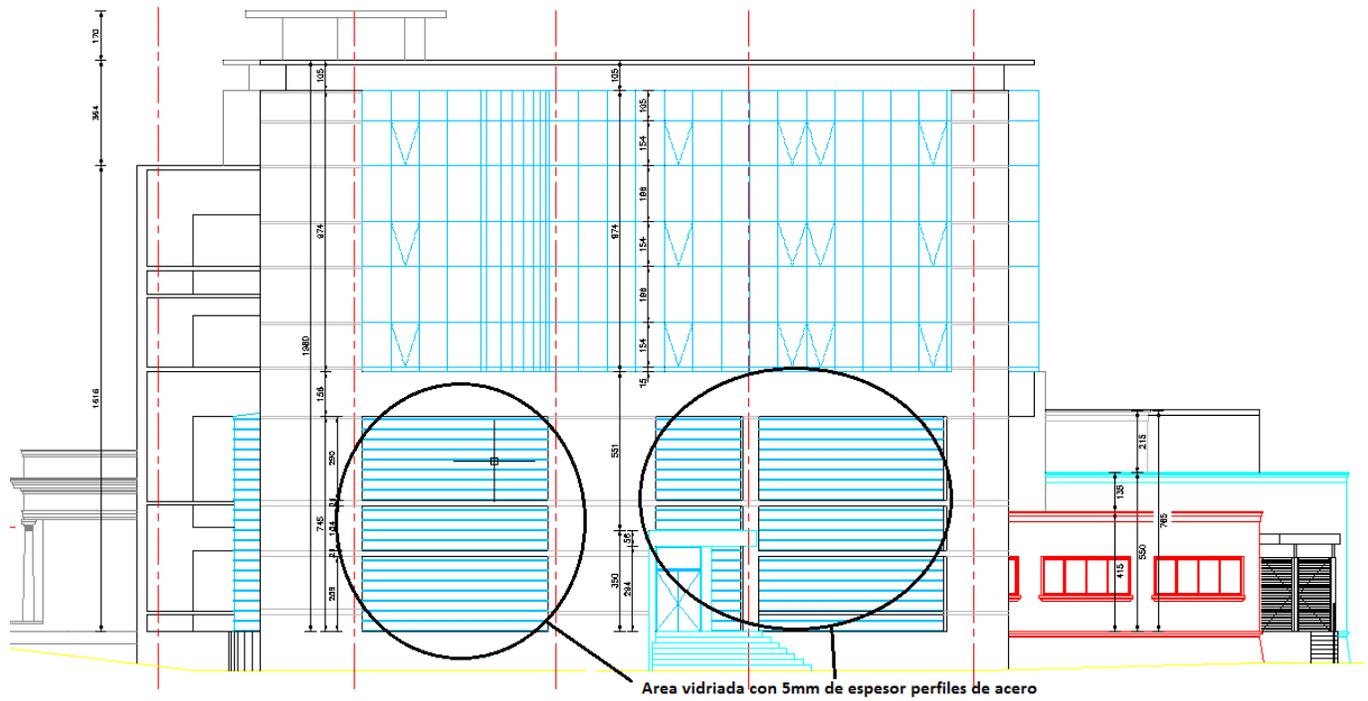


Figura B4: Zona vidriada con vidrio simple de espesor 5 mm con fachada norte



ELEVACION PONIENTE

Figura B5: Zona vidriada con vidrio simple de espesor 5 mm con fachada poniente

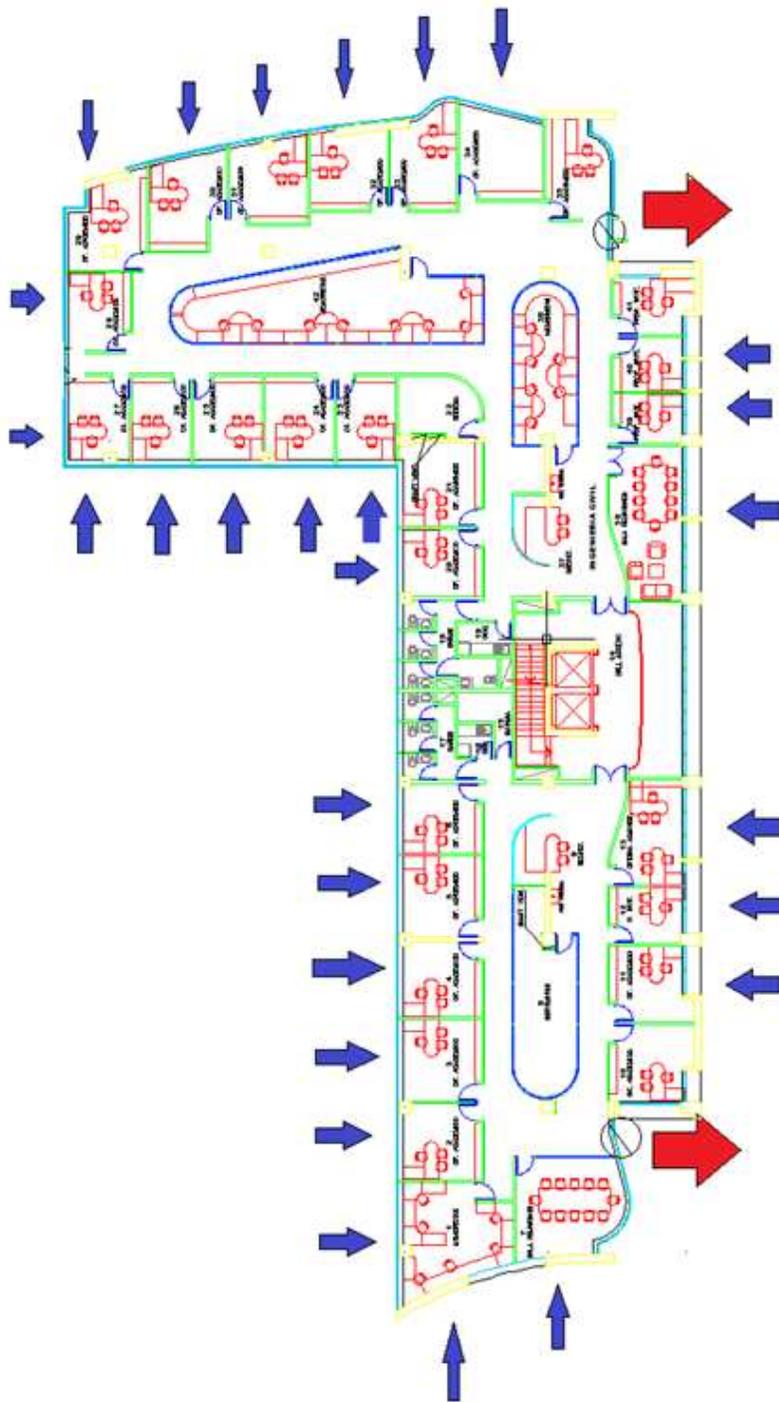


Figura B6: Ventilación propuesta para piso 4 del Edificio de Ingeniería Civil (análogo para pisos 3 y 5)

