



UNIVERSIDAD DEL BÍO-BÍO
FACULTAD DE ARQUITECTURA, CONSTRUCCIÓN Y DISEÑO

La temperatura de funcionamiento en edificios de oficina: un potencial de ahorro energético, que no afecta al confort térmico de los ocupantes; dos casos de estudio en Santiago, Chile

TESIS PARA OPTAR AL GRADO DE MAGÍSTER EN HÁBITAT SUSTENTABLE Y EFICIENCIA ENERGÉTICA

AUTOR: Germán Babileck García

PROFESOR GUÍA: Rodrigo Figueroa San Martín

CONCEPCIÓN, 04 de junio de 2020

Resumen

El mundo actualmente experimenta diversos fenómenos climáticos a causa del calentamiento global, el cual se ve potencialmente influenciado por la emisión de gases de efecto invernadero a la atmósfera. Por otro lado, el funcionamiento de edificios representa un tercio de los gases de efecto invernadero que se emiten a la atmósfera y es por esta razón que en muchos gobiernos se pretende reducir el consumo energético de edificaciones y así contribuir al cuidado del medio ambiente.

Más de la mitad del consumo energético de un edificio se debe al funcionamiento de sistemas de climatización, sin embargo, el funcionamiento de dicho sistema va de la mano con la percepción térmica de los ocupantes; por lo que en esta investigación se busca encontrar el potencial de ahorro energético causado por la modificación la temperatura de funcionamiento de los sistemas de climatización, manteniendo el confort térmico de los ocupantes.

Para esto, se han seleccionado dos casos de estudio para ser representados por modelos base de simulación energética mediante el software Design Builder; en total 120 simulaciones fueron realizadas por cada caso. Los resultados indican que un promedio de 12% de energía en climatización puede ser ahorrada a costo cero y manteniendo el confort térmico de los ocupantes.

Palabras clave: Edificios, temperatura de funcionamiento, ocupantes, confort térmico.

Abstract

World currently experiences various climatic phenomena due to global warming, which is potentially influenced by the emission of greenhouse gases into the atmosphere. On the other hand, the operation of buildings represents a third of the greenhouse gases that are emitted into the atmosphere and it is for this reason that in many governments it is intended to reduce the energy consumption of buildings and thus contribute to the care of the environment.

More than half of the energy consumption of a building is due to the operation of air conditioning systems, however, the operation of said system goes hand in hand with the thermal perception of the occupants; therefore, this research seeks to find the energy saving potential resulting from modifying the operating temperature of the air conditioning systems, maintaining their initial thermal comfort level.

For this, two case study has been selected to be represented by energy simulation base models using the Design Builder software; a total of 120 simulations were performed for each case. The results indicate an average of 12% of air conditioned energy can be saved at a zero cost, maintaining the thermal comfort of occupants.

Keywords: Buildings, setpoint temperature, occupants, termal comfort.

Índice de contenido

Resumen	1
Abstract	2
Índice de contenido	3
Índice de tablas	7
Índice de ilustraciones	8
CAPÍTULO 1: Justificación de la investigación	1
1.1 Planteamiento del problema	2
1.2 Hipótesis	5
1.3 Objetivos de la investigación	5
1.3.1 Objetivo general	5
1.3.2 Objetivos específicos	5
CAPÍTULO 2: Marco Teórico	6
1.4 La problemática medioambiental	7
1.5 Consumo energético de edificios a nivel mundial	8
1.6 Discrepancia energética	8
1.7 Consumo energético a nivel nacional	9
1.8 Eficiencia energética	10
1.9 Normativa nacional en eficiencia energética de edificación	11
1.10 Climatización de edificios	13

1.10.1	Temperatura de funcionamiento	13
1.11	Campaña “sin corbata ni chaqueta en verano” en el mundo	15
1.11.1	Japón	15
1.11.2	Corea del Sur	16
1.11.3	España	16
1.11.4	Chile	17
1.1	Confort térmico	17
1.1.1	Enfoque cuantitativo	18
1.1.2	Enfoque cualitativo	21
1.2	Simulación energética	23
1.2.1	DOE-2	24
1.2.2	EnergyPlus	24
1.2.3	TRNSYS	24
1.2.4	ESP-r	24
CAPÍTULO 3: Marco metodológico		26
1.4	Recolección de datos	27
1.5	Área de estudio	27
1.6	Identificación de los casos de estudio	30
1.6.1	Edificio M	30
1.6.2	Edificio P	31

1.7	Metodología	32
1.8	Modelo base de simulación, edificio M	35
1.8.1	Datos de envolvente	35
1.8.2	Cargas, equipos y ocupación	36
1.8.3	Control solar	37
1.9	Modelo base de simulación, edificio P	38
1.9.1	Datos de envolvente	38
1.9.2	Cargas, equipos y ocupación	39
1.9.3	Control solar	40
	CAPÍTULO 4: Resultados y discusiones	41
1.1	Resultados	42
1.1.1	Edificio M: Resultados de simulación inicial de caso base	42
1.1.2	Edificio P: Resultados de simulación inicial de caso base	44
1.1.3	Resultados de la simulación paramétrica (modificación de temperaturas de setpoint)	46
1.2	Discusión	48
	CAPÍTULO 5: Conclusiones	50
	Conclusiones	51
	Bibliografía	53
1	ANEXOS	63
1.1	ANEXO A: Ilustración gráfica, modelo base de simulación Edificio M	64
1.2	ANEXO B: Ilustración gráfica, modelo base de simulación Edificio P	66

1.3	ANEXO C: Resultados de simulación inicial: Caso Base	68
1.3.1	Edificio M	68
1.3.2	Edificio P	70
1.4	ANEXO D: Resultados Simulación: Modificación temperatura de setpoint	72
1.4.1	Edificio M	72
1.4.2	Edificio P	76

Índice de tablas

Tabla 1. Estudios de ahorros energéticos obtenidos por modificar la temperatura de calefacción y/o refrigeración.	3
Tabla 2. Presupuestos otorgados por año para el Programa País Eficiencia Energética	12
Tabla 3. Escalera de siete votos de Fanger (1970)	18
Tabla 4. Individualización de los casos de estudio	32
Tabla 5. Valores de teóricos de transmitancia térmica ingresados para elementos de la envolvente.	35
Tabla 6. Valores CLO para vestimenta empleada en invierno	36
Tabla 7. Valores CLO para vestimenta empleada en verano	36
Tabla 8. Valores de teóricos de transmitancia térmica ingresados para elementos de la envolvente.	38
Tabla 9. Valores CLO para vestimenta empleada en invierno	39
Tabla 10. Valores CLO para vestimenta empleada en verano	39
Tabla 11. Resultados anuales de demanda energética y confort térmico del Edificio M	42
Tabla 12. Resultados anuales de demanda energética y confort térmico del Edificio P	44
Tabla 13. Valores de tiempo en confort y ahorro en demanda energética obtenidos por la modificación de temperaturas de setpoint, Edificio M	47
Tabla 14. Valores de tiempo en confort y ahorro en demanda energética obtenidos por la modificación de temperaturas de setpoint, Edificio P	47
Tabla 15. Valores de demanda energética y confort térmico mensuales obtenidos de la simulación inicial, Edificio M	68
Tabla 16. Valores de ambiente interior y exterior obtenidos en simulación inicial, Edificio M	69
Tabla 17. Valores de demanda energética y confort térmico mensuales obtenidos de la simulación inicial, Edificio P	70
Tabla 18. Valores de ambiente interior y exterior obtenidos en simulación inicial, Edificio P	71
Tabla 19. Valores de demanda energética y confort térmico obtenidos por simulación paramétrica, Edificio M	72
Tabla 20. Valores de demanda energética y confort térmico obtenidos por simulación paramétrica, Edificio P	76

Índice de ilustraciones

Ilustración 1. Rangos aceptables de temperatura operativa y humedad, de acuerdo al Método Gráfico de ASHRAE 55.....	21
Ilustración 2. Gráfico histórico de temperaturas anuales en Santiago. Fuente: climate-data.org.....	28
Ilustración 3. Precipitaciones históricas anuales en Santiago. Fuente: climate-data.org	29
Ilustración 4. Radiación solar global y directa de Santiago. Fuente: www.designbuilder.cl	29
Ilustración 5. Condiciones de cielo históricas para Santiago. Fuente: climate-data.org	30
Ilustración 6. Caso de estudio Edificio M.....	31
Ilustración 7. Caso de estudio Edificio P	32
Ilustración 8. Demanda energética mensual en calefacción y refrigeración, Edificio M.....	43
Ilustración 9. Gráfico de temperaturas promedio mensual operativa y exterior.	43
Ilustración 10. Demanda energética mensual en calefacción y refrigeración, Edificio P.	45
Ilustración 11. Gráfico de temperaturas promedio mensual operativa y exterior.	45
Ilustración 12. Vista general del modelo base de simulación, Edificio M	64
Ilustración 13. Vista general del modelo base de simulación, Edificio M	64
Ilustración 14. Elevación lateral del modelo base de simulación, Edificio M.....	65
Ilustración 15. Vista en planta del modelo base de simulación, Edificio M	65
Ilustración 16. Vista general del modelo base de simulación, Edificio P.....	66
Ilustración 17. Vista general del modelo base de simulación, Edificio P.....	66
Ilustración 18. Elevación lateral del modelo base de simulación, Edificio P	67
Ilustración 19. Vista en planta del modelo base de simulación, Edificio P	67

CAPÍTULO 1: Justificación de la investigación

1 Planteamiento del problema

Debido a la gran problemática causada por el calentamiento global, se ha producido una tendencia en la reducción del consumo energético mundial (Azar y Menassa 2014). Esto porque grandes cantidades de consumo se asocian a una gran cantidad de emisiones de dióxido de carbono, el cual es el principal causante del efecto invernadero (Ji, Lomas y Cook 2009). En las últimas décadas, se ha puesto en énfasis reducir la demanda energética de las edificaciones (Herrando et al. 2016; Frank y Kuchen 2016), debido a que estas son responsables del 40% de la energía consumida en el mundo (UNEP 2012).

Con el fin de reducir las demandas energéticas y emisiones por parte de edificaciones, en distintos países se ha optado por desarrollar iniciativas y políticas. Algunos ejemplos de esto, pueden ser: la campaña “Optimising Power @ Work” (EED 2015) de Irlanda, que llama a una toma de conciencia masiva en edificios públicos; la iniciativa “Klimaaktiv” (MFRA 2019) de Austria, que promueve el uso de tecnologías y servicios eficientes para edificios; el plan “Energiewende” en Alemania, que entre otras acciones, pretende disminuir la demanda de energía primaria en edificios en un 80% hasta el 2050 (MFRE 2019) y el “Plan Nacional de Eficiencia Energética” (MIEM 2015) de Uruguay. También se han establecido tratados internacionales tales como el “Kyoto Protocol” de las Naciones Unidas, el “Energy Performance of Buildings” de la Unión Europea o el “Climate Change Levy” del Reino Unido, que procuran principalmente la reducción de emisiones contaminantes a la atmósfera. Además, en el último tiempo se han ido implementando diversas certificaciones de sustentabilidad para edificios, encontrando entre las más destacadas LEED en Estados Unidos, BREEAM en Inglaterra, DGNB System en Alemania y CASBEE en Japón, GREENSTAR en Australia, entre otros (CDT 2015).

Chile también se ha visto involucrado en un constante aumento en el consumo energético, desde el año 1991 hasta el 2011, el consumo final de energía ha aumentado en un 122% ; y desde 2011 hasta 2017 este ha incrementado en un 14% (MINERGIA 1992; 2011; CNE 2018). Datos del año 2018, revelan que la edificación comercial, residencial y pública representó el 22% del consumo final de energía del país en 2017 (CNE 2018) y se calcula que los edificios necesitan tres veces más energía que aquellos situados en países desarrollados (CORFO 2016).

Por otra parte, el consumo energético de un edificio está determinado por distintos factores, entre los cuales están: su envolvente, el clima, servicios básicos, hábitos de los usuarios y sistemas de calefacción, ventilación refrigeración (Chen et al. 2015). Por lo general, estos sistemas de calefacción, refrigeración y ventilación (HVAC) consumen grandes cantidades de energía para alcanzar y mantener un ambiente

CAPÍTULO 1: Justificación de la investigación

interior confortable para sus ocupantes (Hoyt et al. 2009). De acuerdo a Shahnazari et al. (2018) y Yu, Ergan y Dedemen (2019), estos sistemas representan entre el 40 y 50% del consumo energético total de un edificio; y es por esta razón que se ha visto un gran potencial de ahorro energético en los sistemas HVAC, principalmente en calefacción y refrigeración.

Diferentes estudios evidencian la posibilidad de obtener ahorros energéticos mediante un ajuste óptimo a la temperatura en la que funcionan los sistemas de calefacción y refrigeración, la importancia de estos estudios radica en que existe un potencial de ahorro. Estos estudios se basaron en softwares de simulación energética para obtener resultados de demanda energética. A continuación, en la Tabla 1 se muestran investigaciones realizadas en distintos países, en donde los investigadores han evaluado el ahorro energético provocado por el incremento de la temperatura de funcionamiento de refrigeración, la disminución de la temperatura de funcionamiento de calefacción, o bien, ambas juntas.

Tabla 1. Estudios de ahorros energéticos obtenidos por modificar la temperatura de calefacción y/o refrigeración.

Autores	País de estudio	Tipo	Ajuste T° calefacción	Ahorro	Ajuste T° refrigeración	Ahorro
(Hoyt et al. 2009)	EEUU	Oficina	21,5 a 20,5	7-15%	24 a 25	7-14%
(Hoyt et al. 2009)	EEUU	Oficina	21,5 a 17,5	17-35%	24 a 28	35-45%
(Spyropoulos y Balaras 2011)	Grecia	Sucursal	22 a 20	45%	27 a 26	45%
(PNNL 2012)	EEUU	Oficina	21,6 a 20,6	9-20%	22,8 a 23,8	9-20%
(Kazanci y Olesen 2013)	España	Vivienda	21 a 20	16%	23 a 25	23%
(Kazanci y Olesen 2013)	Dinamarca	Vivienda	21 a 20	12%	25 a 26	21%
(Ghahramani et al. 2015)	EEUU	Oficina	-	-	22,5 a 25,5	17%
(Hoyt, Arens y Zhang 2015)	EEUU	Oficina	-	-	22,2 a 25	27%
(Ghahramani et al. 2016)	EEUU	Oficina	-	-	22,5 a 25,5	16%
(Ghahramani, Dutta y Becerik-Gerber 2018)	EEUU	Oficina	-	-	22,5 a 25,5	40%

Como se puede apreciar en las investigaciones de la Tabla 1, el ajuste de la temperatura de funcionamiento de calefacción y/o refrigeración permitiría obtener ahorros energéticos, los que pueden potenciarse aumentando la amplitud de grados (°C) de la temperatura de funcionamiento, pudiendo en algunos casos alcanzar ahorros de más del 40% de energía sólo modificando 2°C. Sin embargo, a pesar de obtener resultados positivos en cuanto al ahorro energético, muchos investigadores olvidan evaluar la percepción térmica de los ocupantes. Papadopoulos et al. (2019) indican que son escasos los estudios que evalúan

CAPÍTULO 1: Justificación de la investigación

estos ahorros energéticos y integren a la vez variables importantes como mantener el nivel de confort térmico de los ocupantes.

Aún así, investigaciones como la de Zhang et al. (2017) y Papadopoulos et al. (2019) sí integran esta variable y muestran que la modificación de la temperatura de funcionamiento de calefacción y refrigeración, no necesariamente influye a la sensación térmica de los ocupantes. El primero, realizó su investigación en Australia y encontró que al aumentar la temperatura de refrigeración de 22 a 25° C, no se producían cambios en el nivel de sensación térmica de los ocupantes; mientras que el segundo realizó su investigación en San Francisco y California (Estados Unidos), y encontró que se podía ahorrar hasta un 60% en calefacción y refrigeración sin comprometer el confort térmico de los ocupantes.

Es por esto la importancia de aportar conocimiento para el momento de seleccionar temperaturas de funcionamiento que sean óptimas en términos de demanda energética y confort térmico, de esta forma se estaría contribuyendo a que los edificios consuman menos energía y a la vez, reducir sus emisiones contaminantes.

En esta investigación, se utilizó un software de simulación energética para determinar el confort térmico de ocupantes y también el ahorro energético obtenido al ajustar la temperatura de calefacción y refrigeración de dos edificios de oficina en Santiago de Chile. Para esto, se han modificado dichas temperaturas en -5°C para el caso de calefacción y +5°C para el caso de refrigeración, estudiando segmentos cada 0,5 °C.

1.1 Hipótesis

De acuerdo a la literatura estudiada, los ahorros energéticos alcanzados por modificar la temperatura de climatización sin perjudicar el confort térmico de usuarios, son en promedio de 7 a 20%. Es por esto que se ha llegado a la siguiente hipótesis:

En edificios de oficina en Santiago, ajustar la temperatura de funcionamiento del sistema de climatización, permite ahorrar hasta un 20% en energía de calefacción y refrigeración, sin alterar el confort térmico de los ocupantes.

1.2 Objetivos de la investigación

1.2.1 Objetivo general

Evaluar la modificación de la temperatura de funcionamiento de calefacción y refrigeración de los casos estudiados, mediante simulación, para determinar el máximo potencial de ahorro energético sin alterar el confort térmico de los ocupantes.

1.2.2 Objetivos específicos

1. Clasificar la información de los casos de estudio, para representarlos en un modelo de simulación energética.
2. Definir método de evaluación y condiciones de confort térmico para calificar los resultados obtenidos.
3. Calcular demanda energética y confort térmico de caso base y casos modificados, mediante simulación energética de casos de estudio.
4. Analizar comparativamente los casos modificados, para establecer diferencias con respecto al caso base.
5. Evaluar ahorro energético y confort térmico, con el fin de determinar qué caso es el más óptimo.

CAPÍTULO 2: Marco Teórico

1.3 La problemática medioambiental

En los últimos tiempos el planeta se ha visto enfrentado a una serie de fenómenos naturales producto del incremento de los niveles de gases de efecto invernadero, los cuales absorben la radiación emitida por la superficie del planeta, provocando un aumento en la temperatura global (Garreaud 2011). En la última década, este incremento de temperatura ha sido, en promedio, de 0,74 K y se proyecta que en la próxima década pudiese aumentar entre 1,1 a 6,4 K. Mucha evidencia sugiere que, en especial, la acumulación de dióxido de carbono (CO₂) en la atmósfera es la principal causa del calentamiento global (Ji, Lomas y Cook 2009).

Según datos del 2006, la concentración de CO₂ ha alcanzado el nivel más alto de los últimos 650.000 años, y a la vez, el calentamiento global ha desencadenado una serie de eventos anormales, tales como: rápido derretimiento de glaciares, desestabilización de placas de hielo, mayor cantidad de climas extremos, aumento del nivel del mar, entre otros (Omenn et al. 2006). Por otro lado, se suma la explotación de recursos naturales e incremento de demanda energética a nivel mundial, resultando en una escasez de combustibles fósiles y también en un alza en los precios de estos mismos (USEIA 2012) y también en una alteración de ecosistemas, poniendo en riesgo la vida humana (Von Borgstede, Andersson y Johnsson 2013).

La crisis energética junto a la problemática medioambiental, han motivado a los países a reducir sus consumos y emisiones de carbono (Azar y Menassa 2014), ya que a menudo, las emisiones de CO₂ se asocian a grandes demandas energéticas; siendo los edificios uno de los mayores contribuidores CO₂ debido a su alto consumo de energía a nivel mundial (Ji, Lomas y Cook 2009).

Es por esto que en los últimos años se ha puesto mucha atención en la demanda y uso de energía por parte de las edificaciones (Delzende et al. 2017; Allouhi et al. 2015). Incluso, hace más de cuarenta años que en algunos países ya se han establecido regulaciones sobre la demanda de energía en edificaciones, siendo obligatoria en algunos casos la certificación energética de las edificaciones de nueva construcción (MINVU 2006).

1.4 Consumo energético de edificios a nivel mundial

En Diciembre de 2015, como resultado de la vigésimo primera Conferencia de las Partes (COP21) de la Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático, se adoptó un acuerdo internacional conocido como el “Acuerdo de París”; el cual ya ha sido firmado por 195 países. Este acuerdo busca principalmente evitar el futuro incremento de la temperatura global, y para lograrlo se han establecido límites y objetivos. Según las Directivas Europeas, para alcanzar estos objetivos es fundamental disminuir el impacto ambiental de las edificaciones e implementar su eficiencia energética (Pajek y Košir 2017).