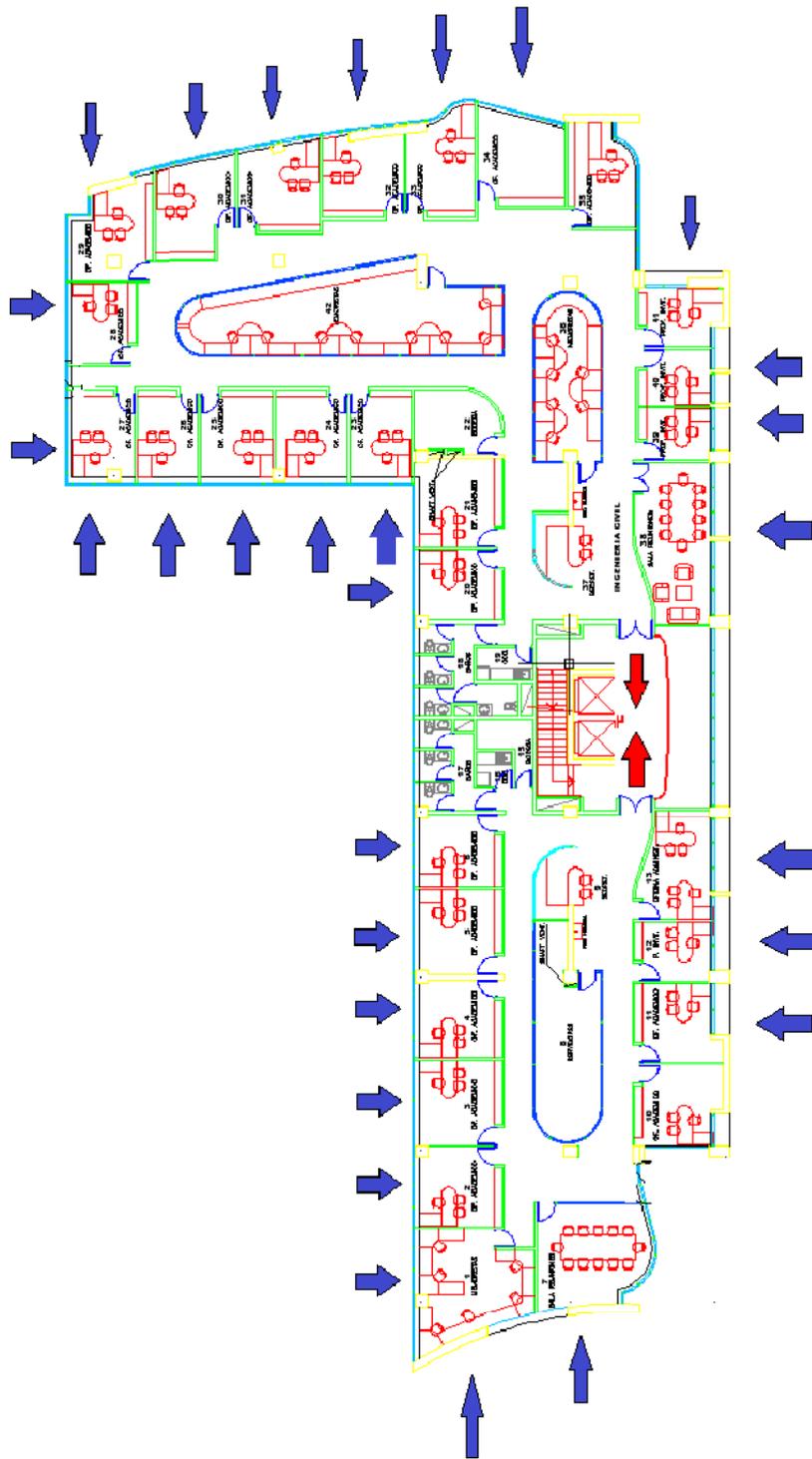


Figura B7: Ventilación propuesta para piso 4 del Edificio de Ingeniería Civil (análogo para pisos 3 y 5)

ANEXO C

Componentes Fachada Ventilada cortes vertical y horizontal

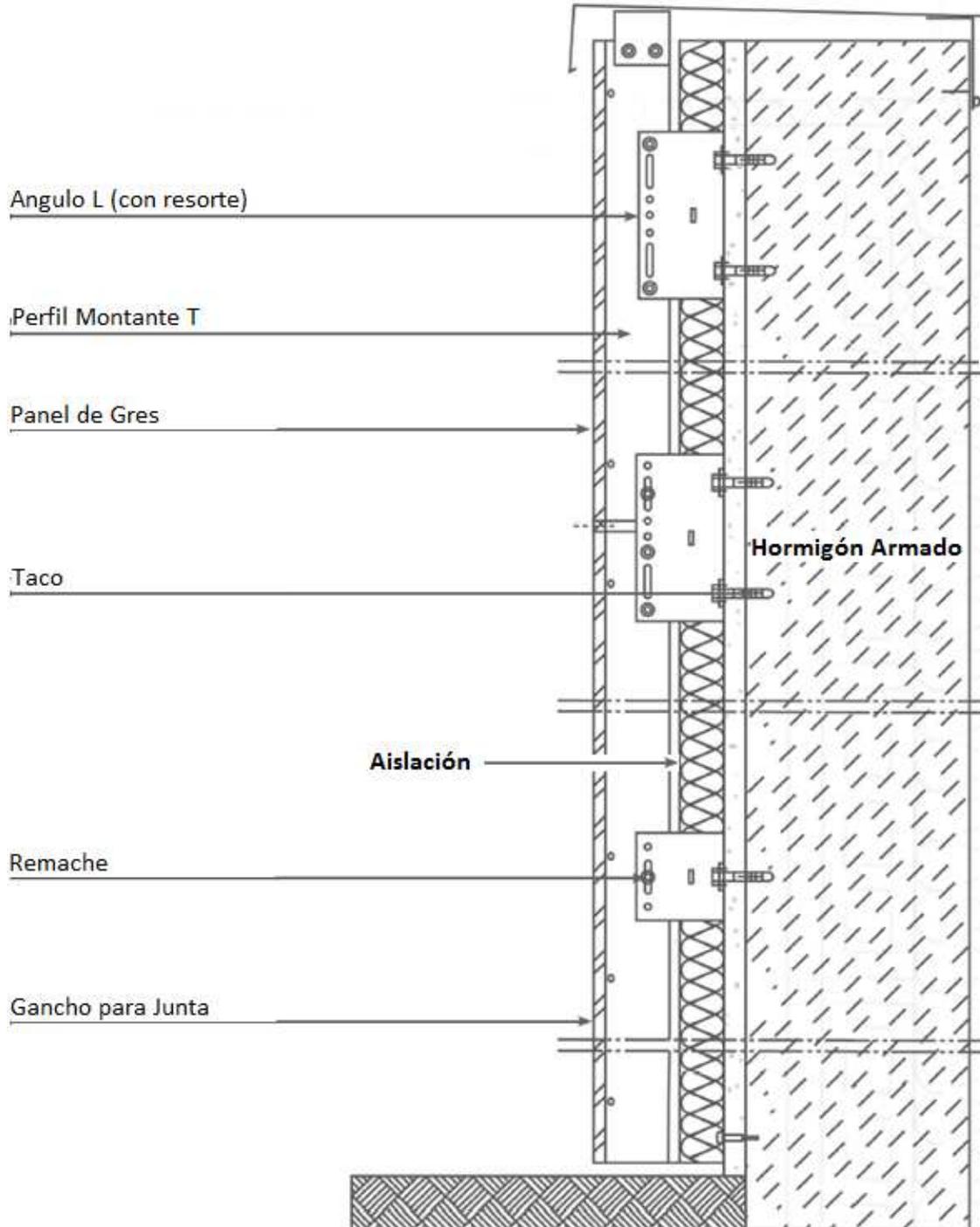


Figura C1: Vista en elevación de detalles de instalación para la fachada ventilada [10]

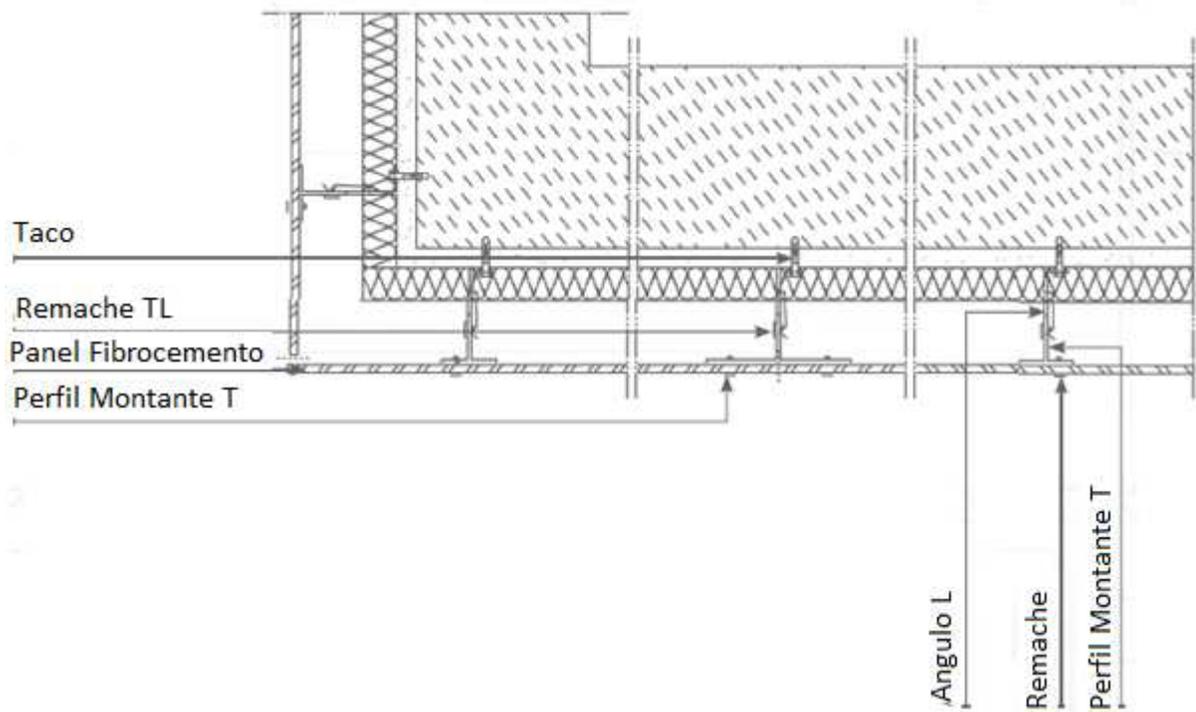


Figura C2: Vista en planta de detalle de instalación de fachada ventilada [10]



Figura C3: Ejemplo de instalación de fachada ventilada, aislación y sistema de fijación [10]

ANEXO D

Tablas y Gráficos resultados Design Builder

Zone	Design Capacity (kW)
Edificio Civil Total Design Cooling Requirement = 286,970 (kW)	
+ Piso 1 Total Design Cooling Requirement	= 21,700 (kW)
+ Piso 3 Total Design Cooling Requirement	= 89,730 (kW)
+ Piso 4 Total Design Cooling Requirement	= 91,930 (kW)
+ Piso 5 Total Design Cooling Requirement	= 55,910 (kW)
+ Piso 2 Total Design Cooling Requirement	= 27,700 (kW)

Figura D1: Carga de calor para el diseño de equipo de frio para edificio base

Zone	Design Capacity (kW)
Edificio Civil Total Design Cooling Requirement = 226,940 (kW)	
+ Piso 1 Total Design Cooling Requirement	= 15,450 (kW)
+ Piso 3 Total Design Cooling Requirement	= 73,780 (kW)
+ Piso 4 Total Design Cooling Requirement	= 75,710 (kW)
+ Piso 5 Total Design Cooling Requirement	= 40,720 (kW)
+ Piso 2 Total Design Cooling Requirement	= 21,280 (kW)

Figura D2: Carga de calor para el diseño de equipo de frio para edificio con quiebravistas

Zone	Design Capacity (kW)
Edificio Civil Total Design Cooling Requirement = 283,630 (kW)	
+ Piso 1 Total Design Cooling Requirement	= 25,330 (kW)
+ Piso 3 Total Design Cooling Requirement	= 87,430 (kW)
+ Piso 4 Total Design Cooling Requirement	= 89,910 (kW)
+ Piso 5 Total Design Cooling Requirement	= 54,120 (kW)
+ Piso 2 Total Design Cooling Requirement	= 26,840 (kW)

Figura D3: Carga de calor para el diseño de equipo de frio para edificio con fachada ventilada

Zone	Design Capacity (kW)
Edificio Civil Total Design Cooling Requirement = 272,310 (kW)	
+ Piso 1 Total Design Cooling Requirement	= 25,610 (kW)
+ Piso 3 Total Design Cooling Requirement	= 82,100 (kW)
+ Piso 4 Total Design Cooling Requirement	= 84,990 (kW)
+ Piso 5 Total Design Cooling Requirement	= 53,340 (kW)
+ Piso 2 Total Design Cooling Requirement	= 26,270 (kW)

Figura D4: Carga de calor para el diseño de equipo de frio para edificio con ventilación nocturna

Zone	Design Capacity (kW)
Edificio Civil Total Design Cooling Requirement = 284,170 (kW)	
+ Piso 1 Total Design Cooling Requirement	= 26,610 (kW)
+ Piso 3 Total Design Cooling Requirement	= 84,380 (kW)
+ Piso 4 Total Design Cooling Requirement	= 86,730 (kW)
+ Piso 5 Total Design Cooling Requirement	= 59,100 (kW)
+ Piso 2 Total Design Cooling Requirement	= 27,350 (kW)

Figura D5: Carga de calor para el diseño de equipo de frio para edificio con ventilación de confort

Zone	Design Capacity (kW)
Edificio Civil Total Design Cooling Requirement = 152,090 (kW)	
+ Piso 1 Total Design Cooling Requirement	= 0,000 (kW)
+ Piso 3 Total Design Cooling Requirement	= 65,030 (kW)
+ Piso 4 Total Design Cooling Requirement	= 60,470 (kW)
+ Piso 5 Total Design Cooling Requirement	= 26,590 (kW)
+ Piso 2 Total Design Cooling Requirement	= 0,000 (kW)

Figura D6: Carga de calor para el diseño de equipo de frio para edificio con quiebravistas y ventilación nocturna