De acuerdo al reporte emitido por el Programa de las Naciones Unidas para el Medio Ambiente (UNEP 2012), los edificios representan el 40% de consumo de energía global y 38% en emisión global de gases verdes; sin embargo, estos tienen un gran potencial de ahorro, ya que se calcula que pueden reducir (a bajo costo) entre el 35 y 50% de consumo energético y también reducir un 35% las emisiones de gases verdes.

El gran consumo energético por parte de las edificaciones se ve reflejado en los distintos países del mundo. Por ejemplo, en Australia, los edificios representan el 58% y 34% de consumo final eléctrico y de gas natural, respectivamente (Tam, Almeida y Le 2018). En la India e Irán, el sector de la edificación figura como el 35% del total de consumo energético (Paone 2018), (Yousefi, Gholipour y Yan 2017). En China, este sector corresponde al 37% del consumo total (Ji, Lomas y Cook 2009). En Estados Unidos y la Unión Europea, este valor asciende a 40% (EIA 2019) (Parlamento Europeo 2010), y en el Reino Unido aumenta a 43% (Hashemi et al. 2017). Finalmente, en Brasil alcanza un 50% (PROCEL 2006).

1.5 Discrepancia energética

Muchos edificios con altas tecnologías en eficiencia energética no han mostrado desempeñarse tan bien como se proyectó en su respectiva etapa de diseño (Hashemi et al. 2017), generando una discrepancia energética entre lo diseñado y lo real, la cual últimamente ha sido denominada por diversos autores como “performance gap” (van Dronkelaar et al. 2016).

Este fenómeno se ha visto en muchas edificaciones, encontrando casos con valores de consumo que quintuplican el previsto en la etapa de diseño (Carbon Trust 2011). Gul y Patidar (2019) indican que el valor de performance gap por lo general es de un 30 %. Esto concuerda con estudios realizados en edificios de Italia (Tronchin y Fabbri 2010), Dinamarca (Petersen y Hviid 2012) y España (Herrando et al. 2016),

donde se encontró una discrepancia energética de 30% entre el consumo previsto y el actual. En Australia, Calderone (2011) encontró una discrepancia de 14% en el consumo edificios de oficina. La base de datos CarbonBuzz, indica que “los edificios consumen entre 1,5 y 2,5 veces los valores estimados” (CarbonBuzz 2019); y específicamente para edificios de oficina, este valor es de 40%.

De manera similar, se ha visto performance gap en casos de edificios que cuentan con certificaciones energéticas. En estados Unidos, Scofield (2013) indica que algunos edificios de oficina en Nueva York con certificación LEED consumen más energía que los edificios de oficina convencionales; mientras que Yan et al. (2015) encontró una desviación de 18% en el consumo energético de 62 edificios con certificación LEED.

1.6 Consumo energético a nivel nacional

Chile es un país energéticamente dependiente, de acuerdo al Balance Nacional de Energía, más del 70% de la energía que se utiliza es importada (CNE 2018). Durante el año 2017, el total de energía producida, importada y exportada alcanzó los 336.480 teracalorías. El principal aporte viene dado por los combustibles fósiles (petróleo crudo, gas natural y carbón) representando un 68%, luego biomasa (24%) y hidroelectricidad, solar y eólica (8%). Ese mismo año, el consumo energético total del país alcanzó 288.901 teracalorías, lo cual representa un 14% de variación si se compara con las 252.958 teracalorías consumidas durante el año 2007 y 136% si se compara con el valor del año 1991 de 122.464 teracalorías. (MINERGIA 1992).

De la energía que se consumió en 2017, 30% se debe a petróleo diésel, 21% a electricidad, 13% biomasa y 13% gasolina, entre otros; revelando la gran dependencia del país frente a combustibles fósiles. Esta energía se destinó a los distintos sectores energéticos del país. Los sectores que más energía demandaron el 2017 son Industrial Minero (39%), seguido por Transporte (36%) y luego el sector Público, Comercial y Residencial (juntos 22%) (CNE 2018); este último sector es el que contiene a las edificaciones. Es importante mencionar el alto costo de la electricidad en Chile, el cual está por sobre el promedio global y duplica al de Perú; y además es el país de la región que más ha incrementado sus emisiones de CO₂ últimamente (Troncoso 2015).

1.7 Eficiencia energética

La eficiencia energética se define como el conjunto de acciones que permiten optimizar la relación entre la cantidad de energía consumida y los servicios y/o productos finales obtenidos, esto quiere decir que, pudiendo utilizar los mismos recursos energéticos o incluso menores recursos se puede llegar a producir más bienes y servicios. Desde la Ley de Política Regulatoria de Servicios Públicos de 1978, la eficiencia energética es un objetivo de las intervenciones públicas. Estados Unidos y en particular en la Unión Europea, han prestado bastante atención recientemente para llevar a cabo este tipo de intervenciones con el fin de mitigar el calentamiento global. Las medidas de política incluyen regulaciones a nivel técnico y la introducción de certificados de eficiencia con el fin de obligar a los servicios públicos y las empresas a invertir en la conservación (Wirl, 2015). Comprender el comportamiento de los edificios a nivel general es necesario para poder crear una política de planificación de actuación de energías y crear un modelo estratégico para la mejora de éstos, ya que los edificios residenciales y comerciales juegan un rol importante en la reducción de carbono en la atmósfera (Paone 2018).

De acuerdo a Troncoso (2015), en Chile “por cada \$1.000 que se gasta en energía, sólo \$350 hacen un trabajo útil y el resto se pierde en contaminación, fugas térmicas, desgaste, iluminaciones y calefacciones inútiles” lo cual refleja una ineficiencia energética por parte de las edificaciones. Otro dato importante es que muchos de los edificios no residenciales de Santiago, Chile; se basan en muros cortinas (fachadas transparentes), los cuales no precisamente se adecuan al clima de esta ciudad, y se basan más en temas estéticos para obtener una aprobación o estándar de progreso económico (Vásquez, Dalencon y Encinas 2015).

De acuerdo al reporte de la Corporación del Desarrollo Tecnológico (CDT 2015), la construcción de edificios sustentables ha ido en aumento, influenciada por sistemas de certificación energética de carácter nacional e internacional como la Certificación Edificios Sustentable (CES) y LEED respectivamente, siendo esta última la más frecuentada. Datos del Green Building Council (USGBC 2019) revelan que en Chile 162 edificios cuentan con certificación LEED y 149 están en proceso de certificación. Sólo en Santiago se concentra el 71% (115) de edificios con esta certificación. Por otro lado, la certificación CES está presente sólo en 30 edificios a lo largo del país (CES 2019).

La construcción de edificios de oficina ha manifestado un alza en Chile, con un total de 8.9 millones de metros cuadrados, representando aproximadamente el 12,75% de el total de área construida entre los

años 2012 y 2015 (INE 2015). La mayoría de proyectos actualmente desarrollados por el gobierno chileno son oficinas y además la mayoría de estos están ubicados en Santiago (BIP 2015).

1.8 Normativa nacional en eficiencia energética de edificación

Como iniciativa para reducir el consumo energético y emisiones, el Ministerio de Vivienda y Urbanismo (MINVU) implementó modificaciones a la Ordenanza General de Urbanismo y Construcciones (OGUC), denominadas “Reglamentación Térmica”, destinada sólo a edificación residencial. En su primera etapa (año 2000), se establecieron requisitos de aislación térmica inicialmente para techumbre y posteriormente en su segunda etapa (año 2007), se estableció para pisos ventilados, muros exteriores y ventanas. Existe una tercera etapa referida a certificación energética de edificaciones, la cual aun no entra en vigencia (Blender 2016).

La Reglamentación Térmica ha sido criticada por su baja exigencia, no obstante, debido a la contaminación del aire en algunas ciudades, han emergido Planes de Descontaminación Ambiental que integran, entre otras cosas, un nivel de aislación más estricto para la envolvente de viviendas (Blender 2016). De todas formas, prontamente la Reglamentación Térmica se modificará integrando una mayor exigencia que la actual (León 2018).

El primer antecedente de eficiencia energética en Chile se dio el año 2005. Aquí la Comisión Nacional de Energía, la cual dependía del Ministerio de Economía, crea el Programa País Eficiencia Energética (PPEE), con el propósito de impulsar una cultura de eficiencia en el uso de la energía en Chile. Una de las funciones del PPEE fue establecer las bases institucionales y el marco regulatorio para la Eficiencia Energética en Chile. Además, este organismo ha estimado que a escala general se puede lograr un 1,5% anual de mejoramiento en la eficiencia energética en Chile, meta que se busca alcanzar interviniendo en los principales sectores de energéticos ya nombrados en el apartado 2.4, presentando el Sector Público un gran potencial de ahorro energético. La intervención considera una serie de acciones orientadas a la regulación, fomento, difusión y educación en esta materia.

El PPEE fue sometido a una revisión de pares por parte del Foro de Cooperación Económica Asia-Pacífico (APEC) y su desempeño fue evaluado de manera favorable (APEC 2009). El desempeño favorable de este programa también se pudo ver reflejado en el constante aumento de los presupuestos en los años siguientes. En 2006 el PPEE partió con un presupuesto de \$566.500.000 pesos chilenos. Al año siguiente (2007) este aumentó a \$1.454.000.000 pesos chilenos, en 2008 incrementó a \$6.485.207.000 pesos

chilenos, en 2009 a \$19.414.863.000 y finalmente al año 2010 alcanzó los \$30.000.000.000 pesos chilenos (CEPAL 2011) (ver Tabla 2)

Tabla 2. Presupuestos otorgados por año para el Programa País Eficiencia Energética

Año	Presupuesto (pesos chilenos)	Presupuesto (dólares)
2006	\$566.500.000	\$1.100.000
2007	\$1.454.000.000	\$2.900.000
2008	\$6.485.207.000	\$13.000.000
2009	\$19.414.863.000	\$39.000.000
2010	\$30.000.000.000	\$60.000.000

En Febrero de 2010, se crea el Ministerio de Energía, creando dos líneas para la regulación y ejecución de las actividades en eficiencia energética, estas son la División de Eficiencia Energética y la Agencia Chilena de Eficiencia Energética. Ese mismo año

Por otro lado, en el año 2006 el Ministerio de Obras Públicas (MOP), a través de su Dirección de Arquitectura (DA), comenzó un proceso de incorporación de criterios de eficiencia energética y sustentabilidad en las obras de edificación pública, con el objeto de mejorar el desempeño energético y ambiental del parque de edificios públicos en Chile. En el marco de dicho proceso, el Consejo Superior de Innovación Tecnológica, dependiente de la Dirección General de Obras Públicas, seleccionó para su ejecución, la presentación de la DA en el año 2011, denominada “Términos de Referencia Estandarizados con Parámetros de Eficiencia Energética y Confort Ambiental, para Licitaciones de Diseño y Obras de la Dirección de Arquitectura, Según Zonas Geográficas del País y según Tipología de Edificios” (TDRé) (MOP 2015).

Posteriormente, en 2011 se desarrolló y validó una ficha técnica de apoyo para la Guía TDRé. Finalmente, en 2015 se publica la segunda versión de esta guía, integrando ajustes a exigencias para internalizar nuevas normativas.

Actualmente Chile no dispone de normativa para regular temas de demanda energéticas o calidad de ambiente interior para edificios no residenciales (Vásquez, Dalencon y Encinas 2015). Otras iniciativas

como la ya nombrada Reglamentación Térmica, Plan de Descontaminación Ambiental o Código de Construcción Sustentable, sólo están destinadas a la edificación residencial; mientras que los TDR se sí se aplican a edificios públicos, pero no son de carácter obligatorio. De hecho, la ley no indica explícitamente implementar regulaciones energéticas a los edificios del sector comercial y público, aun cuando estos edificios pueden impactar de forma significativa en la eficiencia energética del país (NRDC 2014).

1.9 Climatización de edificios

Existen diversos factores que intervienen el desempeño energético de un edificio. Conforme al Centro de Investigación en Tecnologías de la Construcción (CITEC 2012) el consumo energético de un edificio está determinado por su diseño, calidad de procesos constructivos, uso, gestión energética, sistemas de control e influencias físicas. Esto concuerda con los 6 factores mencionados por la Agencia Internacional de Energía (IEA 2013): clima, envolvente, servicio del edificio, calidad de ambiente interior, operación-mantenimiento del edificio y actividades del usuario.

Los sistemas de calefacción, ventilación y refrigeración (denominados HVAC por sus siglas en inglés Heating, Ventilation and Air Conditioned); artefactos eléctricos e iluminación son claves en el consumo de un edificio, y la frecuencia de su uso puede causar grandes diferencias (Delzende et al. 2017).

Del consumo total de un edificio, los sistemas HVAC son los que consumen una mayor cantidad de energía. Diversas fuentes a nivel internacional (Shahnazari et al. 2018; Yu, Ergan y Dedemen 2019; Papadopoulos et al. 2019) indican que esta energía se encuentra en el orden del 40 al 50% del consumo total de un edificio. El caso de Estados Unidos es peor, los sistemas HVAC de edificios consumen el 75% de la electricidad producida en este país (USEIA 2012b). A nivel nacional, el presidente de la Asociación de Profesionales de Climatización y Refrigeración de Chile (DITAR Chile A.G.) Juan Carlos Troncoso, indica que los sistemas HVAC pueden consumir entre un 40 a un 65% del total del edificio y que aun así no se consiguen condiciones de confort (Troncoso 2015).

1.9.1 Temperatura de funcionamiento

La temperatura en la que funcionan los sistemas HVAC se denomina temperatura de funcionamiento o también se conoce como “setpoint”. En este sentido, la temperatura a la cual el sistema comienza a calefaccionar se llama setpoint de calefacción, mientras que la temperatura a la cual el sistema comienza a refrigerar se llama setpoint de refrigeración. Existe por lo tanto un rango de temperatura cercano a los setpoints en el cual el sistema de calefacción ni de refrigeración interactúan, es decir, se mantienen

desactivados y no existe consumo energético por parte del sistema. Este rango de temperatura se conoce como zona neutral o “deadband”(Ghahramani et al. 2016) y sirve para evitar que ambos sistemas (calefacción y refrigeración) se mantengan en una batalla constante en torno a una temperatura límite en común. Por ejemplo, se tiene que la temperatura setpoint de calefacción es 18 °C y la de refrigeración es de 24°C. Esto quiere decir que el sistema HVAC comenzará a calefaccionar cuando la temperatura interior baje de 18 °C, y comenzará a refrigerar cuando suba de 25 °C.

Diversas investigaciones han estudiado los ahorros en energía a través del ajuste de las temperaturas de setpoint. Hoyt et al. (2009) por ejemplo, estudiaron el ampliar el rango de temperaturas del termostato (setpoint más bajo para calefacción y más alto para refrigeración), a través de la simulación de un edificio de oficina mediano en 4 localidades diferentes de Estados Unidos. Partiendo de un rango de temperatura de setpoint comúnmente usado en ese país de 21.5 °C (para calefacción) a 24 °C (para refrigeración), se movió 20,5; 19,5; 18,5 y 17,5 °C y a 25, 26 y 28 °C; respectivamente. Encontraron que dependiendo de cada localidad, el incrementar el setpoint de refrigeración en un grado (de 24 a 25 °C) puede significar un ahorro de 7 a 15%; e incrementarlo en cuatro grados (24 a 28°C) resulta en un ahorro de 35-45%. Respecto a la calefacción, disminuir el setpoint en un grado (21,5 a 20,5 °C) produce un ahorro del 7 al 14%, mientras que disminuirlo en cuatro grados (21,5 a 17,5 °C) resulta en 17 a 35% de ahorro energético.

En un informe (PNNL 2012) realizado para el Departamento de Energía de Estados Unidos , los autores evaluaron edificios de oficina grandes y determinaron que ampliar la banda de setpoint de 21,6 - 22,8 °C a 20,6 – 23,9 °C, reduce el consumo energético del sistema HVAC de 9 a 20% dependiendo del clima de la localidad.

De forma similar, Kazanci y Olesen (2013) desarrollaron un estudio en donde se simuló la extensión de la temperatura setpoint de calefacción refrigeración en una vivienda unifamiliar de 66 m² en los climas de Copenhague y Madrid, se encontró que el rango de temperatura puede ampliarse sin causar problemas de sensación térmica para ambos climas. También hallaron que para Madrid, al mover set point de refrigeración de 23 a 25 °C, la demanda puede disminuir en un 23%.

Ghahramani et al. (2015) estudiaron distintas ampliaciones de deadband y descubrieron que a medida que ésta era más amplia, se producían más ahorros. Ellos indican que ampliar la deadband de 3 a 6 °C puede significar en promedio un ahorro del 16% aproximadamente. Hoyt, Arens y Zhang (2015) también estudiaron la influencia de ampliar la deadband sobre el consumo energético en oficinas de mediano tamaño, utilizando 7 climas diferentes de Estados Unidos. La línea base de setpoint empleada por ellos fue

de 21.1 °C para calefacción y 22,2 °C para refrigeración. Los resultados revelan que incrementando el setpoint de refrigeración de 22,2 a 25 °C se puede ahorrar 27% del consumo total del sistema HVAC; también mostraron que un rango de 18.3 °C a 27.8 C puede significar un ahorro del orden de 32 al 73%, dependiendo del clima.

Ghahramani et al. (2016) encontraron que se puede ahorrar hasta un 16,4% de energía a través del ajuste de la temperatura de setpoint con una deadband más amplia. De igual manera para edificios pequeños de oficina, Ghahramani, Dutta y Becerik-Gerber (2018) muestran que se pueden conseguir ahorros de hasta un 38,7%, dependiendo de la localidad.

Una investigación llevada a cabo en Australia (Zhang et al. 2017), evaluó el confort térmico de los ocupantes luego de aumentar la temperatura de setpoint que comúnmente prevalece en ese país. Los autores encontraron que al aumentar el setpoint de refrigeración en 3 grados (de 22 a 25 °C), no se producían cambios en el nivel de sensación térmica de los ocupantes, sugiriendo que existe un potencial de ahorro en los equipos HVAC.

Otro estudio reciente (Papadopoulos et al. 2019) aplicado en siete zonas climáticas de Estados Unidos, pretendía evaluar ajustes de temperatura de setpoint eficientes en un modelo de edificio comercial, con el fin de obtener ahorros energéticos sin comprometer el nivel de sensación térmica. Entre sus hallazgos indica que para climas templados (como el de San Francisco y California) se pueden alcanzar ahorros de hasta un 60% de HVAC sin comprometer el confort térmico de los ocupantes.

1.10 Campaña “sin corbata ni chaqueta en verano” en el mundo

Alrededor del mundo, en algunos gobiernos se han realizado campañas buscando ahorrar energía. En Japón, Corea del Sur y España se han adoptado medidas a nivel gubernamental sugiriendo evitar el uso de corbatas y chaquetas en oficinas durante los meses de verano, con el fin de reducir los altos consumos energéticos registrados en estos meses a causa del uso excesivo de refrigeración.

1.10.1 Japón

En el año 2005, el Gobierno japonés adoptó una campaña a través de su Ministerio del Medio Ambiente, esta campaña se conoce como “CoolBiz” y su objetivo principal era reducir el consumo eléctrico, limitando el uso de aire acondicionado. Para esto promovió el uso de vestimenta informal en trabajo durante los meses de verano, sugiriendo explícitamente el uso de camisas de manga corta, sin chaqueta ni corbata, ya

que se dice que el uso de estas prendas aumenta la temperatura corporal en al menos 2 grados, lo cual hace requerir un mayor esfuerzo al aire acondicionado. Se recomendó también mantener la temperatura de setpoint de refrigeración en 28 °C para edificios públicos en meses de verano (MMA 2019).

Dos meses después, el Ministerio de Medio Ambiente de ese país entregó los resultados de la campaña CoolBiz (MMA 2005). Estos indican que la reducción estimada del CO₂ fue de alrededor de 460.000 toneladas, lo cual equivale al valor emitido por un millón de hogares en un mes.

La campaña CoolBiz se ha ido retomando en algunos años, por ejemplo en 2011 cuando tras el terremoto y tsunami hubo una escasez de energía. Aquí se denominó “Super Cool Biz” y se recomendó nuevamente utilizar ropa ligera para trabajar; el aire acondicionado a 28 °C; desconectar los computadores que no están en uso, y llamó a cambiar las horas de trabajo durante la mañana y tomar más vacaciones de verano. En Abril de 2019, el Ministerio del Medio Ambiente japonés, promovió nuevamente esta campaña a través del movimiento nacional denominado “Cool Choice”, adoptando medidas muy similares a la campaña Cool Biz (MMA 2019).