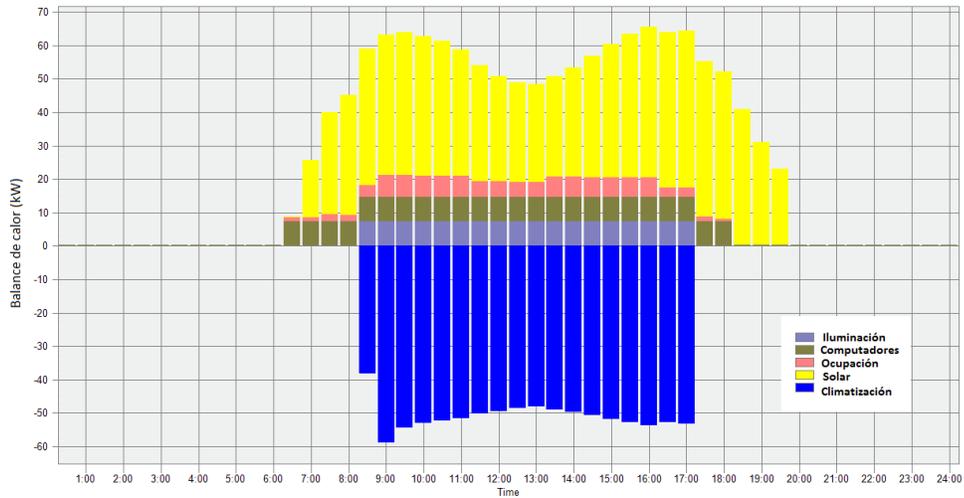


Figura D7: Balance térmico Piso 3 caso base día 15 de enero de 2002

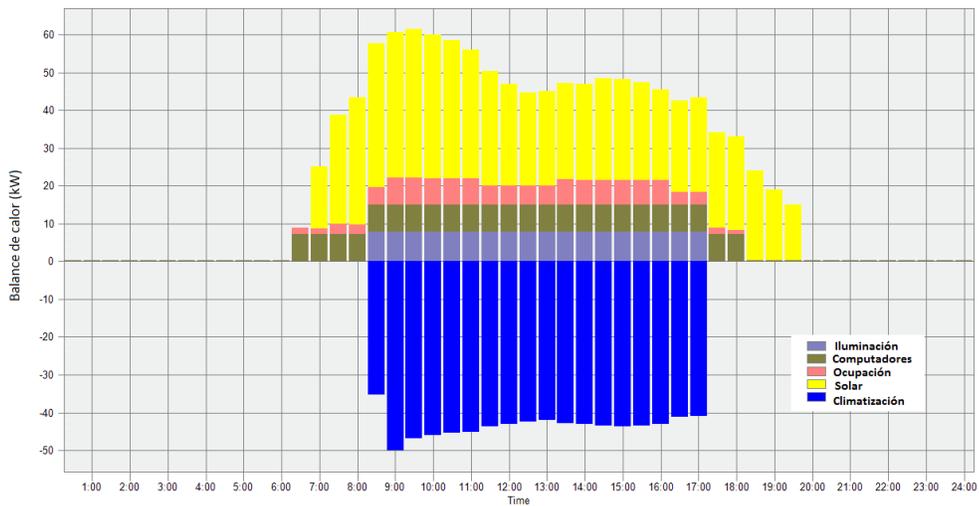


Figura D8: Balance térmico Piso 3 sombreado día 15 de enero de 2002

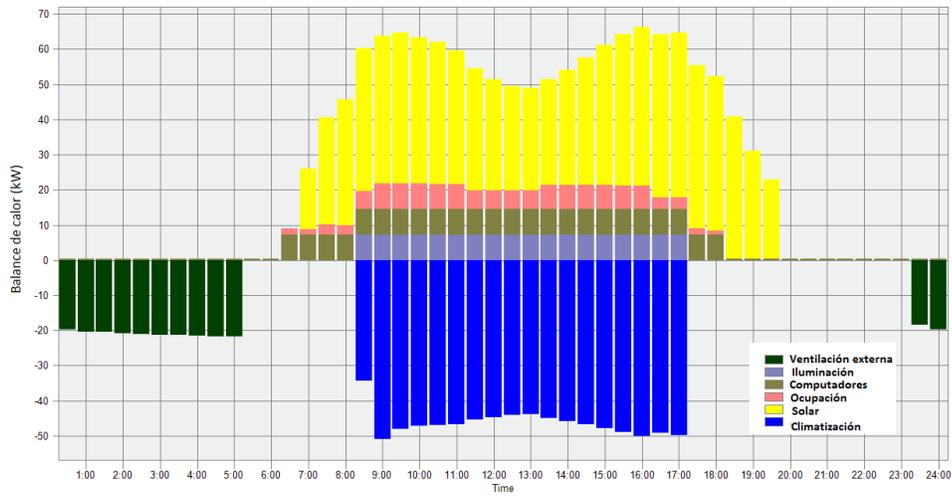


Figura D9: Balance térmico Piso 3 ventilación nocturna día 15 de enero de 2002

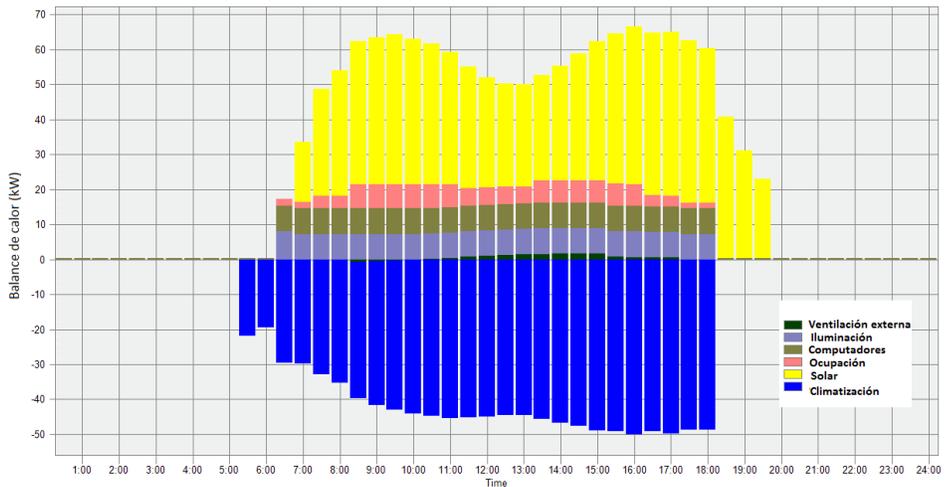


Figura D10: Balance térmico Piso 3 ventilación natural día 15 de enero de 2002

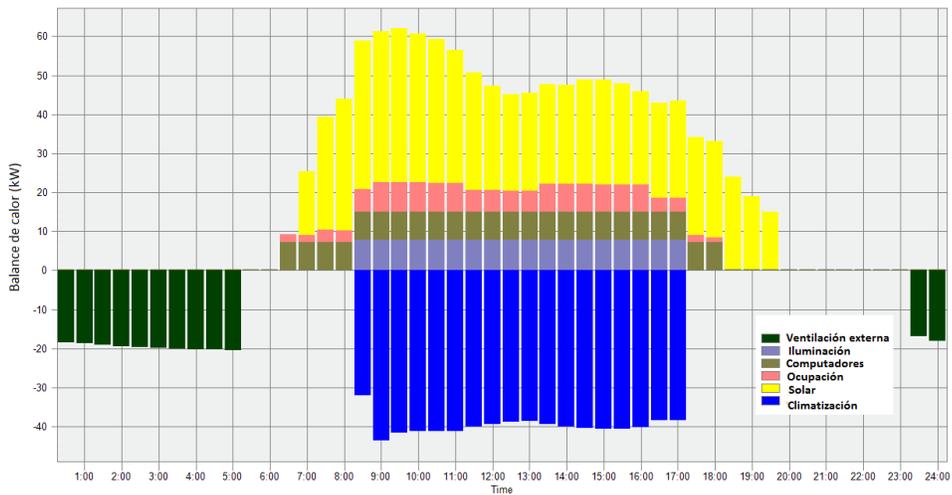


Figura D11: Balance térmico Piso 3 sombreado y ventilación nocturna día 15 de enero de 2002