1.10.2 Corea del Sur

Imitando la iniciativa CoolBiz en Japón, el Gobierno coreano lanza esta campaña en el verano de 2006 (denominada con el mismo nombre “CoolBiz”) buscando reducir el uso de aire acondicionado durante los meses de verano. De igual manera, se recomendó a los trabajadores de oficinas a evitar el uso de corbatas y chaquetas en meses de verano para no forzar los equipos de refrigeración.

Se realizó un experimento en el cual un grupo de CoolBiz utilizaba camisas de manga corta sin corbata (vestimenta CoolBiz), mientras que otro grupo utilizaba camisas manga larga y corbata. Los resultados mostraron que a una temperatura interior de 27 °C la temperatura corporal del grupo CoolBiz era 0,47 °C menor que la del otro grupo; y a una temperatura interior de 25 °C (la cual es la comúnmente utilizada en oficinas) la temperatura del grupo CoolBiz era 0,8 °C menor que las corporales del otro grupo.

De acuerdo Ministerio de Medio Ambiente coreano, elevando la temperatura del aire acondicionado en un grado Celsius se puede lograr un 7% de ahorro en el consumo de energía y empleando la vestimenta CoolBiz se espera reducir la emisión de entre 160 a 290 toneladas de CO₂ y ahorrar 300 billones (The Korea Times 2009).

1.10.3 España

En España, el Ministro de Industria español, Miguel Sebastián, ha propulsado el no uso de la corbata en meses de verano inspirado en la campaña de Japón, con el fin de reducir el consumo energético y por consiguiente las emisiones de CO₂. Sin embargo, este tema ha generado controversia y ha dado a discusiones (El País 2011).

Aun así, hay empresas españolas que han optado por tomar estas medidas para poder aumentar el setpoint de refrigeración hasta 24-25 °C. Para esto, han instado a sus trabajadores a vestir con ropa informal durante los meses de verano, tal es el caso de la empresa Red Eléctrica España (El País 2007).

La compañía que más lejos ha llegado en ese sentido es Acciona, que en 2011 anunció el aumento entre uno y dos grados de la temperatura de climatización en sus centros de trabajo a 23-24 °C, donde la temperatura habitual es de trabajo es de 21-22 °C, junto a la recomendación de no utilizar trajes con chaqueta, manga larga o corbata. Con esto la compañía consiguió un 10% de ahorro en climatización cuando se aumentaba la refrigeración en 2 grados (Acciona 2010).

1.10.4 Chile

En Diciembre de 2011, en Chile el Ministro de Energía, Rodrigo Álvarez, en el marco de su cuenta pública lanzó la campaña "En Verano quítate la Corbata", que se basa en la experiencia de España y Japón. Esta iniciativa pretende que el sector público y privado disminuyan el consumo de electricidad que se utiliza el aire acondicionado, evitando el uso de la corbata, ya que al usar corbata se necesita más aire frío para lograr una temperatura confortable (MINERGIA 2011b). Indica el Ministerio, que no usando la corbata se puede subir el setpoint de refrigeración en 1 a 3 °C, alcanzando ahorros de hasta 3% de energía, lo cual representa hasta \$10 millones de dólares en los cuatro meses de verano; y de acuerdo al video de la campaña, se puede evitar en el sector público y comercial la emisión de 120mil toneladas de CO₂.

1.1 Confort térmico

Cuando dos cuerpos a diferentes temperaturas se ponen en contacto térmico entre sí, se produce una transferencia de calor que va desde el cuerpo más cálido al cuerpo más frío, hasta alcanzar una temperatura en común de equilibrio (Inzunza 2002). Dicho evento experimenta una persona al someterse a un determinado entorno, debido a que el cuerpo humano, el cual en actividad física normal se encuentra en un rango de temperatura que oscila de 36 a 38°C (Mondelo et al. 2001), intenta encontrar una temperatura de equilibrio con el ambiente al que está expuesto, produciéndose entonces una constante transferencia de calor desde el cuerpo humano al entorno, en el caso que el entorno estuviese a una

temperatura menor que el humano. Si la persona pierde calor de forma acelerada, sentirá frío. Luego, si ésta no logra disipar el calor con suficiente rapidez, sentirá calor; por lo tanto, se puede indicar que un individuo está en confort térmico al no experimentar la sensación de calor ni frío.

1.1.1 Enfoque cuantitativo

Givoni (1969) define la sensación térmica como la percepción de calor o frío del ambiente a partir de la actividad neurálgica originada en los nervios de la piel que actúan como receptores térmicos. Varios han sido los modelos desarrollados que describen diferentes maneras de valorar cómo se percibe el confort térmico en función de los distintos factores implicados, concluyendo finalmente en distintos estándares de confort, sin embargo, el que más influencia ha tenido es el propuesto por Fanger (1970).

La importancia de la aportación de Fanger, estriba en que no se limitó a establecer solamente un procedimiento de balance térmico cuyo resultado arroja una magnitud de energía expresada en unidades térmicas (calorías, btu, joules, etc.), sino un valor expresado en unidades adimensionales que predice lo que un individuo normal con vestimenta regular y en actividad determinada podría opinar sobre su sensación térmica. Así, Fanger inicia los modelos que se han denominado de predicción, pues supuestamente son capaces de predecir lo que las personas sentirían ante tal o cual ambiente térmico. Para ello se basa en una escala de siete puntos sobre la que los sujetos escogían el que más se ajustaba a su sensación del ambiente térmico. A tales respuestas Fanger las llamó “votos”, y consideró al confort térmico como el conjunto de condiciones bajo las que las personas eligen las tres categorías centrales de la escala, y no sólo la neutral, es decir que pueden estar entre lo “ligeramente fresco” y lo “ligeramente caluroso”, con lo que trata de absorber así los posibles desajustes entre la realidad objetiva y la opinión subjetiva de las personas (ver Tabla 3).

Tabla 3. Escalera de siete votos de Fanger (1970)

Valor	Voto
3	Muy caluroso
2	Cálido
1	Ligeramente cálido
0	Neutral

-1	Ligeramente fresco
-2	Fresco
-3	Muy frío

La ecuación de Fanger, que convierte la carga térmica acumulada en el cuerpo a un valor posible de voto, configuró uno de los índices más usados para la determinación de confort térmico, denominado Voto Medio Previsto (Predicted Mean Vote) o más denominado por PMV:

$$PMV = (0,303e^{-0,036M+0,025}) \times lo$$

PMV = voto medio previsto.

lo = acumulación de calor en el cuerpo.

M = tasa metabólica.

Más adelante derivó otro índice más, el porcentaje previsto de personas insatisfechas (predicted percentage dissatisfied) o más conocido por PPD. Este complementa el resultado: cuando el pmv se aleja del valor neutral, el ppd se incrementa. Este método, basado en la física de transferencia de calor, reconoce el componente subjetivo de la apreciación personal y hace una adaptación empírica para evaluar la posible sensación al establecer una tensión térmica basada en la transferencia de calor en estado estacionario entre el cuerpo y el ambiente, pero asigna un voto de confort a esa cantidad de tensión:

$$PPD = 100 - 95e^{-(0,03353PMV^4+0,2179PMV^2)}$$

PPD = porcentaje previsto de personas insatisfechas.

PMV = voto medio previsto.

El modelo de Fanger ha servido de base a otros procedimientos para la determinación de la temperatura de “diseño” óptima en edificios, como el de la Sociedad Americana de Ingenieros en Calefacción, Refrigeración y Aire Acondicionado (ASHRAE 1992) y el de la Organización de Normas Internacionales, “Ambientes térmicos moderados. Determinación de los índices PMV y PPD y especificaciones de las condiciones para el bienestar térmico” (EN ISO 7730 1995).

En cualquier caso es necesario considerar ciertas limitaciones en la aplicabilidad del método de Fanger. Según las recomendaciones de la norma (EN ISO 7730 2007) "Ergonomía del ambiente térmico", el índice del Voto medio estimado (PMV) sólo debería utilizarse para evaluar ambientes térmicos en los que las variables implicadas en el cálculo permanecieran comprendidas dentro de los siguientes intervalos (que equivalen a ambientes térmicos entre fresco (-2) y cálido (2) de la escala de sensación térmica):

- Tasa metabólica comprendida entre 46 y 232 W/m² (entre 0,8 met. y 4 met).
- Aislamiento de la ropa entre 0 y 0,31 m² K/W (0 clo. y 2 CLO).
- Temperatura del aire entre 10 Cº y 30 Cº.
- Temperatura radiante media entre 10 Cº y 40 Cº.
- Velocidad del aire entre 0 m/s y 1 m/s.
- Presión del vapor de agua entre 0 y 2700 Pa.

Sin embargo, el modelo presenta dos limitantes de importancia. La primera es la restricción explícita de la temperatura de la piel y la pérdida de calor por evaporación en valores para confort y sensación "neutral" en un nivel dado de actividad. La segunda, de carácter empírico, es que sólo se aplica a humanos expuestos a un largo periodo en condiciones constantes cuyas características pueden ser medidas con exactitud, por ejemplo el aislamiento de la ropa y la tasa metabólica.

El éxito de los modelos cuantitativos empezó a disminuir cuando se criticaron sus resultados, ya que no se adaptaban con exactitud a todos los casos, por ejemplo en climas tropicales y edificios ventilados naturalmente (Busch 1995) .Las temperaturas de confort obtenidas no sólo diferían de las propuestas en los estándares racionales, sino que además varían entre localidades geográficas, ambientes climáticos y estratos socio-económicos y culturales.

1.1.1.1 Método Gráfico de ASHRAE 55

Para este método las variables a considerar para el cálculo de confort térmico son: nivel de vestimenta, actividad de los usuarios, velocidad del aire, temperatura operativa y humedad relativa; cumpliendo las siguientes condiciones dentro del espacio de estudio, las cuales se cumplen para ambos casos de estudio:

- Tasa metabólica (MET) comprendida entre 1,0 a 1,3

- Vestimenta (CLO) comprendido entre 0,5 y 1,0
- Velocidad del aire entre 0 m/s y 1 m/s.
- Relación humedad máxima 0,012 (gramos de agua por gramos de aire seco)

Este método además se basa en los índices de Voto Medio Previsto (PMV) y Porcentaje de Disconformes (PPD), basados en la escala térmica de 7 niveles de Fanger. De acuerdo a este método, para estar dentro del rango de confort, se debe cumplir que PMV esté comprendido entre los valores -0,5 y + 0,5, y a la vez PMV debe tener un valor máximo de 10%.

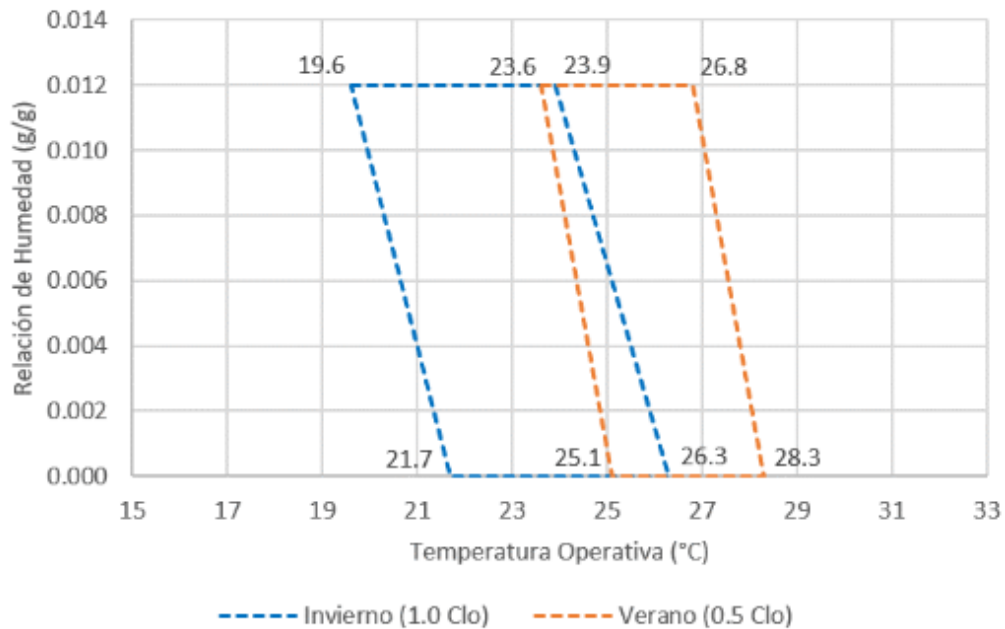


Ilustración 1. Rangos aceptables de temperatura operativa y humedad, de acuerdo al Método Gráfico de ASHRAE 55.

1.1.2 Enfoque cualitativo

Es importante destacar que no todos los modelos emplean todas las variables anteriores en el cálculo de los niveles de confort térmico, pero sí presentan alguna conexión entre las variables más influyentes. El uso de distintos modelos de confort térmico en el cálculo de los requerimientos energéticos de un edificio puede entregar distintos niveles de consumo (Attia y Carlucci 2015), por ello, es fundamental la elección

de un modelo adecuado para no cometer errores que se traduzcan en el sobredimensionado de las prestaciones, con el sobreesfuerzo de recursos materiales y económicos que eso supone.

La crisis del enfoque cuantitativo experimentada en los años 90s ha hecho que algunos investigadores hayan buscado reforzar parte de sus planteamientos científicos mediante el enfoque teórico opuesto, el cualitativo. Esta forma de ver la realidad implica procesos de investigación múltiples e inductivos, que abordan de forma simultánea, incluso superpuesta, los diferentes factores que componen el fenómeno estudiado (Gómez, Bojórquez y Pável 2007).

El enfoque cualitativo del confort térmico no parte de considerar el intercambio de calor entre el cuerpo y el entorno, sino de observar que existen una serie de acciones que el ser humano puede realizar para alcanzar el confort térmico (Nicol y Humphreys 2002). El centro de la regulación térmica radica en la temperatura del cerebro y desde allí se controla el equilibrio entre el mismo y el entorno, mediante acciones que tienden a mantener esta temperatura entre límites muy estrictos. Si se presenta un cambio de cualquier tipo, que cause una desviación de la temperatura de estos estrechos límites, se pone en marcha una actuación que intenta reestablecerla dentro de dichos límites (Mondelo et al. 2001). A diferencia del cuantitativo, este no generaliza los resultados, ya que toma en consideración que los individuos prefieren diferentes temperaturas de acuerdo a la temperatura exterior que ellos experimentan, en este caso tiene que ver con el concepto de aclimatación y está estrechamente relacionado con el tiempo de permanencia que pasa el individuo en determinado lugar con un tipo de clima. En este enfoque no se interviene ni se controlan los parámetros físicos que afectan en la preferencia térmica de las personas.

De hecho existen diversas constricciones en las acciones que podemos hacer para alcanzar el confort térmico, como es el clima, el costo y la moda. Las situaciones en las que no tenemos control directo sobre el entorno (como en el caso de una gran oficina en la que se fija la temperatura de setpoint para todos los usuarios), pueden incrementar la sensación de discomfort. Por otro lado muchas de las acciones que podrían mejorar nuestro confort tienen un límite temporal claro, como construir una nueva casa y cambiarse el vestido, etc., que necesitan tiempo para poderse realizar. Además muchas acciones están limitadas en su capacidad operativa, como incorporar una prenda de vestir, que solo puede compensar un cambio de temperatura limitado. La consecuencia de este enfoque, disponiendo de tiempo suficiente, las personas pueden encontrar formas de adaptarse a cualquier temperatura, de forma que no se genere una situación de exceso térmico o de hipotermia. El discomfort se producirá cuando las temperaturas: cambian demasiado rápido para la capacidad de adaptación; están fuera de los límites aceptables; son imprevistas

o están fuera del control individual. Este enfoque implica sistemas complejos en que interactúan variables físicas y biológicas en cierta medida cuantificables (clima, metabolismo, aislamiento térmico) a la vez que psicológicas (adaptación, tolerancia, deseo) cualificables pero difícilmente cuantificables (Gómez, Bojórquez y Pável 2007).

Para edificios sin sistemas de climatización se describe un modelo de confort adaptativo desarrollado a partir de los resultados del proyecto Smart Controls and Thermal Comfort (SCATs) (Nicol y Humphreys 2002). Por otro lado, la norma ASHRAE 55:2013 establece otro modelo de confort térmico adaptativo desarrollado a partir del proyecto ASHRAE RP-884: Desarrollando un Modelo Adaptativo de Confort Térmico y Preferencia (ASHRAE 2013). Ambos modelos guardan similitud en su procedimiento de cálculo puesto que emplean para la determinación de la temperatura de confort la temperatura media exterior de los siete días previos al que se pretende evaluar, sin embargo, pese a que las formulas son sensiblemente parecidas los valores de las constantes son diferentes. Por ello, la determinación de una temperatura de confort empleado ambos modelos entregarán diferentes resultados respecto de los requerimientos energéticos (Attia y Carlucci 2015).

1.2 Simulación energética

La simulación energética de edificios se ha venido empleando desde hace aproximadamente 30 años. Tanto en la industria de la edificación como en el mundo académico esta práctica se ha mantenido en un crecimiento constante y se ha vuelto en un método aceptado para la evaluación de desempeño energético de edificios durante la etapa de diseño (Eguaras-Martínez, Vidaurre-Arbizu y Martín-Gómez 2014). Actualmente existen muchas investigaciones relacionadas a la simulación energética, de las cuales varias se esmeran en resolver o encontrar posibles imprevistos en la etapa de operación.

Las herramientas de simulación energética permiten calcular detalladamente los valores de demanda energética para mantener criterios requeridos de un determinado espacio o edificio; como lo pueden ser la temperatura interior, humedad, acumulación de CO₂, entre muchas más. Dichos cálculos se basan en diversos factores externos o internos como clima, ocupación, infiltración, propiedades termo físicas del edificio, asoleamiento, etc. Los resultados generalmente se muestran para el transcurso de un año completo, teniendo la opción de revisarlos detalladamente a nivel mensual, diario e incluso horario (Coakley, Raftery y Keane 2014). Muchos cálculos realizados por estas herramientas se basan en

metodologías propuestas por normas internacionales, como por ejemplo ASHRAE 55 para el cálculo de confort térmico.

A continuación se da una breve descripción de las principales herramientas para simulación.

1.2.1 DOE-2

Es una herramienta de simulación gratuita, la cual fue desarrollada por el Departamento de Energía de Estados Unidos (DOE por sus siglas en inglés). Con esta herramienta se pueden obtener valores de demanda energética y costo de forma horaria para un determinado edificio, ingresando la información respectiva de clima en formato horario, geometría del edificio, descripción del sistema de climatización y horario de uso (Winkelmann et al. 1993).

1.2.2 EnergyPlus

EnergyPlus es una herramienta avanzada de simulación, desarrollada a partir de la herramienta DOE-2. Por lo tanto, EnergyPlus incorpora la misma funcionalidad que DOE-2, produciendo valores de consumo de energía de calefacción, refrigeración, ventilación y equipos). De sus funciones más destacadas está el cálculo y visualización de variables en pasos de tiempo definidos por el usuario (subhorario, horario, diario, mensual y anual). Por otro lado, permite el cálculo de confort térmico de los usuarios basado en normas internacionales como ISO 7730 y ASHRAE 55, entre otras (Crawley et al. 2001), (EnergyPlus 2020).

1.2.3 TRNSYS

Su nombre proviene del inglés Transient System Simulation Tool (Herramienta de Simulación de Sistemas Transitorios). Es un programa de simulación de muy fácil comprensión que se basa en gráficos y como lo dice su nombre, se utiliza para simular el comportamiento de los sistemas transitorios. Los componentes pueden ser sistemas simples como bombas o ventiladores, o sistemas complejos como edificios con zonas múltiples (TRNSYS 2019).

1.2.4 ESP-r

Es una herramienta de simulación que se emplea para modelar desempeños, visuales, térmicos y acústicos de edificios. De forma similar a EnergyPlus, ESP-r requiere información especificada por el usuario respecto a la geometría del edificio, sistemas HVAC, horarios y componentes. Esta herramienta entrega, entre otras cosas, información explícita sobre el balance de energía en cada zona y cada superficie (University of Strathlyde 2002).