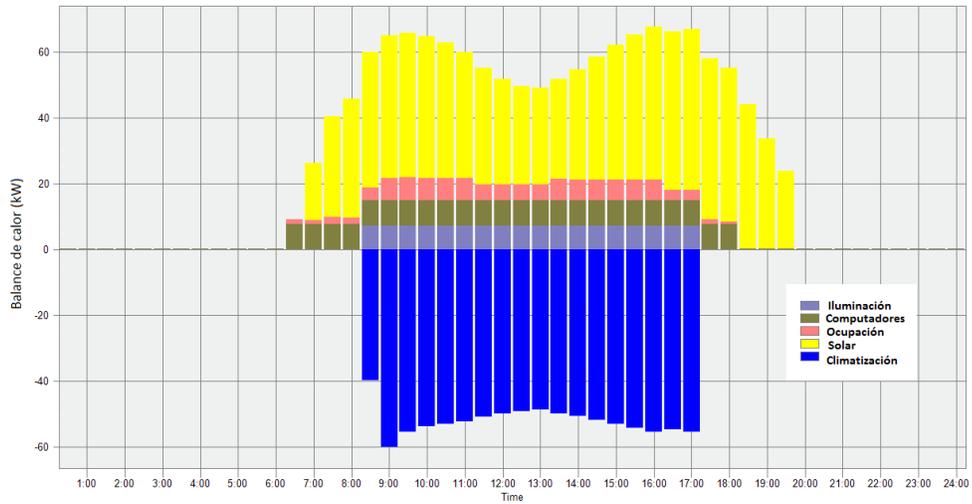


Figura D12: Balance térmico Piso 4 caso base día 15 de enero de 2002

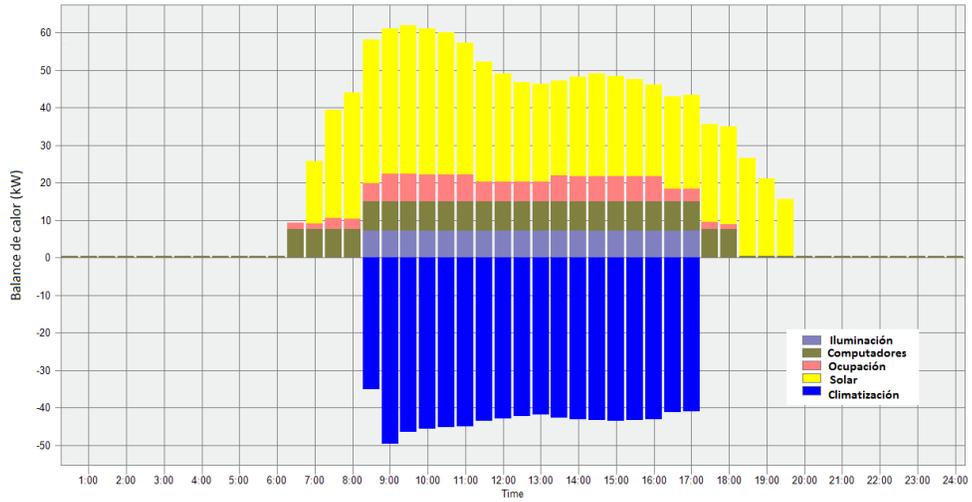


Figura D13: Balance térmico Piso 4 sombreado día 15 de enero de 2002

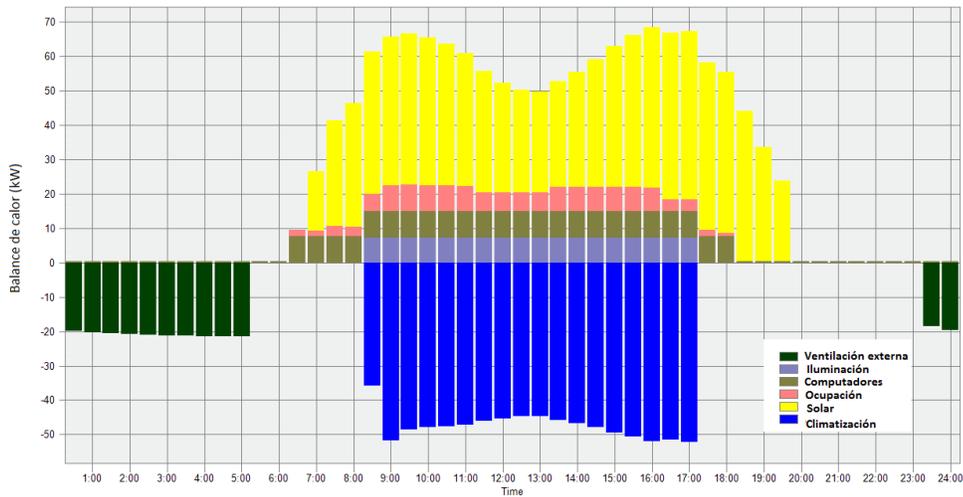


Figura D14: Balance térmico Piso 4 ventilación nocturna día 15 de enero de 2002

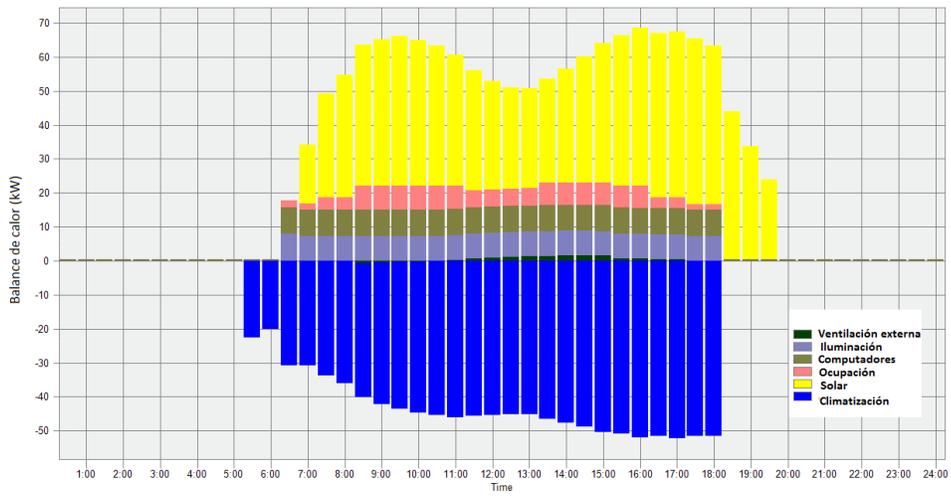


Figura D15: Balance térmico Piso 4 ventilación natural día 15 de enero de 2002

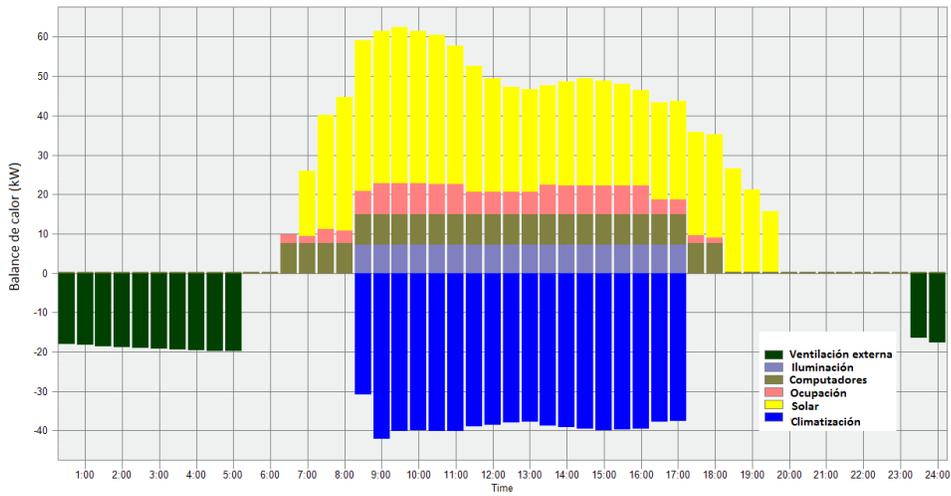


Figura D16: Balance térmico Piso 4 sombreado y ventilación nocturna día 15 de enero de 2002

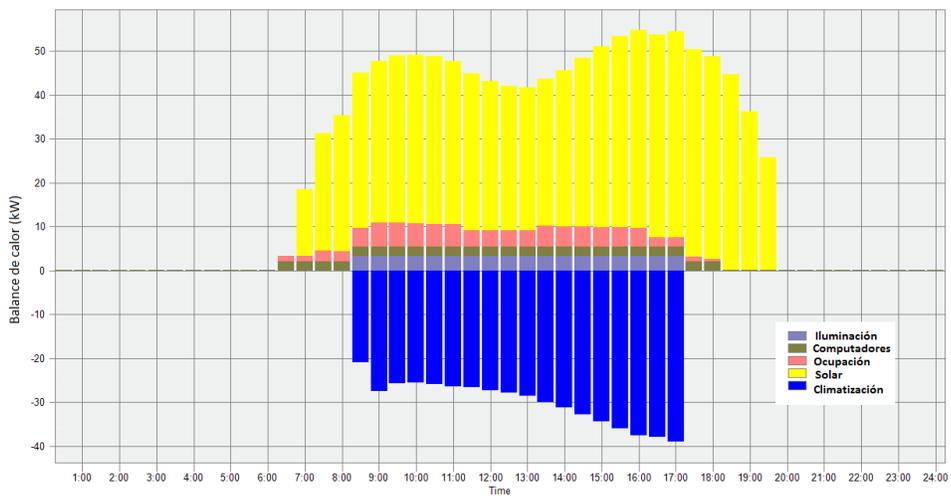


Figura D17: Balance térmico Piso 5 caso base día 15 de enero de 2002

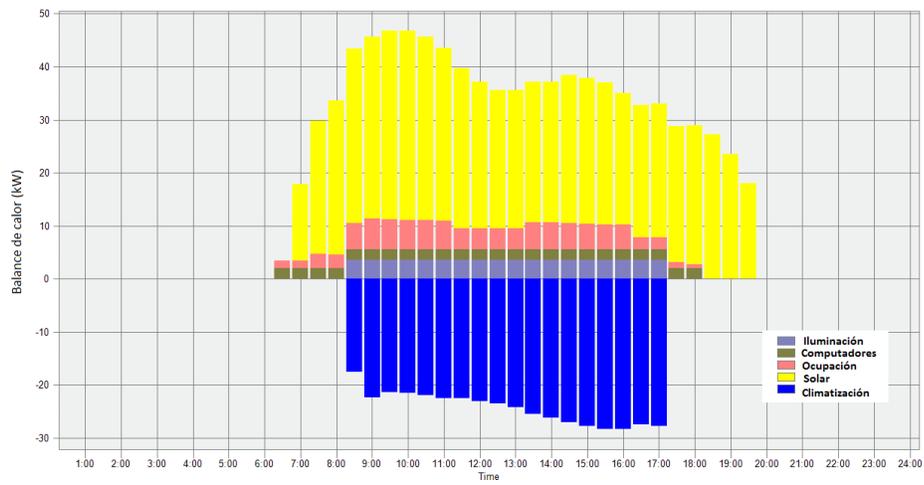


Figura D18: Balance térmico Piso 5 sombreado día 15 de enero de 2002

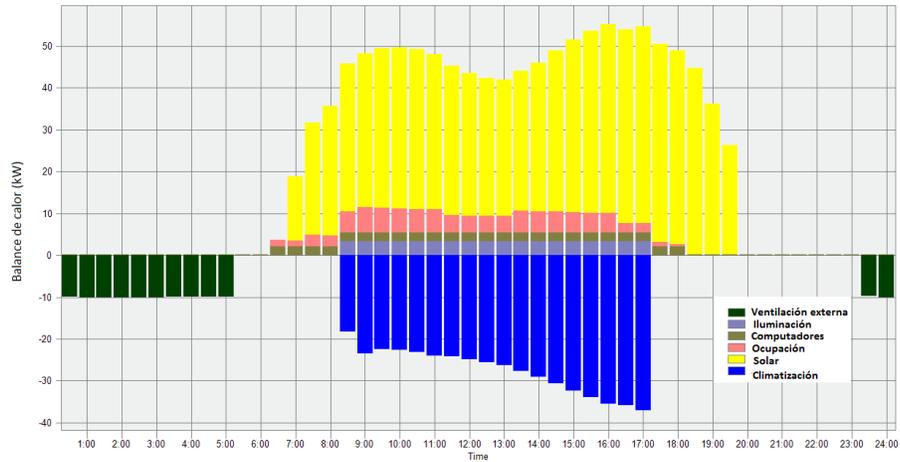


Figura D19: Balance térmico Piso 5 ventilación nocturna día 15 de enero de 2002

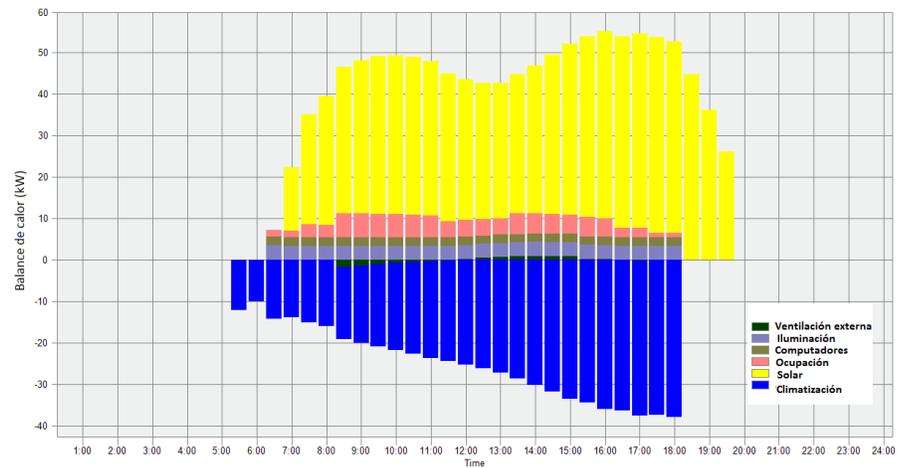


Figura D20: Balance térmico Piso 5 ventilación natural día 15 de enero de 2002

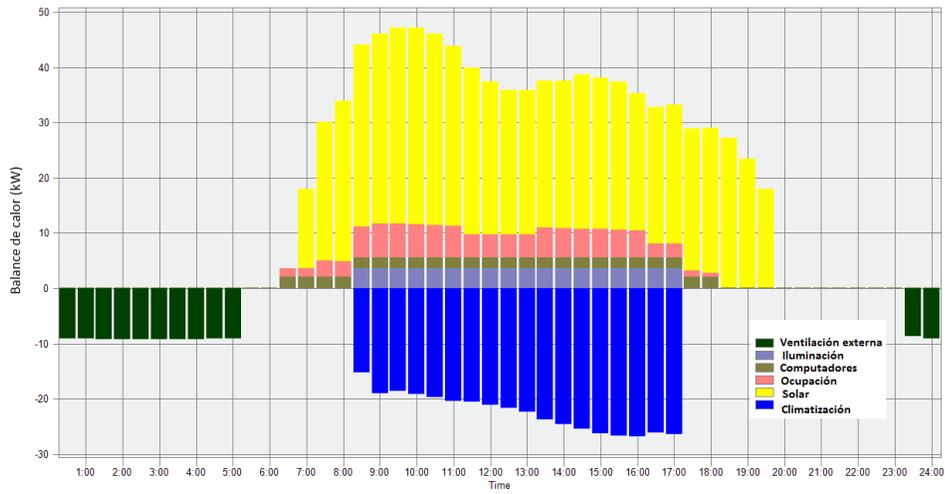


Figura D21: Balance térmico Piso 5 sombreado y ventilación nocturna día 15 de enero de 2002

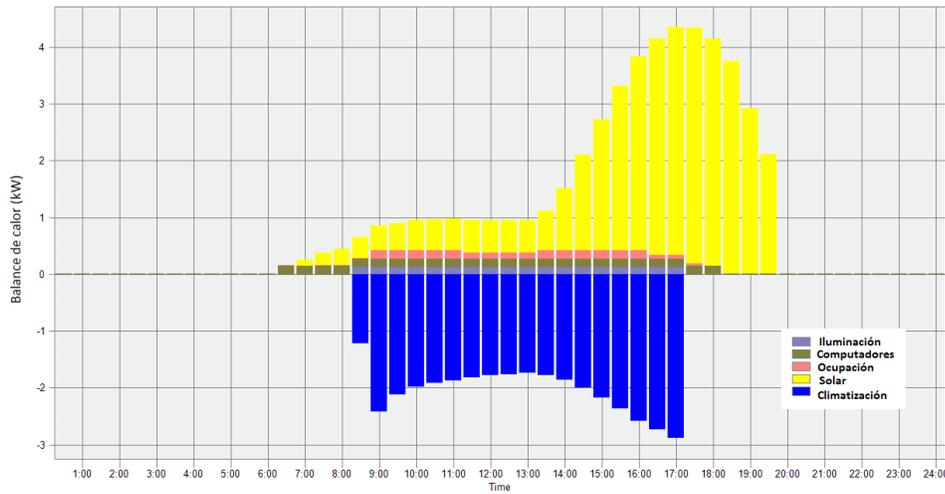


Figura D22: Balance térmico oficina piso 4 sector poniente edificio caso base día 15 de enero de 2002