Se ha seleccionado el software Design Builder para realizar los cálculos de demanda energética y confort térmico de este estudio. Este software utiliza EnergyPlus como motor de cálculo y es especializado en la simulación energética y ambiental de edificios, permitiendo evaluar aspectos de niveles de confort térmico, demanda energética, emisiones de CO₂, entre otras. Además, mediante este software es posible realizar simulaciones continuas modificando sólo algunas variables (simulación paramétrica), lo cual es prescindible en este estudio para evaluar confort térmico y demanda energética para distintas temperaturas de funcionamiento. En adición, Design Builder es uno de los programas de simulación exigidos por los TDRe para realizar cálculos de demanda energética y confort térmico.

Unas de las opciones de resultados de confort térmico ofrecidas por Design Builder, son las “horas de desconfort térmico” de acuerdo al Método del Gráfico de ASHRAE 55, lo cual se empleará en este estudio para evaluar el confort térmico de ambos casos.

CAPÍTULO 3: Marco metodológico

Se presenta a continuación el marco metodológico dispuesto para esta investigación, en donde se comienza por explicar la procedencia de la información, lugar de emplazamiento y descripción del caso de estudio; y posteriormente con la metodología para realizar el estudio.

1.4 Recolección de datos

A partir del proyecto FONDECYT REGULAR N° 1171497 titulado “Los edificios no consumen energía, las personas sí: Criterios de confort térmico adaptativo para el diseño arquitectónico de edificios de oficinas en Chile”, y desarrollado por un grupo de investigación de la Facultad de Arquitectura, Construcción y Diseño de Universidad del Bío-Bío, durante el año 2017 se monitorizaron distintos edificios de oficina en las ciudades de Concepción y Santiago de Chile. Se realizaron tres campañas de mediciones comprendidas en las épocas de invierno, primavera y verano, en las cuales se midieron las variables de temperatura interior y exterior, velocidad del aire, niveles de CO₂, entre otras. Además, mediante dos tipos de encuesta (de confort y de adaptación), se recogió información de los ocupantes de estas oficinas, tales como: nivel de vestimenta, metabolismo, confort térmico, acciones adaptativas, entre otras. La encuesta de confort fue aplicada tres veces en un mismo día en las temporadas de invierno, primavera y verano; mientras que la encuesta de adaptación fue aplicada una única vez en la temporada de primavera. Sin embargo, para este estudio sólo se ha utilizado la encuesta de confort térmico.

1.5 Área de estudio

Se seleccionan dos edificios públicos emplazados en la ciudad de Santiago, Región Metropolitana de Chile. Esta ciudad se encuentra a aproximadamente 570 metros sobre el nivel del mar, su Latitud es 33, 26° Sur y su Longitud es 70, 39° Oeste.

El clima de Santiago se conoce como mediterráneo continentalizado y su ubicación dentro de una cuenca es uno de los factores más importantes que provoca su clima continental. La Cordillera de la Costa actúa como barrera climática, bloqueando la influencia marina y contribuyendo a la oscilación térmica anual y diaria y el mantenimiento de una humedad relativa baja. De acuerdo a la clasificación climática de Köppen, corresponde a un clima mediterráneo con lluvias invernales y una estación seca prolongada.

Dentro de la Cuenca de Santiago existen diferencias climáticas locales producidas por el efecto del relieve, al pie oriental de la Cordillera de la Costa y, debido al rol de biombo climático de ésta, se presentan áreas de mayores sequedades, e incluso con características de semiaridez.

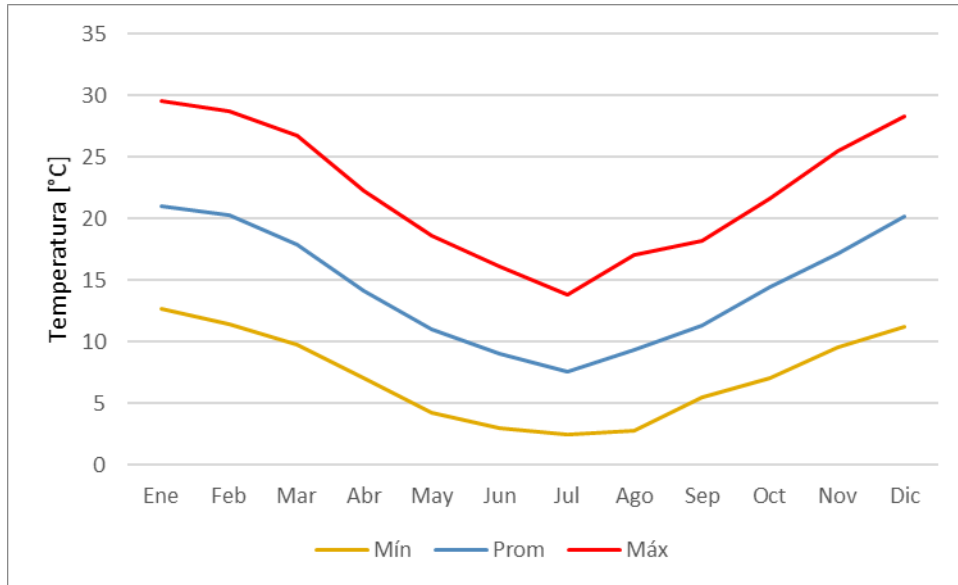


Ilustración 2. Gráfico histórico de temperaturas anuales en Santiago. Fuente: climate-data.org

Santiago se caracteriza por una alta oscilación térmica que alcanza los 15 °C de temperatura máxima diaria y 13 °C de máxima anual.

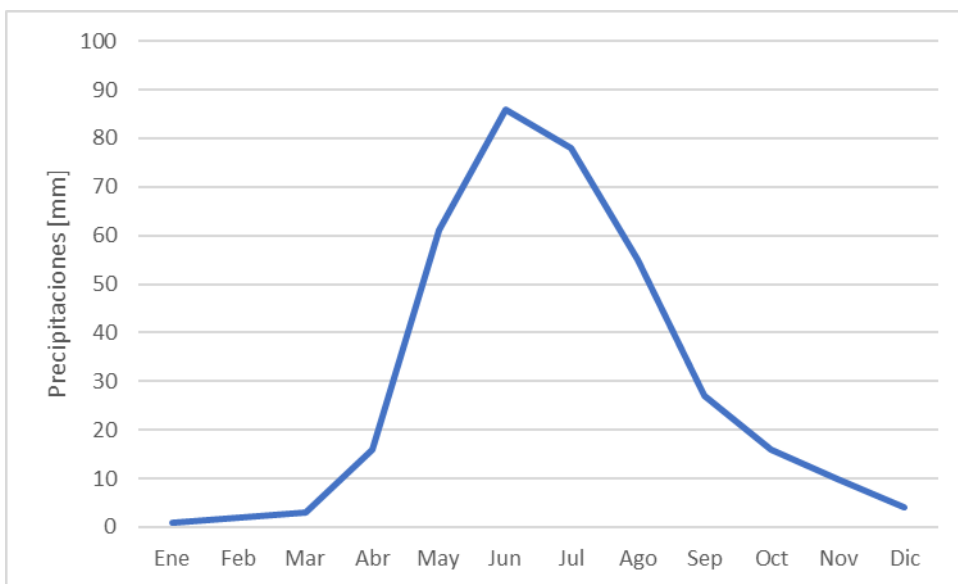


Ilustración 3. Precipitaciones históricas anuales en Santiago. Fuente: climate-data.org

Las temperaturas en verano pueden superar los 30 °C. Los promedios de las máximas y mínimas temperaturas de Diciembre, Enero, Febrero y Marzo son 29, 30, 30 y 28 °C; y 11, 12, 11, 9 °C, respectivamente. Mientras que para Junio, Julio, Agosto y Septiembre, estos valores son 16, 15, 17 y 20 °C; y 3, 2, 3 y °C, respectivamente (ver Ilustración 2). En los últimos años se ha experimentado un aumento significativo en la temperatura de esta ciudad, registrando en verano valores muy cercanos a los 40 °C.

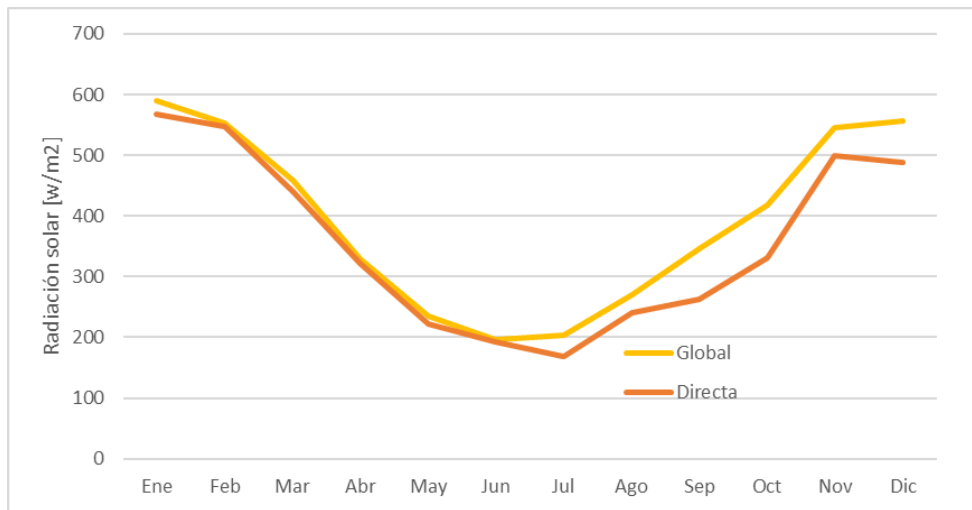


Ilustración 4. Radiación solar global y directa de Santiago. Fuente: www.designbuilder.cl

El sello característico lo constituyen las lluvias, cuyas variaciones permiten destacar condiciones bastantes precarias alcanzando promedios anuales de 356,2 mm. Las precipitaciones decrecen desde la costa hacia la depresión intermedia y aumentan nuevamente en la Cordillera de los Andes; originándose de esta manera líneas bioclimáticas generales de la región y de la zona central de Chile.

Santiago presenta 369,5 mm de agua caída promedio anual. Las precipitaciones se registran durante las temporadas invernales, especialmente durante los meses de mayo, junio, julio y agosto en donde se registran valores desde 50 a 85mm aproximadamente. Los meses más secos son diciembre, enero y febrero donde las precipitaciones tienden a cero. Enero es el mes más seco y las precipitaciones históricas promedian sólo 1 mm (ver Ilustración 3).

Los índices de radiación solar pueden llegar a ser muy altos. En verano las máximas superan los 1000 W/m², y en promedio la radiación directa global y horizontal pueden superar los 500 W/m²; lo cual guarda relación con los días despejados de estos meses que están por sobre los meses del resto del año, sobre todo enero y febrero (ver Ilustración 4). Por otro lado, la mayor cantidad de días nublados pueden encontrarse de mayo a agosto, donde en promedio son 11 días, sin embargo, la mayor cantidad de días parcialmente nublados se encuentran en septiembre y octubre, liderando con un promedio histórico de 10 días (ver Ilustración 5).

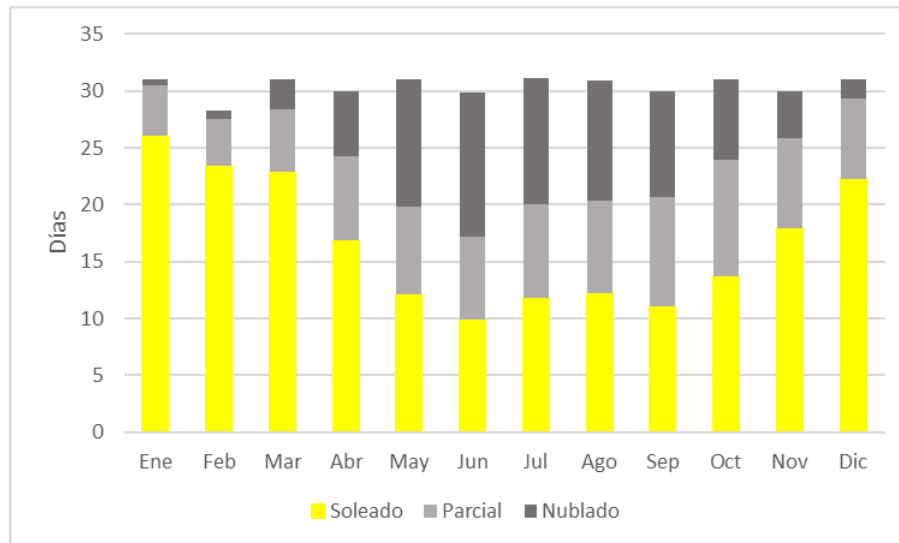


Ilustración 5. Condiciones de cielo históricas para Santiago. Fuente: climate-data.org

1.6 Identificación de los casos de estudio

Los casos seleccionados corresponden a edificios públicos de oficina, ambos construidos el año 2016. Para mantener en confidencialidad la información entregada por el Proyecto, se ha denominado a cada uno de estos edificios con una letra específica. La Tabla 4 muestra de forma resumida algunas características principales de estos edificios y de la información que fue recogida.

1.6.1 Edificio M

Este edificio consta de 13 plantas (4 bajo el nivel de terreno y 9 sobre el nivel de terreno), y cuenta con sistema de climatización (calefacción, ventilación y refrigeración) y sus ventanas no son operables por los usuarios. El piso estudiado es el número 6 contado desde nivel de terreno, es decir, la planta número 10

si se consideran los pisos bajo nivel. Este edificio consta de dos torres, las cuales se encuentran unidas hasta el piso 3 sobre nivel de terreno, y luego se unen mediante una pasarela en los pisos 4 y 6. Para evitar el exceso de asoleamiento, las ventanas de este edificio se encuentran retranqueadas 30 cm de la superficie exterior.

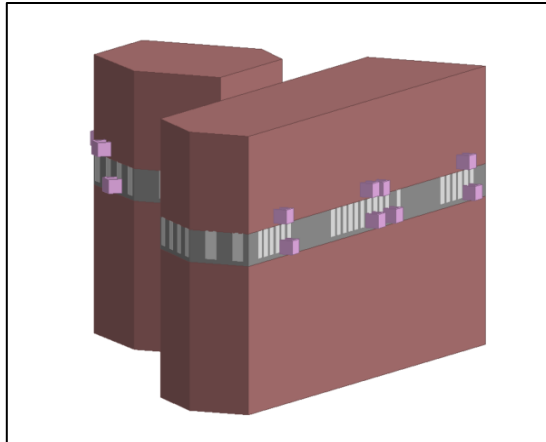


Ilustración 6. Caso de estudio Edificio M

1.6.2 Edificio P

Este edificio consta de 6 plantas y cuenta con sistema de climatización (calefacción, ventilación y refrigeración) y sus ventanas no son operables por los usuarios. En su centro contiene un atrio que atraviesa a todos los pisos del edificio. El piso que se ha estudiado es el número 5. Este edificio se caracteriza por tener amplias zonas de trabajo abiertas. Para evitar el exceso de asoleamiento, este edificio posee una serie de columnas de diámetro 15cm ubicadas por el exterior de las ventanas, en sus fachadas oeste y sur.

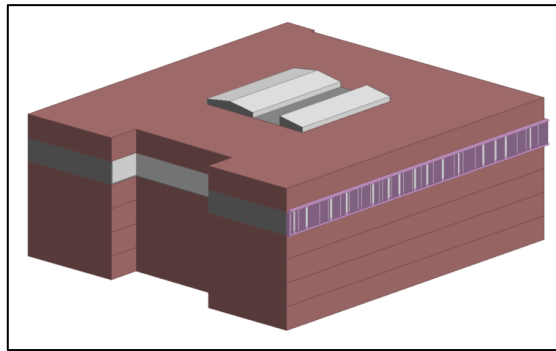


Ilustración 7. Caso de estudio Edificio P

Tabla 4. Individualización de los casos de estudio

Edificio (denominación)	Altura [pisos]	Piso estudiado	Superficie [m ²]	Encuestas (inv./ver.)	Vestimenta [CLO] (inv./ ver.)	Actividad [MET] (inv./ver.)	Setpoint [° C] (cal/ref)
M	13	6	794	98/92	0,90/0,63	1,3/1,3	21,0/24,5
P	6	5	1989	139/116	0,81/0,62	1,2/1,2	22,5/24,5

Esta información fue obtenida a partir del trabajo de monitorización en terreno realizada por el Proyecto ya mencionado, la cual fue procesada a través de planos, especificaciones técnicas y encuestas respectivas al caso de estudio.

1.7 Metodología

Para el desarrollo de la presente investigación, la metodología se propuso a partir de los objetivos específicos (OE) definidos anteriormente. A continuación, se describe cada uno de ellos:

OE1: Clasificar la información de los casos de estudio, para representarlos en un modelo de simulación energética.

Se ha analizado la información proporcionada por el proyecto Fondecyt N° 1171497 para conseguir la información y datos necesarios para la elaboración de un modelo de simulación energética.

Se han modelado los casos de estudio mediante el software Design Builder. El modelo base de simulación, junto con los datos ingresados (obtenidos del proyecto Fondecyt N° 1171497), se describen en el apartado 3.5 de este documento.

OE2: Definir método de evaluación y condiciones de confort térmico para calificar los resultados obtenidos.

Se ha seleccionado el estándar de ASHRAE 55 para realizar las evaluaciones de confort térmico en este estudio. Este estándar se ha seleccionado debido a su compatibilidad con edificios climatizados y por ser uno de los más usados para evaluar edificios de oficina; además de las facilidades que ofrece el software Design Builder para entregar los resultados basados en este estándar.

Se empleará el Método Gráfico de ASHRAE 55 (ver apartado 1.1.1.1. de Marco Teórico), el cual se basa en un diagrama psicrométrico para establecer el nivel de confort.

Se ha establecido que el porcentaje de tiempo en confort que el recinto debe cumplir para que sea categorizado como confortable, sea de un 95%. Este valor está basado en la exigencia de tiempo en confort térmico para edificios públicos de los TDRé.

OE3: Calcular demanda energética y confort térmico de caso base y casos modificados, mediante simulación energética, para determinar condiciones iniciales y finales.

Se ha ejecutado una primera simulación para determinar horas de confort térmico y también demanda energética iniciales.

Posteriormente, se han realizado simulaciones paramétricas evaluando confort térmico y demanda energética resultantes de ajustes a la temperatura operativa. Para esto, y en base a las investigaciones ya realizadas, se ha decidido evaluar la modificación de la temperatura de funcionamiento en rangos cada 0,5 °C, hasta llegar al límite de 5 °C.

OE4: Analizar comparativamente los casos modificados, para establecer diferencias con respecto al caso base.

Se revisaron los resultados demanda energética finales, y fueron contrastados con los valores iniciales determinando ahorro energético respectivo. Los valores de horas de confort térmico fueron contrastados con el límite de horas de confort (95%) y se determinó cumplimiento con dicha condición.

OE5: Evaluar ahorro energético y confort térmico juntos, con el fin de determinar qué caso es el más óptimo.

Se evaluó la información ya analizada para determinar qué escenario es el más óptimo considerando demanda energética y confort térmico. Esto se realizó con el siguiente criterio de selección:

- Que tenga el mayor ahorro energético, y que a la vez
- cumpla con el porcentaje de tiempo en confort establecido.

1.8 Modelo base de simulación, edificio M

Para este modelo base de simulación se ha considerado sólo la planta número 6 sobre el nivel de terreno, mientras que el resto de las plantas han sido dispuestas como bloques adiabáticos. La altura interior de la planta en estudio es en promedio 2,45m, y la superficie de 794 m². Para revisar la ilustración gráfica de este caso de estudio, véase el Anexo 1.1. Por otra parte, los datos climáticos para simulación corresponden a los entregados por defecto por el software, correspondientes a la ciudad de Santiago, Chile.

1.8.1 Datos de envolvente

El edificio consta de muros de hormigón revestidos por su interior con plancha de poliestireno expandido y acabado de placa de yeso cartón. Los cristales de ventanas corresponden a termopanel con coeficiente de ganancia solar de un 29%.

El valor real de infiltración de envolvente del edificio se desconoce, por lo cual se ha considerado una tasa de infiltración de 0,3 cambios/hora, de acuerdo a la indicada por los TDRe para Zona Central Interior. La Tabla 5 muestra los valores de transmitancia térmica empleados para la envolvente del modelo de simulación. Estos valores son teóricos, ya que han sido calculados por el software de acuerdo a la materialidad y espesor de cada componente, expresados en especificaciones técnicas y planos del respectivo caso.

Los valores de transmitancia térmica de cielo y piso no han sido considerados, debido a que se encuentran en contacto con superficies adiabáticas, por lo tanto, se considera que no existe intercambio de calor.

Tabla 5. Valores de teóricos de transmitancia térmica ingresados para elementos de la envolvente.