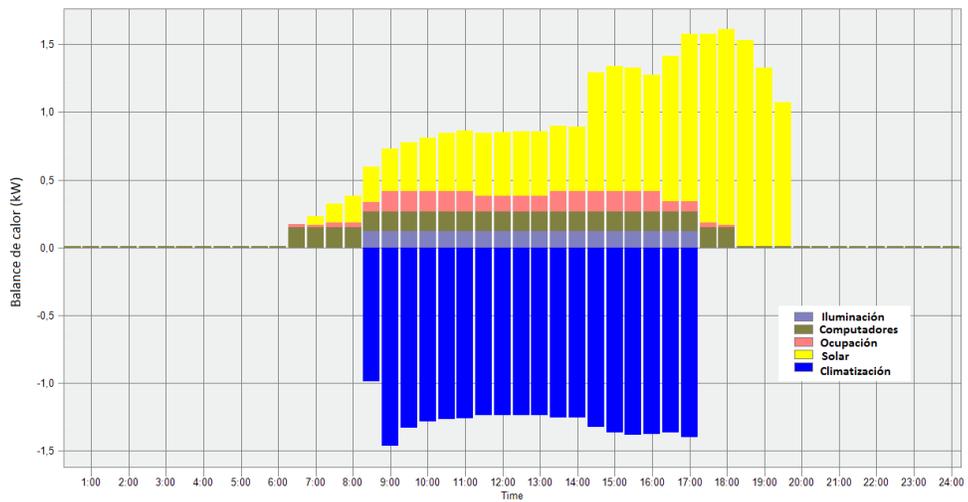


Figura D23: Balance térmico oficina piso 4 sector poniente edificio con sombreado día 15 de enero de 2002

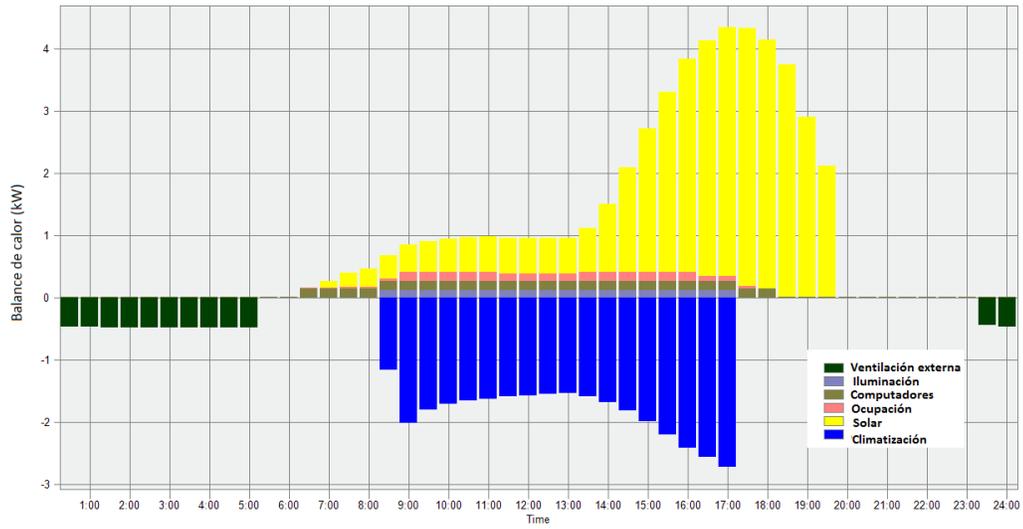


Figura D24: Balance térmico oficina piso 4 sector poniente edificio con ventilación nocturna día 15 de enero de 2002

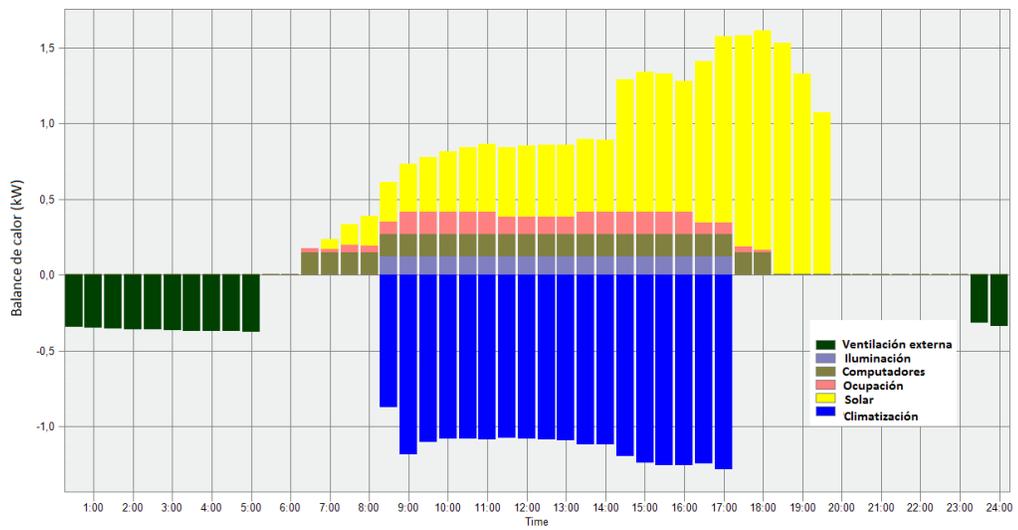


Figura D25: Balance térmico oficina del piso 4 sector poniente edificio con sombreado y ventilación nocturna día 15 de enero de 2002

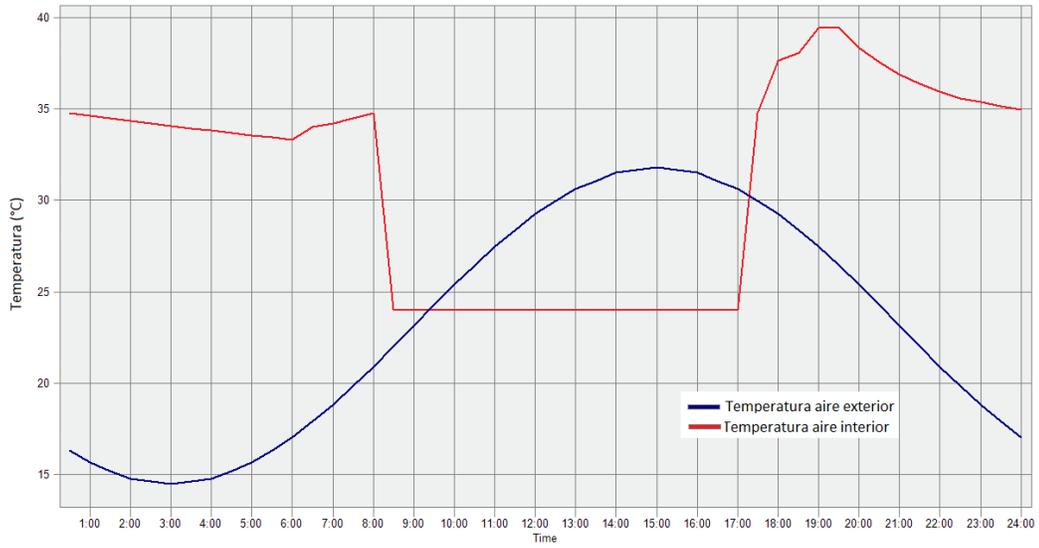


Figura D26: Temperaturas oficina piso 4 sector poniente edificio caso base día 15 de enero de 2002