Elemento	Valor U (W/m ² K)
Muros	0,6
Piso	N/A
Cielo	N/A
Ventanas	2,5

1.8.2 Cargas, equipos y ocupación

Para cada recinto se ha empleado el valor de ocupación promedio de las 3 oficinas principales. Este valor es de 0,20 personas/m². Este valor se ha calculado mediante la capacidad de personas que se muestra en la planimetría del respectivo caso para un determinado recinto, dividido por el área de dicho recinto.

El nivel de vestimenta recogido por el Proyecto es en promedio 0,90 CLO en invierno y 0,63 CLO en verano. Esto equivale aproximadamente a una combinación de zapatos, calcetines, pantalones largos, camisa manga larga, sweater en invierno (ver Tabla 6); y para verano una combinación de zapatos, calcetines, pantalones largos, camisa manga corta (ver

Tabla 7); de acuerdo a los valores CLO proporcionados por la Norma UNE EN ISO 9920:2009. En ambos casos (invierno y verano) se agregó una constante de 0,1 clo, la cual equivale a la aislación obtenida por el hecho de estar sentado en una silla.

Tabla 6. Valores CLO para vestimenta empleada en invierno

Prenda	Clo
Zapatos	0,04
Calcetines	0,02
Pantalones / Vestido largo	0,25
Camisa / Blusa manga larga	0,25
Sweater	0,24
TOTAL (+ 0,1)	0,90

Tabla 7. Valores CLO para vestimenta empleada en verano

Prenda	Clo
Zapatos	0,04
Calcetines	0,02
Pantalones / Vestido largo	0,25
Camisa/ Blusa manga larga	0,22
TOTAL (+ 0,1)	0,63

El valor de actividad de los ocupantes fue obtenido a través de las encuestas del Proyecto, consultando a cada encuestado qué actividad estuvo realizando en los últimos 15 minutos, y transformando tal actividad a un valor de tasa metabólica de acuerdo a los valores entregados por la Norma UNE EN ISO 8996:2005. El valor promedio de la tasa metabólica de los encuestados resultó ser 1,2 MET en invierno y también en verano, lo cual corresponde a la actividad de estar sentado y activo (escribiendo y/o archivando).

Los horarios de ocupación varían por ocupante, por lo que el horario de ocupación de oficinas ingresado para simulación 9:30 a 12:30 y luego 14:00 a 17:30, representando el promedio del caso estudiado.

Equipos HVAC Default, fuente electricidad, COP = 1, con horario funcionamiento continuo de 8:00 a 18:00 horas.

Temperaturas de Setpoint: Calefacción: 21,0 °C Refrigeración: 24 °C.

Caudal de ventilación mecánica: 10 lt/s *persona.

Carga por iluminación: 2.5 W/m² *100lux

Para la carga de equipos se consideró un computador por persona, resultando un valor de 8,0 W/m², ya que se estimó una carga por cada computador de 40 W multiplicada por la densidad ocupacional de 0,22 p/m².

1.8.3 Control solar

Las ventanas del edificio se encuentran retranqueadas 30 cm desde el exterior hacia el interior. Además, por el exterior y en algunas ventanas, existen masetas de gran dimensión. Estas masetas inhiben el ingreso de la luz solar a través de algunas ventanas de forma considerable, por lo tanto, han sido integradas al modelo de simulación en formato de bloque de componente. Las ventanas no son operables por usuarios.

Se han considerado cortinas del tipo roller para el control solar interior, con criterio de radiación solar = 120 W/m², esto quiere decir que cuando los niveles de radiación solar superan dicho límite, las cortinas se cierran.

1.9 Modelo base de simulación, edificio P

Para el modelo base de simulación del edificio P, se ha considerado para el análisis la planta número 5, mientras que el resto de las plantas han sido dispuestas como bloques adiabáticos. La altura interior de la planta en estudio es en promedio 2,5 m, con una superficie de 794 m². Para revisar la ilustración gráfica del modelo de simulación de este caso de estudio, véase el Anexo 1.2. Los datos de clima empleados en esta simulación corresponden a los por defecto del software, correspondientes a la ciudad de Santiago, Chile.

1.9.1 Datos de envolvente

El edificio se constituye por muros de hormigón armado, revestidos por su interior con plancha de poliestireno expandido y acabado de placa de yeso cartón, sin embargo, en la información obtenida por el Proyecto, no se precisan los espesores de dichos materiales. Los cristales de ventanas corresponden a termopanel con coeficiente de ganancia solar de un 29%.

El valor de infiltración se ha asignado de 0,3 cambios/hora, de acuerdo a los TDRe. La Tabla 5 muestra los valores de transmitancia térmica teóricos empleados para la envolvente del modelo de simulación.

La tabla 7 muestra los valores de transmitancia térmica teóricos de los elementos de la envolvente del caso P. Los valores de transmitancia térmica de cielo y piso no han sido considerados, debido a que se encuentran en contacto con superficies adiabáticas, por lo tanto, se considera que no existe intercambio de calor. Ya que la información de este proyecto no contaba con los espesores de las materialidades de muro, se ha igualado el valor de la transmitancia térmica de muros al exigido por los TDRe para la zona Central Litoral.

Tabla 8. Valores de teóricos de transmitancia térmica ingresados para elementos de la envolvente.

Elemento	Valor U (W/m ² K)
Muros	0,80
Piso	N/A
Cielo	N/A
Ventanas	2,5

1.9.2 Cargas, equipos y ocupación

El valor de ocupación por personas se ha calculado a través de la cantidad de sillas mostradas en la planimetría de una respectiva oficina, dividida por su área. Para este caso se ha empleado el valor de 0,21 personas/m², el cual representa el promedio de las tres oficinas en estudio.

El valor de aislación por vestimenta se ha calculado mediante el promedio del valor CLO recogido por las encuestas del Proyecto en un día determinado de invierno y verano. El nivel de vestimenta recogido por el Proyecto es 0,81 CLO en invierno y 0,62 CLO en verano. Este valor de aislación quiere decir que todos los ocupantes estarían vistiendo una combinación de zapatos, calcetines, pantalones/falda largos, camisa/blusa manga corta, sweater en invierno (ver Tabla 69); y para verano una combinación de zapatos, calcetines, pantalones/falda largos, camisa/blusa manga corta (ver

Tabla 710); de acuerdo a los valores CLO proporcionados por la Norma UNE EN ISO 9920:2009. En ambos casos (invierno y verano) se agregó al valor total clo, una constante de 0,1 clo, la cual equivale a la aislación proporcionada por el asiento.

Tabla 9. Valores CLO para vestimenta empleada en invierno

Prenda	Clo
Zapatos	0,04
Calcetines	0,02
Pantalones / Vestido largo	0,25
Camisa / Blusa manga corta	0,15
Sweater	0,25
TOTAL (+ 0,1)	0,81

Tabla 10. Valores CLO para vestimenta empleada en verano

Prenda	Clo
Zapatos	0,04
Calcetines	0,02
Pantalones / Vestido largo	0,25

Camisa/ Blusa manga larga	0,21
TOTAL (+ 0,1)	0,62

El valor de actividad de los ocupantes fue obtenido a través de las encuestas del Proyecto, consultando a cada encuestado qué actividad estuvo realizando en los últimos 15 minutos, y transformando tal actividad a un valor de tasa metabólica de acuerdo a los valores entregados por la Norma UNE EN ISO 8996:2005. El valor promedio de la tasa metabólica de los encuestados resultó ser 1,3 MET en invierno y también en verano, lo cual corresponde a la actividad de estar sentado y activo (escribiendo, archivando y caminatas leves).

Los horarios de ocupación varían por ocupante, por lo que el horario de ocupación de oficinas ingresado para simulación 9:30 a 12:30 y luego 14:00 a 18:00, representando el promedio del caso estudiado.

Equipos HVAC Default, fuente electricidad, COP = 1, con horario funcionamiento continuo de 8:00 a 18:00 horas.

Temperaturas de Setpoint: Calefacción: 22,5 °C Refrigeración: 24,5 °C.

Caudal de ventilación mecánica: 10 lt/s *persona.

Carga por iluminación: 2.5 W/m² *100lux

Carga por equipos (computadores): 11,7 W/m² (promedio)

1.9.3 Control solar

Para este edificio, y al igual que en el edificio M, se ha considerado cortina del tipo roller para el control solar interior a través de ventanas, con criterio de radiación solar = 120 W/m², es decir, que estas cortinas se cierran cuando la radiación solar supera los 120 W/m².

CAPÍTULO 4: Resultados y discusiones

1.1 Resultados

A continuación, se presentan los resultados de demanda energética y confort térmico para cada caso de estudio (Edificio M y P), los cuales se obtuvieron por simulación energética en el software Design Builder. En primera instancia, en el apartado 1.1.1 y 1.1.2 se muestran los resultados obtenidos en la primera simulación (caso base) para el Edificio M y P, respectivamente; los cuales serán utilizados para realizar comparaciones respecto a los resultados obtenidos por parametrización, modificando solamente la temperatura de funcionamiento de refrigeración y calefacción; estos últimos resultados se presentan en el apartado 1.1.3.

1.1.1 Edificio M: Resultados de simulación inicial de caso base

Considerando para el edificio M una temperatura de setpoint para calefacción de 21,0 °C y refrigeración de 24 °C, junto a las condiciones descritas en el apartado 1.8 del Marco Metodológico, los valores de demanda energética (referidos sólo a calefacción y refrigeración) se muestran en la Tabla 1111, obteniendo una demanda anual total de calefacción y refrigeración de 29,0 y 31,8 kWh/m² respectivamente, resultando en un total de 60,8 kWh/m²*año para este edificio. Además, en esta misma tabla se presenta la cantidad de horas (horas de desconfort) al año en donde el ambiente interior no cumple con la exigencia de confort térmico de ASHRAE 55. El porcentaje de tiempo en confort se ha calculado a partir de 8 horas diarias de ocupación, resultando un total de 1920 horas al año. En la Ilustración 8, se pueden observar los valores de demanda energética por mes, medidos en kWh, obtenidos para calefacción y refrigeración, siendo los meses junio, julio y agosto los que más demandan energía para calefacción, con un promedio de 5.570 kWh; y los meses diciembre, enero y febrero los que más energía demandan para refrigeración, con un promedio de 6191 kWh. Los meses más críticos en calefacción y refrigeración son julio (7.182 kWh) y enero (7.536 kWh), respectivamente. Estos valores concuerdan con los meses con temperaturas promedio más frías y mas cálidas, presentados en la Ilustración 9. El detalle mensual de los valores de demanda, confort térmico y ambiente interior de la simulación inicial, se encuentran adjuntos en el ANEXO C.

Tabla 11. Resultados anuales de demanda energética y confort térmico del Edificio M

Demanda calefacción [kWh] / [kWh/m ²]	Demanda refrigeración [kWh] / [kWh/m ²]	Demanda total [kWh] / [kWh/m ²]	Horas desconfort [hr]	Tiempo en confort [%]
23.021/29,0	25.281/31,8	48.301/60,8	23	99%

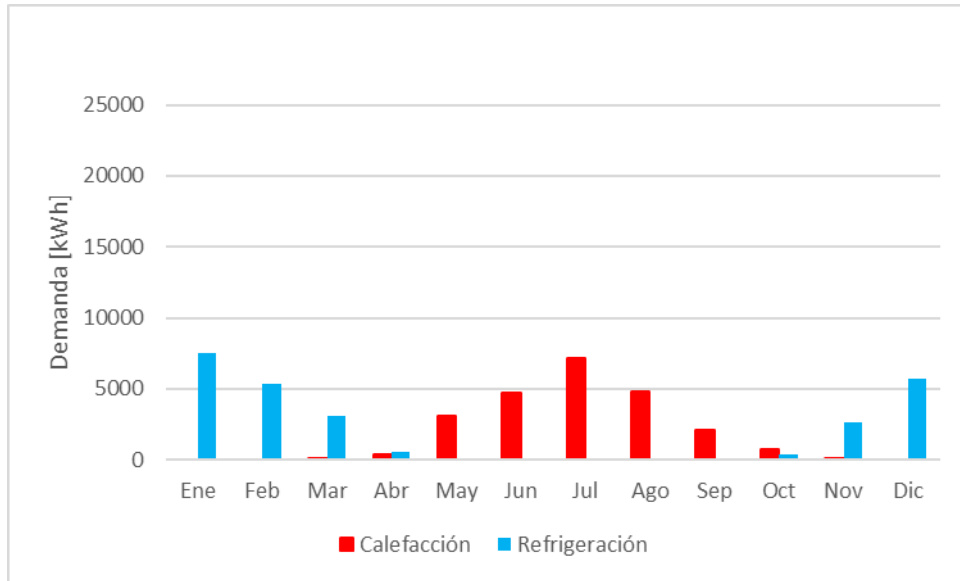


Ilustración 8. Demanda energética mensual en calefacción y refrigeración, Edificio M.

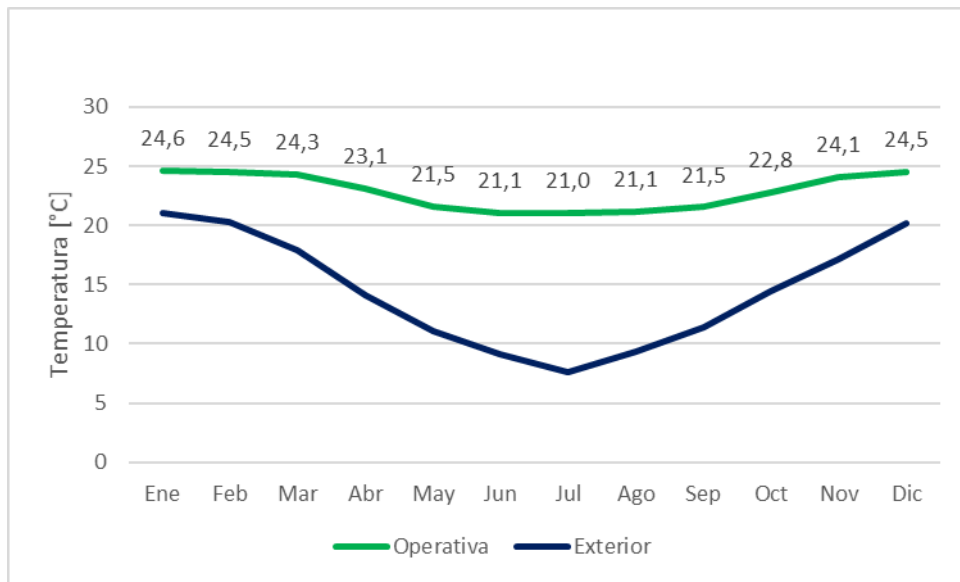


Ilustración 9. Gráfico de temperaturas promedio mensual operativa y exterior.

1.1.2 Edificio P: Resultados de simulación inicial de caso base

Para el caso P se ha considerado una temperatura de setpoint para calefacción y refrigeración de 22,5 y 24,5 °C respectivamente, junto a las condiciones ya descritas en el apartado 1.9 del Marco Metodológico. Los resultados de demanda energética por calefacción y refrigeración, junto a los relacionados a confort térmico de este edificio, se pueden ver en la Tabla 12. Este edificio arrojó una demanda anual total de calefacción y refrigeración de 74,0 y 25,3 kWh/m² respectivamente, sumando total de 60,8 kWh/m²*año. Respecto a la cantidad de horas de desconfort, se presentan al año un total de 54 horas, lo cual representa un 97% del tiempo de ocupación en confort.

La Ilustración 9, muestra la energía de calefacción y refrigeración demandada por el edificio para cada mes del año. Los meses en que más energía se demanda para calefacción son junio, julio y agosto, con un promedio de 18.355 kWh, siendo julio el mes en el que más energía se demanda (22.493 kWh). Los meses que requieren más energía para refrigeración son diciembre, enero y febrero, con un promedio de 8.326 kWh, liderando enero con 9.819 kWh. Estos dos meses (enero y julio) concuerdan mes más cálido y frío, de acuerdo a las temperaturas promedio de exterior presentadas en la Ilustración 9. El detalle mensual de los valores de demanda, confort térmico y ambiente interior de la simulación inicial, se encuentran adjuntos en el ANEXO C.

Tabla 12. Resultados anuales de demanda energética y confort térmico del Edificio P

Demanda calefacción [kWh] / [kWh/m ²]	Demanda refrigeración [kWh] / [kWh/m ²]	Demanda total [kWh] / [kWh/m ²]	Horas desconfort [hr]	Tiempo en confort [%]
104.906/74,0	35.859/25,3	140.766/99,3	54	97%

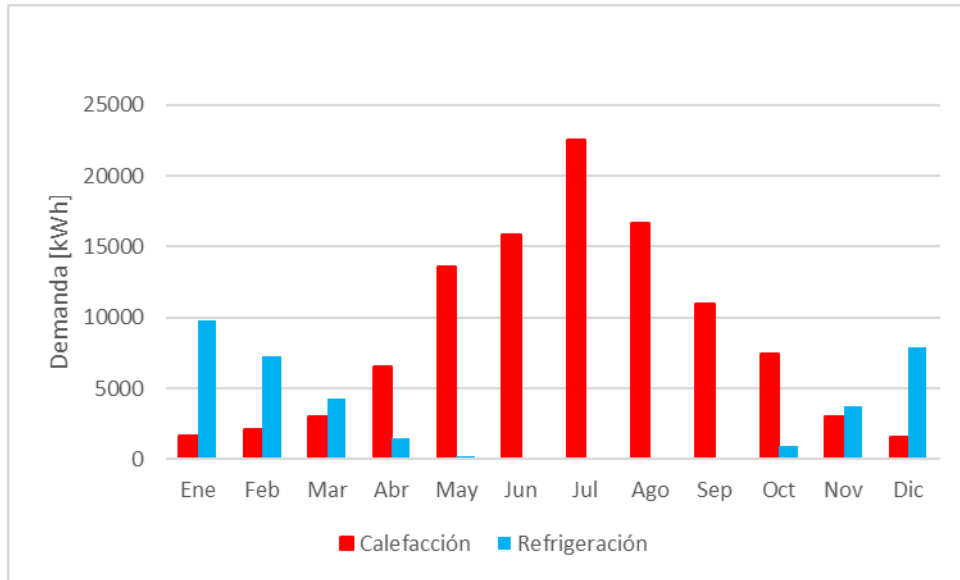


Ilustración 10. Demanda energética mensual en calefacción y refrigeración, Edificio P.

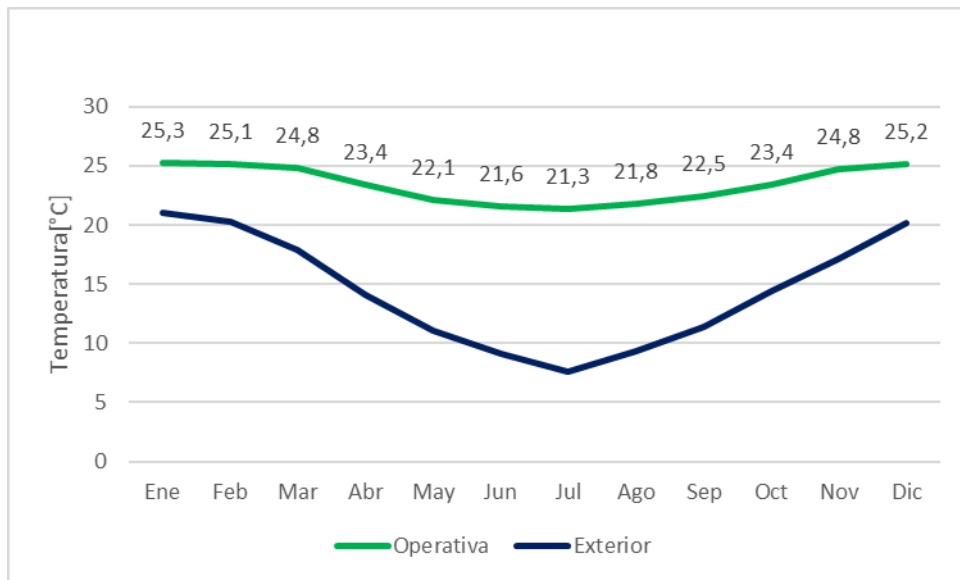


Ilustración 11. Gráfico de temperaturas promedio mensual operativa y exterior.

1.1.3 Resultados de la simulación paramétrica (modificación de temperaturas de setpoint)

Los resultados de este apartado muestran los valores obtenidos por simulación paramétrica del caso base, en donde se ajustó la temperatura de funcionamiento de calefacción y refrigeración.

En calefacción, la temperatura de funcionamiento inicial fue ajustada y evaluada cada $-1\text{ }^{\circ}\text{C}$ hasta llegar a un máximo de $-5\text{ }^{\circ}\text{C}$. En refrigeración, ésta se aumentó cada $+1\text{ }^{\circ}\text{C}$ y se iba evaluando en cada escenario hasta el límite de $+5\text{ }^{\circ}\text{C}$. En total, 120 simulaciones fueron realizadas para cada caso de estudio, evaluando distintas alternativas de ajuste en calefacción y refrigeración juntos, y también por separado.

Las Tablas 14 y 15 muestran los resultados de ahorros energéticos (respecto al caso base) y tiempo en confort de los 120 escenarios evaluados por la simulación paramétrica para cada edificio. Debido a la gran cantidad de datos, en dichas tablas sólo se muestran los escenarios que arrojaron un porcentaje de tiempo en confort mayor o igual a 90%, no obstante, la totalidad de los resultados para cada caso de estudio puede verse en el ANEXO D.

Como se puede ver en la Tabla 14 referente al Edificio M, todas las modificaciones a las temperaturas de funcionamiento producen algún ahorro energético, sin embargo, sólo en los escenarios 1, 2, 3 y 4 se consigue cumplir con el límite de 95% de tiempo en confort establecido. Los ahorros de estos 4 escenarios se consiguen modificando únicamente la temperatura de refrigeración, por lo tanto, para el edificio M el potencial de ahorro estaría en la energía para refrigeración. Se puede rescatar de dicha tabla que es posible modificar la temperatura de refrigeración en hasta $+2\text{ }^{\circ}\text{C}$, ahorrando un 15% de energía y manteniendo los niveles de confort en rangos aceptables (97%).

Para este caso, modificar la temperatura de calefacción no es una solución óptima en cuanto a demanda-confort, ya que sólo modificarla en $-0,5\text{ }^{\circ}\text{C}$, lleva al tiempo de confort térmico anual a rangos no aceptables (93%).

Por otra parte, en la Tabla 15 referente al Edificio P, son 4 los escenarios en que se alcanza el requerimiento de 95% de tiempo en confort. Si bien la mayoría de estos escenarios sólo se modifica la temperatura de refrigeración, el más óptimo en cuanto a demanda-confort es el escenario 4, el cual es una modificación de la temperatura calefacción y refrigeración juntas; es decir, modificando estas temperaturas de $22,5$ y $24,5\text{ }^{\circ}\text{C}$ a $22,0$ y $25\text{ }^{\circ}\text{C}$, se puede ahorrar un 9% en energía manteniendo el porcentaje de tiempo en confort en 95%.

Tabla 13. Valores de tiempo en confort y ahorro en demanda energética obtenidos por la modificación de temperaturas de setpoint, Edificio M

Escenario	Setpoint calefacción [°C]	Setpoint refrigeración [°C]	Demanda energética [kWh/año]	Horas desconfort [°C]	Tiempo en confort [%]	Ahorro energético [%]
Base	21,0	24,5	48302	23	99%	0%
1	21,0	25,0	46310	29	98%	4%
2	21,0	25,5	44428	37	98%	8%
3	21,0	26,0	42643	41	98%	12%
4	21,0	26,5	40989	52	97%	15%
5	20,5	24,5	46481	139	93%	4%
6	20,5	25,0	44506	145	92%	8%
7	20,5	25,5	42633	152	92%	12%
8	20,5	26,0	40856	157	92%	15%
9	20,5	26,5	39210	167	91%	19%
10	21,0	27,0	39503	184	90%	18%

Tabla 14. Valores de tiempo en confort y ahorro en demanda energética obtenidos por la modificación de temperaturas de setpoint, Edificio P

Escenario	Setpoint calefacción [°C]	Setpoint refrigeración [°C]	Demanda energética [kWh/año]	Horas desconfort [°C]	Tiempo en confort [%]	Ahorro energético [%]
Base	22,5	24,5	140745	54	97%	0%
1	22,5	25,0	136202	63	97%	3%
2	22,5	25,5	132118	83	96%	6%
3	22,0	24,5	132099	96	95%	6%
4	22,0	25,0	127671	105	95%	9%
5	22,5	26,0	128434	113	94%	9%
6	22,0	25,5	123680	124	94%	12%
7	22,5	26,5	125081	139	93%	11%
8	22,0	26,0	120055	153	92%	15%
9	22,0	26,5	116739	179	91%	17%
10	22,5	27,0	122034	180	91%	13%
11	21,5	24,5	123810	192	90%	12%
12	21,5	25,0	119482	200	90%	15%

1.2 Discusión

El presente estudio llama a tomar conciencia respecto a la selección de temperaturas de funcionamiento de climatización. Los resultados obtenidos muestran que es posible ahorrar energía en calefacción y refrigeración y sin perjudicar el nivel de confort de los ocupantes.

Respecto a la representatividad de los modelos de simulación, estos fueron modelados con datos reales obtenidos a través del Proyecto FONDECYT REGULAR N° 1171497, sin embargo, existe un grado de incertidumbre por la información ingresada al modelo de simulación, ya que algunos datos importantes que no se pudieron obtener mediante dicho proyecto fueron supuestos, por ejemplo: información de equipos de climatización como tipo, horarios de uso, o manejo de cortinas; o bien el hecho de haber supuesto el nivel de vestimenta o metabolismo de los ocupantes a partir de una cierta parte de encuestados en un recinto, entre otras cosas. Estos datos son de suma importancia para los resultados entregados por el software de simulación, y por esta razón, el modelo de simulación no se consideraría representativo del caso real estudiado, a menos que se cumplieran las mismas condiciones descritas en el apartado 3.6. El valor de desempeño (COP) de los equipos de calefacción y refrigeración se ha fijado en 1,0 con el objetivo de obtener demanda energética y en base a eso evaluar.

Por otro lado, existe la probabilidad que los valores obtenidos de confort térmico pudiesen no ser tan asertivos con la realidad de los ocupantes, ya que estos resultados se basan en una norma internacional, la que pudiese no ser tan asertiva en el contexto nacional. De todas formas, en esta investigación los casos de estudio cumplen con los requisitos necesarios para que el Método del Gráfico del confort térmico estático de ASHRAE 55 sea considerada aplicable.

El valor de ahorro energético obtenido (15% en caso M y 9% en caso P) es comparable con investigaciones como las de Hoyt et al. (2009), PNNL (2012), Kazanci y Olesen (2013), y Ghahramani et al. (2015); quienes también encontraron ahorros energéticos de entre 7 a 20% por modificar la temperatura de funcionamiento de calefacción y/o refrigeración, además de coincidir con (Papadopoulos et al. 2019) por poder ahorrar energía a costo cero manteniendo niveles de confort térmico.

Cabe destacar, que los resultados de ahorro energéticos serían mucho mayores con una menor exigencia de tiempo en confort, por ejemplo, si se considera un 90% de exigencia de tiempo en confort, sería mayor el rango de grados que se podrían modificar las temperaturas de calefacción y refrigeración, y para los casos estudiados, se podrían alcanzar ahorros de hasta un 18%.

Otro factor que permitiría una mayor flexibilidad en las temperaturas de setpoint es el nivel de vestimenta CLO, es decir, si los estos niveles se adaptaran a las temperaturas de ambiente (más abrigado en invierno y más ligero en verano) posibilitaría ampliar aun mas las temperaturas de setpoint produciendo mayores ahorros energéticos sin afectar el nivel de confort térmico de los ocupantes.

CAPÍTULO 5: Conclusiones

Conclusiones

La investigación realizada determina que para los casos estudiados y asumiendo las condiciones ya descritas, es posible ahorrar energía mediante un ajuste de la temperatura de funcionamiento, manteniendo a la vez los niveles de confort térmico establecidos para este estudio. De acuerdo a esto, se ha podido validar la hipótesis planteada en esta investigación. Por otro lado, se logró encontrar el máximo potencial de ahorro energético que no perjudica al confort térmico de los usuarios, cumpliéndose al objetivo general de esta investigación.

Se ha encontrado además que para el caso M, el potencial de ahorro se encuentra únicamente en la temperatura de refrigeración. Mientras que para el caso P, el máximo potencial se obtiene modificando ambas calefacción y refrigeración. Para el caso del Edificio M, la temperatura de funcionamiento de refrigeración puede ser modificada hasta en +2 °C sin perjudicar los niveles de confort térmico. En este edificio, modificar la temperatura de funcionamiento de refrigeración de 24,5 °C a 25,5; permite ahorrar un 8% de energía, y modificarlo de 24,5 a 26,5 °C, permite un 15% en ahorro energético.

Por otro lado, en el edificio P ajustar la temperatura de calefacción -0,5 °C junto con la de refrigeración en +0,5 °C, permitiría el máximo ahorro; es decir, ajustar la temperatura inicial 22,5 y 24,5 de calefacción y refrigeración a 22,0 y 25,0, permite ahorrar un 8% de energía.

Considerando dicha información, y asumiendo que los pisos estudiados en cada caso sean iguales los restantes del edificio, el edificio M podría ahorrar anualmente 7.312 kWh por cada piso, y el edificio P 13.074 kWh por piso.

Los resultados reflejan la importancia de definir niveles de temperatura eficientes para reducir la demanda energética del sistema de climatización. Por lo mismo, la presente investigación invita a reflexionar sobre la relevancia de la selección de estas frente a la eficiencia energética. Los sistemas de climatización pueden representar hasta el 50% del consumo total de un edificio. Si se logra disminuir este valor, se disminuye también el costo de operación del edificio, ya que se necesitaría pagar por menos energía para el funcionamiento de climatización.

En síntesis, el ahorro energético también contribuye al cuidado del medio ambiente, en términos de reducción de las emisiones de gases contaminantes que se atribuyen al funcionamiento de los edificios.

Como opción, las futuras investigaciones pudiesen abarcar la temática de estudiar la modificación temperatura de funcionamiento de calefacción y refrigeración, empleando distintos niveles de exigencia de tiempo en confort térmico como también empleando distintas estándares internacionales de confort térmico. Por otro lado, el nivel de vestimenta es una variable al alcance, la cual puede ajustarse para percibir de mejor forma los ambientes térmicos. Futuras investigaciones podrían evaluar la modificación de las temperaturas de setpoint de climatización, incluyendo la variable de adaptación del nivel CLO.

Sería útil realizar este tipo de investigaciones dentro de los distintos climas del territorio nacional para observar cómo puede ir variando. Otro punto importante que tomar en cuenta es que el grado de aceptabilidad térmica de un recinto está dado por una norma, tal como se ha hecho en esta investigación, lo cual no necesariamente podría coincidir con la realidad; es por esto que sería provechoso aportar con investigaciones que indiquen qué tan asertiva podría ser una norma de confort térmico (ASHRAE 55) para un determinado edificio de oficina, y para esto sería necesario profundizar con estudios en campo, aplicando encuestas a ocupantes y contrastando con valores calculados.

Bibliografía

- ACCIONA, 2010. ACCIONA pone en marcha su plan ahorro, ropa informal y sostenibilidad. [en línea]. [Consulta: 27 diciembre 2019]. Disponible en: <https://www.acciona.com/es/salaprensa/noticias/2010/junio/acciona-pone-en-marcha-su-plan-ahorro-ropa-informal-y-sostenibilidad/>.
- ALLOUHI, A., EL FOUIH, Y., KOUSKSOU, T., JAMIL, A., ZERAOULI, Y. y MOURAD, Y., 2015. Energy consumption and efficiency in buildings: Current status and future trends. *Journal of Cleaner Production* [en línea], vol. 109, pp. 118-130. ISSN 09596526. DOI 10.1016/j.jclepro.2015.05.139. Disponible en: <http://dx.doi.org/10.1016/j.jclepro.2015.05.139>.
- ASHRAE, 1992. *ASHRAE Standard 55:1992 Thermal environmental conditions for human occupancy*. 1992. S.l.: s.n. ISBN 1041-2336.
- ASHRAE, 2013. ANSI/ASHRAE Standard 55-2013. *Ashrae Standard*, ISSN 15233774. DOI 10.1007/s11926-011-0203-9.
- ASIA-PACIFIC ECONOMIC COOPERATION (APEC), 2009. Peer Review on Energy Efficiency in Chile. . S.l.:
- ATTIA, S. y CARLUCCI, S., 2015. Impact of different thermal comfort models on zero energy residential buildings in hot climate. *Energy and Buildings*, ISSN 03787788. DOI 10.1016/j.enbuild.2015.05.017.
- AZAR, E. y MENASSA, C.C., 2014. A Systematic Approach to Quantifying Energy Savings Potential Because of Improved Operations of Commercial Building Stocks. , vol. 67, pp. 2214-2223. DOI 10.1061/9780784413517.225.
- BLENDER, M., 2016. La Reglamentación Térmica - Una mirada desde su entrada en vigencia. *Revista EMB Construcción* [en línea], [Consulta: 27 septiembre 2019]. Disponible en: <http://www.emb.cl/construccion/articulo.mvc?xid=3698>.
- CALDERONE, A., 2011. SIMULATION VERSUS REALITY – 4 CASE STUDIES. , vol. 2, no. ii, pp. 14-16.
- CARBON TRUST, 2011. Closing the gap. [en línea]. S.l.: Disponible en: <https://www.carbontrust.com/media/81361/ctg047-closing-the-gap-low-carbon-building-design.pdf>.

- CARBONBUZZ, 2019. Get REAL about building energy consumption. [en línea]. [Consulta: 22 septiembre 2019]. Disponible en: <http://www.carbonbuzz.org/index.jsp>.
- CERTIFICACIÓN EDIFICIO SUSTENTABLE, 2019. Certificación. [en línea]. [Consulta: 27 septiembre 2019]. Disponible en: <http://www.certificacionsustentable.cl/certificacion/>.
- CHEN, S., YANG, W., YOSHINO, H., LEVINE, M.D., NEWHOUSE, K. y HINGE, A., 2015. Definition of occupant behavior in residential buildings and its application to behavior analysis in case studies. *Energy and Buildings* [en línea], vol. 104, pp. 1-13. ISSN 03787788. DOI 10.1016/j.enbuild.2015.06.075. Disponible en: <http://dx.doi.org/10.1016/j.enbuild.2015.06.075>.
- COAKLEY, D., RAFTERY, P. y KEANE, M., 2014. *A review of methods to match building energy simulation models to measured data*. 2014. S.l.: Elsevier Ltd.
- COMISIÓN ECONÓMICA PARA AMÉRICA LATINA Y EL CARIBE (CEPAL), 2011. Eficacia institucional de los programas nacionales de eficiencia energética: los casos del Brasil, Chile, México y el Uruguay. [en línea]. S.l.: [Consulta: 25 diciembre 2019]. Disponible en: <https://www.cepal.org/es/publicaciones/6355-eficacia-institucional-programas-nacionales-eficiencia-energetica-casos-brasil>.
- COMISIÓN NACIONAL DE ENERGÍA, 2018. ANUARIO ESTADÍSTICO DE ENERGÍA 2018. . S.l.:
- CORPORACIÓN DE DESARROLLO TECNOLÓGICO (CDT), 2015. Guía Desarrollo Sustentable de Proyectos Inmobiliarios. [en línea]. Santiago, Chile: Disponible en: http://www.cchc.cl/uploads/archivos/archivos/Guia_Sustentable_2015.pdf.
- CRAWLEY, D.B., LAWRIE, L.K., WINKELMANN, F.C., BUHL, W.F., HUANG, Y.J., PEDERSEN, C.O., STRAND, R.K., LIESEN, R.J., FISHER, D.E., WITTE, M.J. y GLAZER, J., 2001. EnergyPlus: Creating a new-generation building energy simulation program. *Energy and Buildings*, vol. 33, no. 4, pp. 319-331. ISSN 03787788. DOI 10.1016/S0378-7788(00)00114-6.
- DELZENDEH, E., WU, S., LEE, A. y ZHOU, Y., 2017. The impact of occupants' behaviours on building energy analysis: A research review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* [en línea], vol. 80, no. September 2016, pp. 1061-1071. ISSN 18790690. DOI 10.1016/j.rser.2017.05.264. Disponible en: <http://dx.doi.org/10.1016/j.rser.2017.05.264>.

- EED. ENERGY EFFICIENCY DIRECTIVE, 2015. Optimising Power @ Work. [en línea]. S.l.: Disponible en: <https://www.ca-eed.eu>.
- EGUARAS-MARTÍNEZ, M., VIDAURRE-ARBIZU, M. y MARTÍN-GÓMEZ, C., 2014. Simulation and evaluation of Building Information Modeling in a real pilot site. *Applied Energy* [en línea], vol. 114, pp. 475-484. ISSN 0306-2619. DOI 10.1016/j.apenergy.2013.09.047. Disponible en: <http://dx.doi.org/10.1016/j.apenergy.2013.09.047>.
- EL PAÍS, 2007. ¿Quieres ahorrar energía? Baja el aire acondicionado. [en línea]. 2007. [Consulta: 27 diciembre 2019]. Disponible en: https://elpais.com/economia/2007/07/02/actualidad/1183361579_850215.html.
- EL PAÍS, 2011. Quitarse la corbata no salvará el clima. [en línea]. 2011. [Consulta: 27 diciembre 2019]. Disponible en: https://elpais.com/diario/2011/07/22/sociedad/1311285601_850215.html.
- EN ISO 7730, 1995. *Moderate thermal environments - Determination of the PMV and PPD indices and specification of the conditions for thermal comfort*. 1995. S.l.: s.n.
- EN ISO 7730, 2007. *Ergonomics of the thermal environment*. 2007. S.l.: s.n. ISBN 5421631001.
- EnergyPlus. [en línea], 2020. [Consulta: 23 junio 2020]. Disponible en: <https://energyplus.net/>.
- ENVIROMENTAL INFORMATION ADMINISTRATION, 2019. How much energy is consumed in U.S. residential and commercial buildings? [en línea]. [Consulta: 22 septiembre 2019]. Disponible en: <https://www.eia.gov/tools/faqs/faq.php?id=86&t=1>.
- FANGER, P., 1970. *Thermal comfort. Analysis and applications in enviromental engineering*. S.l.: s.n.
- FRANK, A.A. y KUCHEN, E., 2016. DESARROLLO DE UNA HERRAMIENTA PARA VALIDAR LA INFLUENCIA DEL COMPORTAMIENTO DEL USUARIO SOBRE LA EFICIENCIA ENERGÉTICA EN EDIFICIOS PÚBLICOS DE OFICINAS. *Revista Hábitat Sustentable*, vol. 6, pp. 62-69.
- GARREAUD, R.D., 2011. Cambio Climático: Bases Físicas e Impactos en Chile. *Revista Tierra Adentro* [en línea], vol. 93. [Consulta: 23 diciembre 2019]. Disponible en: <http://www.dgf.uchile.cl/rene>.
- GHAHRAMANI, A., DUTTA, K. y BECERIK-GERBER, B., 2018. Energy trade off analysis of optimized daily temperature setpoints. *Journal of Building Engineering*, vol. 19, pp. 584-591. ISSN 23527102. DOI

10.1016/j.jobe.2018.06.012.

GHAHRAMANI, A., DUTTA, K., YANG, Z., OZCELIK, G. y BECERIK-GERBER, B., 2015. QUANTIFYING THE INFLUENCE OF TEMPERATURE SETPOINTS, BUILDING AND SYSTEM FEATURES ON ENERGY CONSUMPTION. En: and M.D.R. L. YILMAZ, W. K. V. CHAN, I. MOON, T. M. K. ROEDER, C. MACAL (ed.), *Proceedings of the 2015 Winter Simulation Conference* [en línea]. S.l.: s.n., [Consulta: 26 diciembre 2019]. ISBN 9781467397438. Disponible en: <https://www.informs-sim.org/wsc15papers/119.pdf>.

GHAHRAMANI, A., ZHANG, K., DUTTA, K., YANG, Z. y BECERIK-GERBER, B., 2016. Energy savings from temperature setpoints and deadband: Quantifying the influence of building and system properties on savings. *Applied Energy* [en línea], vol. 165, pp. 930-942. ISSN 03062619. DOI 10.1016/j.apenergy.2015.12.115. Disponible en: <http://dx.doi.org/10.1016/j.apenergy.2015.12.115>.

GIVONI, B., 1969. *Man, Climate and Architecture*. S.l.: s.n.

GÓMEZ, G., BOJÓRQUEZ, G. y PÁVEL, R., 2007. El confort térmico: Dos enfoques teóricos enfrentados. *Palapa* [en línea], vol. 2, no. 001, pp. 45-57. [Consulta: 14 diciembre 2019]. Disponible en: <http://redalyc.uaemex.mx>.