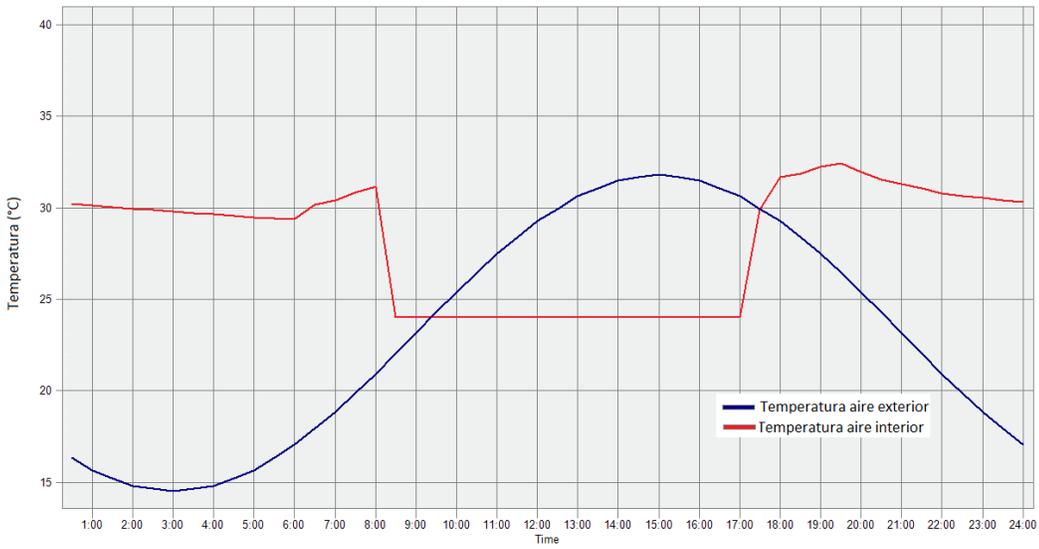


Figura D27: Temperaturas oficina piso 4 sector poniente edificio con sombreado día 15 de enero de 2002

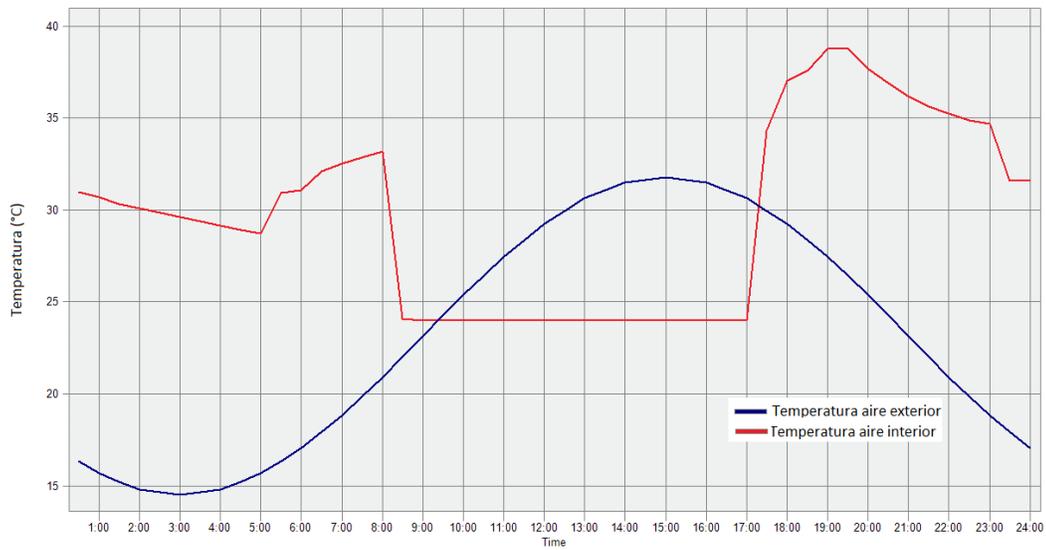


Figura D28: Balance térmico oficina piso 4 sector poniente edificio ventilación nocturna día 15 de enero de 2002

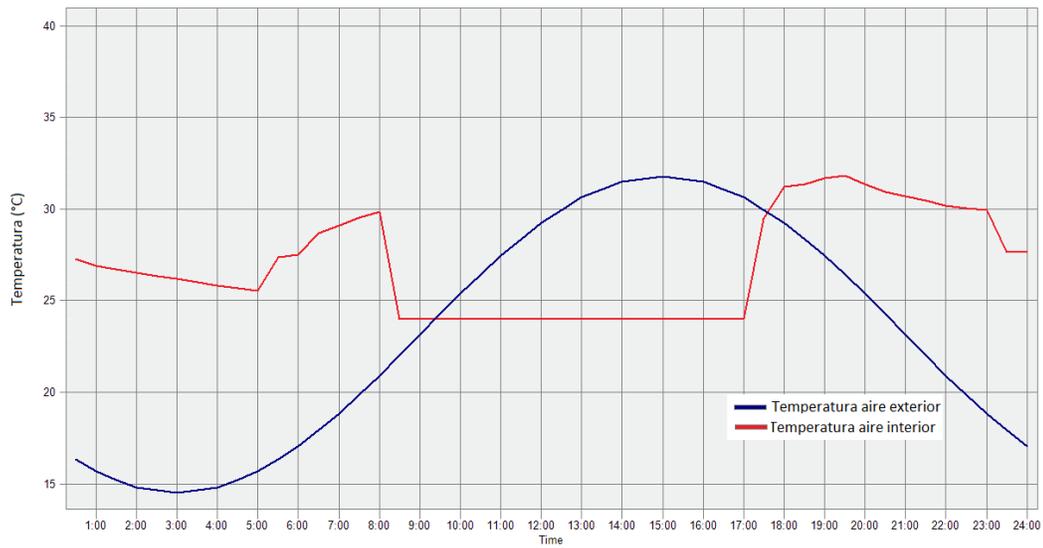


Figura D29: Balance térmico oficina piso 4 sector poniente edificio sombreado y ventilación nocturna día 15 de enero de 2002

ANEXO E

Evaluación Económica de Soluciones

Tabla E1: Análisis económico para el sombreadamiento

Sombreamiento		
Inversión	\$	48.468.821
costo anual	\$	-
ahorro anual	\$	3.961.980
flujo anual	\$	3.961.980
periodo		50 años
tasa dscto		8%
retorno inversión		12,50 años
VAN	-\$	0

Tabla E2: Análisis económico para la fachada ventilada

Fachada Ventilada		
Inversión	\$	2.696.749
costo anual	\$	-
ahorro anual	\$	220.440
flujo anual	\$	220.440
periodo		50 años
tasa dscto		8%
retorno inversión		12,23 años
VAN	-\$	0

Tabla E3: Análisis económico para la ventilación nocturna

Ventilación Nocturna		
Inversión	\$	11.216.540
costo anual	\$	50.688
ahorro anual	\$	967.560
flujo anual	\$	916.872
periodo		50 años
tasa dscto		8%
retorno inversión		12,23 años
VAN	-\$	0

Tabla E4: Análisis económico para el sombreadamiento y ventilación nocturna

SD+VN		
Inversión	\$	63.092.631
costo anual	\$	50.688
ahorro anual	\$	5.208.060
flujo anual	\$	5.157.372
periodo		50 años
tasa dscto		8%
retorno inversión		12,23 años
VAN	\$	0