GUL, M. y PATIDAR, S., 2019. Understanding the energy consumption and occupancy of a multi-purpose academic building. *Energy & Buildings* [en línea], vol. 87, pp. 155-165. ISSN 0378-7788. DOI 10.1016/j.enbuild.2014.11.027. Disponible en: <http://dx.doi.org/10.1016/j.enbuild.2014.11.027>.

HASHEMI, A., SUNIKKA-BLANK, M., MOHAREB, E., VAKHITOVA, T., DANTSIOU, D., BEN, H. y SHARMIN, T., 2017. Performance gap? energy, health and comfort needs in buildings. [en línea], no. February. Disponible en: <https://www.researchgate.net/publication/314075306>.

HERRANDO, M., CAMBRA, D., NAVARRO, M., DE LA CRUZ, L., MILLÁN, G. y ZABALZA, I., 2016. Energy Performance Certification of Faculty Buildings in Spain: The gap between estimated and real energy consumption. *Energy Conversion and Management*, vol. 125, no. January 2014, pp. 141-153. ISSN 01968904. DOI 10.1016/j.enconman.2016.04.037.

HOYT, A., LEE, T., HO ZHANG, K., HOYT, T., HO LEE, K., ZHANG, H. y ARENS, E., 2009. ENERGY SAVINGS FROM EXTENDED AIR TEMPERATURE SETPOINTS AND REDUCTIONS IN ROOM AIR MIXING. *Environmental Ergonomics* [en línea]. S.l.: [Consulta: 12 diciembre 2019]. Disponible en:

<https://escholarship.org/uc/item/28x9d7xj>.

HOYT, T., ARENS, E. y ZHANG, H., 2015. Extending air temperature setpoints: Simulated energy savings and design considerations for new and retrofit buildings. *Building and Environment*, vol. 88, pp. 89-96. ISSN 03601323. DOI 10.1016/j.buildenv.2014.09.010.

INZUNZA, J.C., 2002. *Física: Introducción a la Mecánica y Calor*. 1. S.l.: s.n.

Ji, Y., LOMAS, K.J. y COOK, M.J., 2009. Hybrid ventilation for low energy building design in south China. *Building and Environment* [en línea], vol. 44, no. 11, pp. 2245-2255. ISSN 0360-1323. DOI 10.1016/j.buildenv.2009.02.015. Disponible en: <http://dx.doi.org/10.1016/j.buildenv.2009.02.015>.

KAZANCI, O. y OLESEN, 2013. The Effects of Set-Points and Dead-Bands of the HVAC System on the Energy Consumption and Occupant Thermal Comfort. *Climamed'13,7. Mediterranean Congress of Climatization* [en línea]. Istanbul, Turkey: s.n., [Consulta: 26 diciembre 2019]. Disponible en: https://www.researchgate.net/publication/259643413_The_Effects_of_Set-Points_and_Death-Bands_of_the_HVAC_System_on_the_Energy_Consumption_and_Occupant_Thermal_Comfort.

LEÓN, J.C., 2018. Cambios a la Reglamentación Térmica. *Revista EMB Construcción* [en línea], Disponible en: <http://www.economiaynegocios.cl/noticias/noticias.asp?id=482782>.

MINISTERIO DE ENERGÍA (MINERGÍA), 1992. Balance Nacional de Energía 1991. [en línea]. S.l.: Disponible en: <http://old.acee.cl/?q=recursos/estadisticas/balances-energia>.

MINISTERIO DE ENERGÍA (MINERGÍA), 2011a. Balance Nacional de Energía 2011. [en línea]. S.l.: Disponible en: <http://old.acee.cl/?q=recursos/estadisticas/balances-energia>.

MINISTERIO DE ENERGÍA (MINERGÍA), 2011b. Ministro Álvarez se saca la corbata por la Eficiencia Energética - Ministerio de Energía. [en línea]. [Consulta: 16 diciembre 2019]. Disponible en: <http://wa.minenergia.cl/ministerio/noticias/generales/ministro-alvarez-se-saca-la-corbata-por-164.html>.

MINISTERIO DE INDUSTRIA ENERGÍA Y MINERÍA (MIEM), 2015. Plan Nacional de Eficiencia Energética 2015- 2024. [en línea]. Uruguay: Disponible en: <http://www.eficienciaenergetica.gub.uy/plan-nacional-de-eficiencia-energetica>.

- MINISTERIO DE OBRAS PÚBLICAS, 2015. Términos de Referencia Estandarizados con Parámetros de Eficiencia Energética y Confort Ambiental, para Licitaciones de Diseño de Obra de la Dirección de Arquitectura, Según Zonas Geográficas del País y Según Tipología de Edificios. [en línea]. S.l.: Disponible en: http://construccionsustentable.uc.cl/images/Documentos/TDRe_MOP-DA.pdf.
- MINISTERIO DE VIVIENDA Y URBANISMO (MINVU), 2006. *Manual de Aplicación Reglamentación Térmica* [en línea]. 2006. S.l.: s.n. Disponible en: http://admminvuv57.minvu.cl/opensite_20070417155724.aspx.
- MINISTERIO DEL MEDIO AMBIENTE DE JAPÓN, 2005. Result of «Cool Biz» Campaign. [en línea]. [Consulta: 26 diciembre 2019]. Disponible en: <http://www.env.go.jp/en/press/2005/1028a.html>.
- MINISTERIO DEL MEDIO AMBIENTE DE JAPÓN, 2019. Sobre CoolBiz 2019. [en línea]. [Consulta: 26 diciembre 2019]. Disponible en: <https://www.env.go.jp/press/106742.html>.
- MINISTERIO FEDERAL DE RELACIONES EXTERIORES (MFRE), 2019. Die deutsche Energiewende. [en línea]. S.l.: Disponible en: <http://www.energiewende-global.com/es/>.
- MINISTERIO FEDERAL REPÚBLICA DE AUSTRIA (MFRA), 2019. Klimaaktiv. [en línea]. [Consulta: 3 septiembre 2019]. Disponible en: https://www.klimaaktiv.at/english/about_klimaaktiv.html.
- MONDELO, P., TORADA, E., URIZ, S., CASTEJÓN, E. y LUCAMBRA, E., 2001. *Ergonomía 2 Confort y estrés térmico*. 3. S.l.: s.n.
- NATURAL RESOURCES DEFENSE COUNCIL, 2014. From Good To Great : The Next Step in Chilean Energy Efficiency. [en línea]. S.l.: Disponible en: <https://www.nrdc.org/sites/default/files/chile-energy-efficiency-report.pdf>.
- NICOL, J.F. y HUMPHREYS, M.A., 2002. Adaptive thermal comfort and sustainable thermal standards for buildings. *Energy and Buildings*. S.l.: s.n., pp. 563-572. DOI 10.1016/S0378-7788(02)00006-3.
- OMENN, G.S., HOLDREN, J., SHAW, David E, SHAW, D E, GOLDEN, W.T., LESHNER, A.I., BIERBAUM, R.M., DOWLING, J.E., ENQUIST, L., FITZPATRICK, S., MCDONNELL, J.S., GAST, A., POLLARD, T.D., STANG, P.R. y SULLIVAN, K.D., 2006. AAAS Board Statement on Climate Change. . S.l.:
- PACIFIC NORTHWEST NATIONAL LABORATORY (PNNL), 2012. Energy Savings Modeling of Standard

Commercial Building Re-tuning Measures: Large Office Buildings. . S.I.:

PAJEK, L. y KOŠIR, M., 2017. Implications of present and upcoming changes in bioclimatic potential for energy performance of residential buildings. *Building and Environment* [en línea], ISSN 0360-1323.

DOI 10.1016/j.buildenv.2017.10.040. Disponible en:
<https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2017.10.040>.

PAONE, A., 2018. The Impact of Building Occupant Behavior on Energy Efficiency and Methods to Influence It : A Review of the State of the Art. , DOI 10.3390/en11040953.

PAPADOPOULOS, S., KONTOKOSTA, C.E., VLACHOKOSTAS, A. y AZAR, E., 2019. Rethinking HVAC temperature setpoints in commercial buildings: The potential for zero-cost energy savings and comfort improvement in different climates. *Building and Environment*, vol. 155, pp. 350-359. ISSN 03601323. DOI 10.1016/j.buildenv.2019.03.062.

PARLAMENTO EUROPEO, 2010. Directiva 2010/31/UE. [en línea], pp. 13-35. Disponible en: <https://eur-lex.europa.eu/LexUriServ/LexUriServ.do?uri=OJ:L:2010:153:0013:0035:Es:PDF>.

PETERSEN, S. y HVIID, C.A., 2012. THE EUROPEAN ENERGY PERFORMANCE OF BUILDINGS DIRECTIVE : COMPARISON OF CALCULATED AND ACTUAL ENERGY USE IN A DANISH OFFICE BUILDING Steffen Petersen 1 and Christian Anker Hviid 2 Aarhus University School of Engineering , Dalgas Avenue 2 , DK-8000 Aarhus. , vol. 10.

PROCEL, 2006. Procelinfo. [en línea]. Disponible en:
<http://www.procelinfo.com.br/main.asp?View=%7B8E03DCDE-FAE6-470C-90CB-922E4DD0542C%7D>.

SCOFIELD, J.H., 2013. Efficacy of LEED-certification in reducing energy consumption and greenhouse gas emission for large New York City office buildings. *Energy & Buildings* [en línea], vol. 67, pp. 517-524. ISSN 0378-7788. DOI 10.1016/j.enbuild.2013.08.032. Disponible en:
<http://dx.doi.org/10.1016/j.enbuild.2013.08.032>.

SHAHNAZARI, H., MHASKAR, P., HOUSE, J.M. y SALSBURY, T.I., 2018. Heating , ventilation and air conditioning systems : Fault detection and isolation and safe parking. *Computers and Chemical Engineering* [en línea], vol. 108, pp. 139-151. ISSN 0098-1354. DOI 10.1016/j.compchemeng.2017.08.012. Disponible en:

<http://dx.doi.org/10.1016/j.compchemeng.2017.08.012>.

SPYROPOULOS, G.N. y BALARAS, C.A., 2011. *Energy consumption and the potential of energy savings in Hellenic office buildings used as bank branches - A case study* [en línea]. abril 2011. S.l.: s.n. [Consulta: 30 mayo 2020]. Disponible en: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0378778810004561>.

TAM, V.W.Y., ALMEIDA, L. y LE, K., 2018. Energy-related occupant behaviour and its implications in energy use: A chronological review. *Sustainability (Switzerland)*, vol. 10, no. 8, pp. 1-20. ISSN 20711050. DOI 10.3390/su10082635.

THE KOREA TIMES, 2009. Cool Biz Campaign Effective. [en línea]. 2009. [Consulta: 27 diciembre 2019]. Disponible en: http://www.koreatimes.co.kr/www/news/nation/2009/08/113_50191.html.

TRANSIENT SYSTEM SIMULATION TOOL (TRNSYS), 2019. What is in TRNSYS? [en línea]. [Consulta: 30 diciembre 2019]. Disponible en: <http://www.trnsys.com/>.

TRONCHIN, L. y FABBRI, K., 2010. A Round Robin Test for buildings energy performance in Italy. *Energy and Buildings* [en línea], vol. 42, no. 10, pp. 1862-1877. ISSN 03787788. DOI 10.1016/j.enbuild.2010.05.022. Disponible en: <http://dx.doi.org/10.1016/j.enbuild.2010.05.022>.

TRONCOSO, J.C., 2015. Elevado gasto energético en edificios por concepto de climatización. [en línea]. [Consulta: 23 diciembre 2019]. Disponible en: <http://www.emb.cl/construccion/articulo.mvc?xid=3318&ni=elevado-gasto-energetico-en-edificios-por-concepto-de-climatizacion>.

UNEP, 2012. Building Design and Construction : Forging Resource Efficiency and Sustainable Development. [en línea]. S.l.: Disponible en: <https://www.usgbc.org/drupal/legacy/usgbc/docs/Archive/General/Docs19073.pdf>.

UNIVERSITY OF STRATHLYDE, 2002. Energy Systems Research Unit. . S.l.:

US ENERGY INFORMATION ADMINISTRATION, 2012a. Annual Energy Outlook 2012. [en línea]. S.l.: Disponible en: [https://www.eia.gov/outlooks/aeo/pdf/0383\(2012\).pdf](https://www.eia.gov/outlooks/aeo/pdf/0383(2012).pdf).

US ENERGY INFORMATION ADMINISTRATION, 2012b. Annual Energy Review 2011. [en línea]. S.l.: [Consulta: 25 diciembre 2019]. Disponible en: <http://www.eia.gov/totalenergy/data/monthly>.

- USGBC, 2019. U.S. Green Building Council. [en línea]. [Consulta: 26 septiembre 2019]. Disponible en: <https://www.usgbc.org/projects>.
- VAN DRONKELAAR, C., DOWSON, M., SPATARU, C. y MUMOVIC, D., 2016. A Review of the Regulatory Energy Performance Gap and Its Underlying Causes in Non-domestic Buildings. *Frontiers in Mechanical Engineering* [en línea], vol. 1, no. January, pp. 1-14. ISSN 2297-3079. DOI 10.3389/fmech.2015.00017. Disponible en: <http://journal.frontiersin.org/Article/10.3389/fmech.2015.00017/abstract>.
- VÁSQUEZ, C., DALENCON, R. y ENCINAS, F., 2015. ENERGY PERFORMANCE OF OFFICE BUILDING IN SANTIAGO , CHILE : Results of unregulated environmental building standards in a high radiation climate. *Plea 2015 Bologna: Architecture in (R)evolution*, no. August. DOI 10.13140/RG.2.1.2044.0809.
- VON BORGSTEDT, C., ANDERSSON, M. y JOHNSON, F., 2013. Public attitudes to climate change and carbon mitigation-Implications for energy-associated behaviours. *Energy Policy* [en línea], vol. 57, pp. 182-193. ISSN 03014215. DOI 10.1016/j.enpol.2013.01.051. Disponible en: <http://dx.doi.org/10.1016/j.enpol.2013.01.051>.
- WINKELMANN, P.C., BIRDSALL, B.E., BUHL, W.P., ELLINGTON, K.L., ERDEM, A.E., HIRSCH, J.J. y GATES, S.D., 1993. DOE-2 SUPPLEMENT. . S.I.:
- YAN, D., BRIEN, W.O., HONG, T., FENG, X., GUNAY, H.B., TAHMASEBI, F. y MAHDAVI, A., 2015. Occupant behavior modeling for building performance simulation : Current state and future challenges. *Energy & Buildings* [en línea], vol. 107, pp. 264-278. ISSN 0378-7788. DOI 10.1016/j.enbuild.2015.08.032. Disponible en: <http://dx.doi.org/10.1016/j.enbuild.2015.08.032>.
- YOUSEFI, F., GHOLIPOUR, Y. y YAN, W., 2017. A study of the impact of occupant behaviors on energy performance of building envelopes using occupants' data. *Energy and Buildings* [en línea], vol. 148, pp. 182-198. ISSN 03787788. DOI 10.1016/j.enbuild.2017.04.085. Disponible en: <http://dx.doi.org/10.1016/j.enbuild.2017.04.085>.
- YU, X., ERGAN, S. y DEDEMEN, G., 2019. A data-driven approach to extract operational signatures of HVAC systems and analyze impact on electricity consumption. *Applied Energy* [en línea], vol. 253, no. July, pp. 113497. ISSN 0306-2619. DOI 10.1016/j.apenergy.2019.113497. Disponible en:

<https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2019.113497>.

ZHANG, F., HADDAD, S., NAKISA, B., RASTGOO, M.N., CANDIDO, C., TJONDRONEGORO, D. y DE DEAR, R., 2017. The effects of higher temperature setpoints during summer on office workers' cognitive load and thermal comfort. *Building and Environment*, vol. 123, pp. 176-188. ISSN 03601323. DOI 10.1016/j.buildenv.2017.06.048.

1 ANEXOS

1.1 ANEXO A: Ilustración gráfica, modelo base de simulación Edificio M

En las siguientes

Ilustración 12, 8 y 9); se muestran vistas generales y en planta del modelo de simulación que representa al Edificio M, creado mediante el software Design Builder.

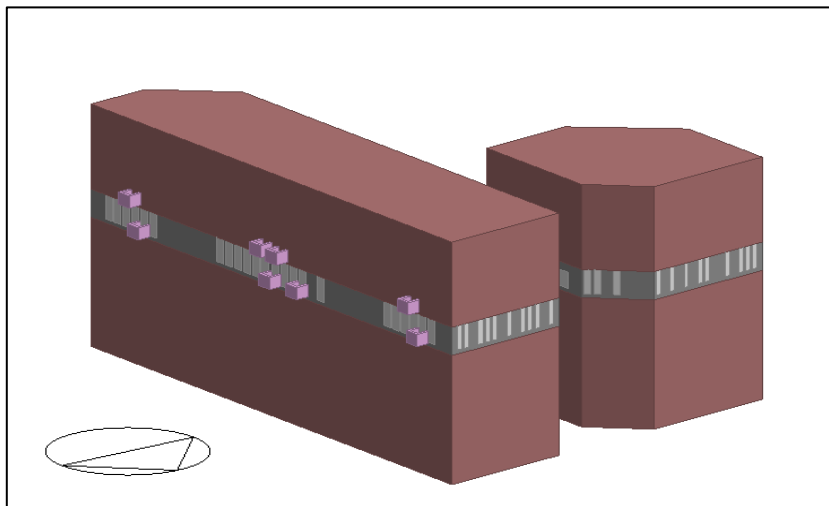


Ilustración 12. Vista general del modelo base de simulación, Edificio M

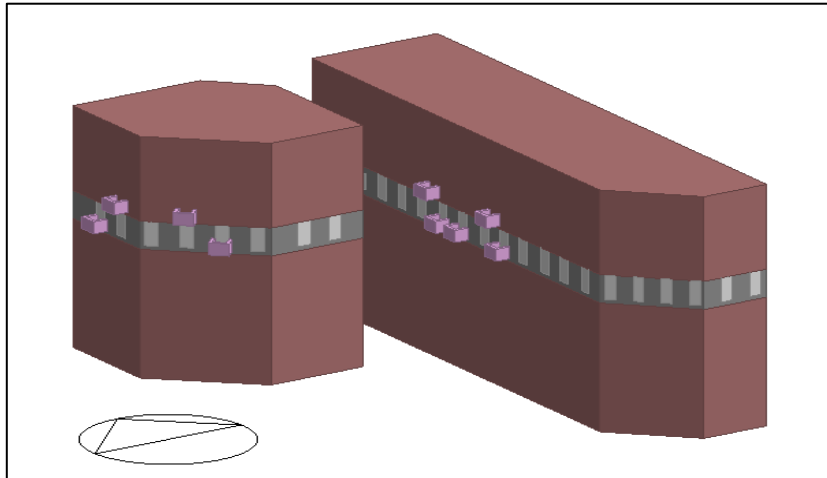


Ilustración 13. Vista general del modelo base de simulación, Edificio M

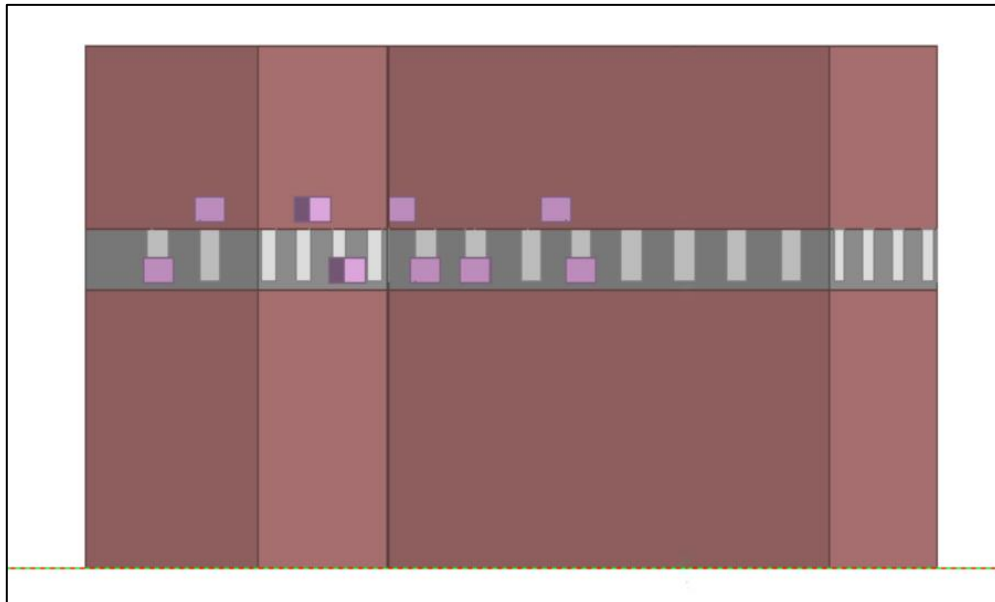


Ilustración 14. Elevación lateral del modelo base de simulación, Edificio M

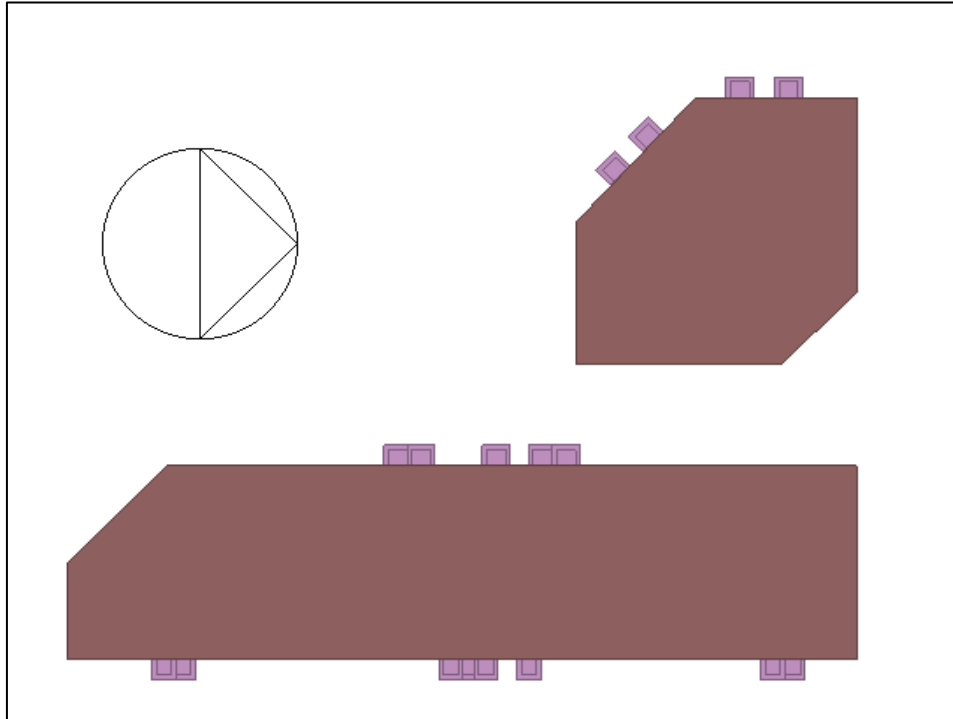


Ilustración 15. Vista en planta del modelo base de simulación, Edificio M

1.2 ANEXO B: Ilustración gráfica, modelo base de simulación Edificio P

En las siguientes

Ilustración 12, 13, 14, 15 y 16; se muestran vistas generales y en planta del modelo de simulación que representa al Edificio P, creado mediante el software Design Builder.

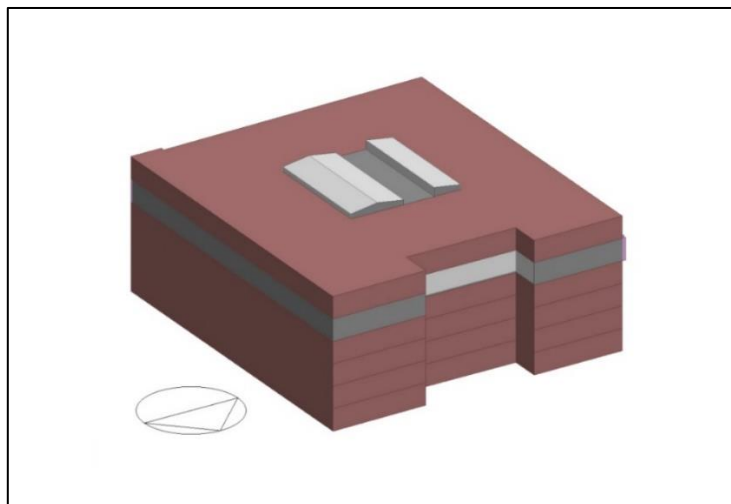


Ilustración 16. Vista general del modelo base de simulación, Edificio P

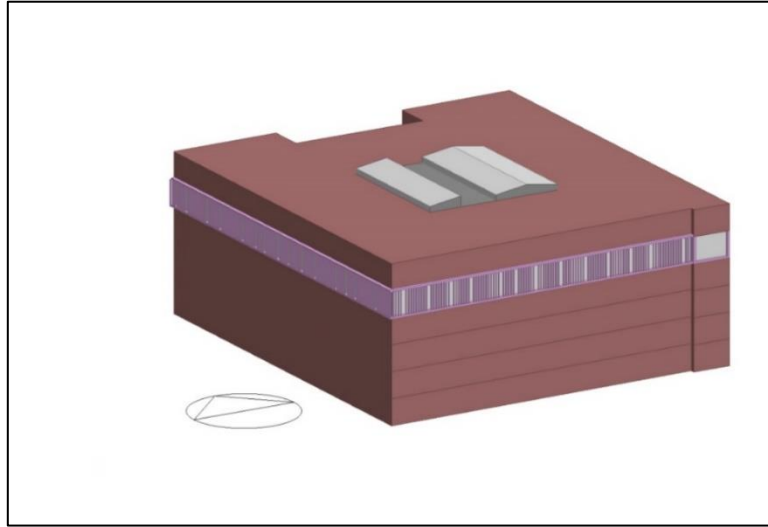


Ilustración 17. Vista general del modelo base de simulación, Edificio P

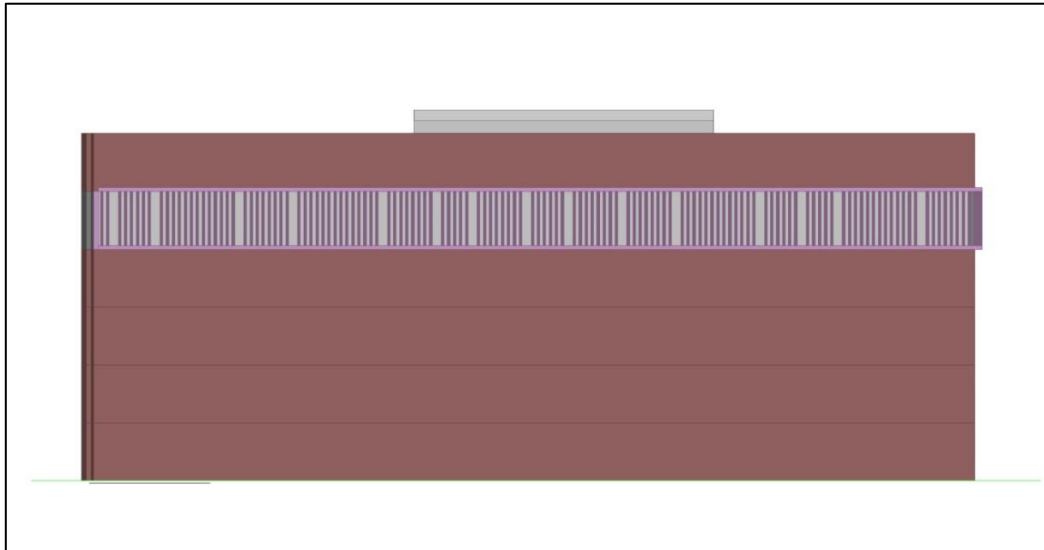


Ilustración 18. Elevación lateral del modelo base de simulación, Edificio P

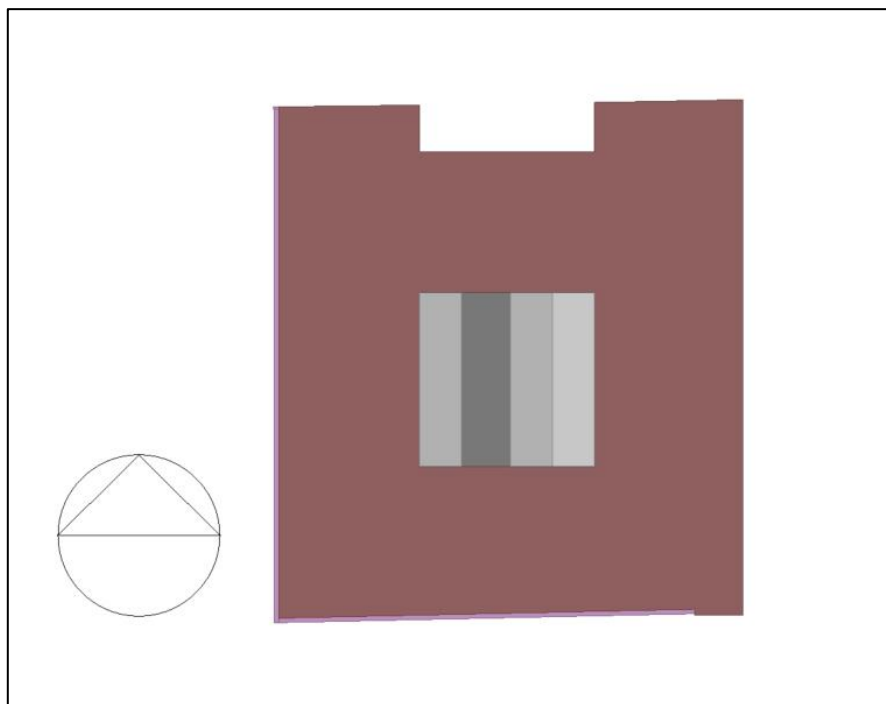


Ilustración 19. Vista en planta del modelo base de simulación, Edificio P

1.3 ANEXO C: Resultados de simulación inicial: Caso Base

1.3.1 Edificio M

Tabla 15. Valores de demanda energética y confort térmico mensuales obtenidos de la simulación inicial, Edificio M

Mes	Demanda calefacción [kWh]	Demanda calefacción [kWh]	Demanda refrigeración [kWh/m2]	Demanda refrigeración [kWh/m2]	Horas discomfort [hr]
Ene	0	0,0	7.536	9,5	9
Feb	0	0,0	5.366	6,8	1
Mar	2	0,0	3.101	3,9	3
Abr	396	0,5	596	0,8	6
May	3.061	3,9	5	0,0	0
Jun	4.757	6,0	0	0,0	0
Jul	7.182	9,0	0	0,0	0
Ago	4.770	6,0	0	0,0	0
Sep	2.088	2,6	0	0,0	0
Oct	728	0,9	397	0,5	0
Nov	36	0,0	2.610	3,3	3
Dic	0	0,0	5.671	7,1	1
Total año	23.021	29,0	25.281	31,8	23

Tabla 16. Valores de ambiente interior y exterior obtenidos en simulación inicial, Edificio M

Mes	Humedad relativa [%]	Temperatura exterior [°C]	Temperatura radiante [°C]	Temperatura aire [°C]	Temperatura operativa [°C]
Ene	53,5	21,0	25,7	23,6	24,6
Feb	51,3	20,3	25,5	23,5	24,5
Mar	48,8	17,9	24,7	23,8	24,3
Abr	51,7	14,1	22,9	23,2	23,1
May	47,2	11,0	21,0	22,1	21,5
Jun	44,0	9,1	20,3	21,8	21,1
Jul	42,2	7,6	20,1	21,9	21,0
Ago	43,2	9,3	20,4	21,8	21,1
Sep	46,8	11,4	21,2	21,9	21,5
Oct	43,7	14,4	22,6	22,9	22,8
Nov	49,6	17,1	24,5	23,7	24,1
Dic	48,9	20,2	25,4	23,6	24,5

1.3.2 Edificio P

Tabla 17. Valores de demanda energética y confort térmico mensuales obtenidos de la simulación inicial, Edificio P

Mes	Demanda calefacción [kWh]	Demanda calefacción [kWh]	Demanda refrigeración [kWh/m2]	Demanda refrigeración [kWh/m2]	Horas discomfort [hr]
Ene	1.671	1,2	9.819	6,9	26
Feb	2.101	1,5	7.295	5,1	1
Mar	3.009	2,1	4.321	3,0	3
Abr	6.548	4,6	1.468	1,0	3
May	13.583	9,6	199	0,1	1
Jun	15.869	11,2	21	0,0	2
Jul	22.493	15,9	7	0,0	10
Ago	16.702	11,8	45	0,0	1
Sep	10.954	7,7	103	0,1	1
Oct	7.459	5,3	942	0,7	0
Nov	2.987	2,1	3.777	2,7	4
Dic	1.531	1,1	7.863	5,5	1
Total año	104.906	74,0	35.859	25,3	54

Tabla 18. Valores de ambiente interior y exterior obtenidos en simulación inicial, Edificio P

Mes	Humedad relativa [%]	Temperatura exterior [°C]	Temperatura radiante [°C]	Temperatura aire [°C]	Temperatura operativa [°C]
Ene	53,5	21,0	26,2	24,4	25,3
Feb	48,9	20,3	25,9	24,3	25,1
Mar	47,6	17,9	25,5	24,1	24,8
Abr	50,4	14,1	23,4	23,4	23,4
May	44,4	11,0	21,4	22,9	22,1
Jun	41,3	9,1	20,6	22,6	21,6
Jul	39,8	7,6	20,1	22,5	21,3
Ago	40,4	9,3	21,0	22,6	21,8
Sep	43,8	11,4	22,1	22,8	22,5
Oct	41,8	14,4	23,5	23,3	23,4
Nov	48,4	17,1	25,5	24,0	24,8
Dic	46,5	20,2	26,0	24,4	25,2

1.4 ANEXO D: Resultados Simulación: Modificación temperatura de setpoint

1.4.1 Edificio M

Tabla 19. Valores de demanda energética y confort térmico obtenidos por simulación paramétrica, Edificio M

Escenario	Setpoint calefacción [°C]	Setpoint refrigeración [°C]	Demanda energética [kWh]	Horas discomfort [hr]	Tiempo en confort [%]	Ahorro energético [%]
Base	21,0	24,5	48.301,5	23,4	99%	0%
1	20,5	24,5	46.480,7	139,1	93%	4%
2	21,0	25,0	46.309,7	29,1	98%	4%
3	20,0	24,5	44.789,4	405,2	79%	7%
4	20,5	25,0	44.505,9	144,7	92%	8%
5	21,0	25,5	44.427,7	36,6	98%	8%
6	19,5	24,5	43.228,6	436,7	77%	11%
7	20,0	25,0	42.823,3	410,5	79%	11%
8	21,0	26,0	42.642,9	41,4	98%	12%
9	20,5	25,5	42.633,0	152,2	92%	12%
10	19,0	24,5	41.814,6	456,0	76%	13%
11	19,5	25,0	41.270,0	441,7	77%	15%
12	21,0	26,5	40.989,2	51,8	97%	15%
13	20,0	25,5	40.957,3	417,8	78%	15%
14	20,5	26,0	40.856,4	157,0	92%	15%
15	18,5	24,5	40.526,1	468,5	76%	16%
16	19,0	25,0	39.860,0	461,1	76%	17%
17	21,0	27,0	39.502,9	184,2	90%	18%
18	19,5	25,5	39.407,7	449,0	77%	18%
19	18,0	24,5	39.364,1	475,6	75%	19%
20	20,5	26,5	39.209,5	167,3	91%	19%
21	20,0	26,0	39.186,6	422,3	78%	19%
22	18,5	25,0	38.574,5	473,6	75%	20%
23	17,5	24,5	38.337,7	480,4	75%	21%
24	21,0	27,5	38.132,8	331,5	83%	21%
25	19,0	25,5	38.000,9	468,2	76%	21%
26	20,5	27,0	37.726,3	299,7	84%	22%
27	19,5	26,0	37.641,7	453,6	76%	22%
28	20,0	26,5	37.544,7	432,7	77%	22%

29	17,0	24,5	37.442,4	483,6	75%	22%
30	18,0	25,0	37.414,2	480,7	75%	23%
31	21,0	28,0	36.879,9	343,6	82%	24%
32	18,5	25,5	36.717,4	480,8	75%	24%
33	16,5	24,5	36.677,7	486,0	75%	24%
34	17,5	25,0	36.388,7	485,5	75%	25%
35	20,5	27,5	36.358,4	446,9	77%	25%
36	19,0	26,0	36.238,3	472,7	75%	25%
37	20,0	27,0	36.062,4	565,0	71%	25%
38	16,0	24,5	36.027,5	487,6	75%	25%
39	19,5	26,5	36.002,5	463,8	76%	25%
40	21,0	28,5	35.757,2	352,3	82%	26%
41	18,0	25,5	35.558,3	487,7	75%	26%
42	17,0	25,0	35.493,9	488,7	75%	27%
43	20,5	28,0	35.106,3	459,0	76%	27%
44	18,5	26,0	34.956,9	485,3	75%	28%
45	21,0	29,0	34.757,0	359,1	81%	28%
46	16,5	25,0	34.729,5	491,0	74%	28%
47	20,0	27,5	34.695,8	711,8	63%	28%
48	19,0	26,5	34.600,6	482,9	75%	28%
49	17,5	25,5	34.533,0	492,5	74%	29%
50	19,5	27,0	34.521,4	596,0	69%	29%
51	16,0	25,0	34.079,4	492,6	74%	29%
52	20,5	28,5	33.984,1	467,6	76%	30%
53	21,0	29,5	33.865,7	364,4	81%	30%
54	18,0	26,0	33.799,1	492,3	74%	30%
55	17,0	25,5	33.638,7	495,7	74%	30%
56	20,0	28,0	33.444,6	723,8	62%	31%
57	18,5	26,5	33.320,4	495,5	74%	31%
58	19,5	27,5	33.155,8	742,7	61%	31%
59	19,0	27,0	33.120,6	615,3	68%	31%
60	20,5	29,0	32.984,5	474,5	75%	32%
61	16,5	25,5	32.874,5	498,0	74%	32%
62	17,5	26,0	32.775,1	497,0	74%	32%
63	20,0	28,5	32.322,8	732,4	62%	33%
64	16,0	25,5	32.224,5	499,6	74%	33%
65	18,0	26,5	32.163,4	502,4	74%	33%
66	20,5	29,5	32.093,8	479,6	75%	34%
67	19,5	28,0	31.905,2	754,8	61%	34%
68	17,0	26,0	31.881,2	500,2	74%	34%

69	18,5	27,0	31.840,9	627,7	67%	34%
70	19,0	27,5	31.755,8	762,0	60%	34%
71	20,0	29,0	31.323,9	739,2	61%	35%
72	17,5	26,5	31.139,6	507,2	74%	36%
73	16,5	26,0	31.117,2	502,5	74%	36%
74	19,5	28,5	30.783,7	763,3	60%	36%
75	18,0	27,0	30.684,2	634,6	67%	36%
76	19,0	28,0	30.505,5	774,0	60%	37%
77	18,5	27,5	30.476,6	774,3	60%	37%
78	16,0	26,0	30.467,3	504,2	74%	37%
79	20,0	29,5	30.433,4	744,4	61%	37%
80	17,0	26,5	30.246,0	510,3	73%	37%
81	19,5	29,0	29.784,5	770,2	60%	38%
82	17,5	27,0	29.660,7	639,4	67%	39%
83	16,5	26,5	29.482,2	512,7	73%	39%
84	19,0	28,5	29.384,3	782,6	59%	39%
85	18,0	27,5	29.320,2	781,1	59%	39%
86	18,5	28,0	29.226,5	786,4	59%	39%
87	19,5	29,5	28.894,1	775,3	60%	40%
88	16,0	26,5	28.832,3	514,4	73%	40%
89	17,0	27,0	28.767,2	642,5	67%	40%
90	19,0	29,0	28.385,2	789,4	59%	41%
91	17,5	27,5	28.296,9	785,8	59%	41%
92	18,5	28,5	28.105,5	794,9	59%	42%
93	18,0	28,0	28.070,3	793,2	59%	42%
94	16,5	27,0	28.003,4	644,8	66%	42%
95	19,0	29,5	27.494,7	794,5	59%	43%
96	17,0	27,5	27.403,5	789,0	59%	43%
97	16,0	27,0	27.353,6	646,4	66%	43%
98	18,5	29,0	27.106,3	801,8	58%	44%
99	17,5	28,0	27.047,0	797,9	58%	44%
100	18,0	28,5	26.949,3	801,7	58%	44%
101	16,5	27,5	26.639,8	791,3	59%	45%
102	18,5	29,5	26.216,1	806,8	58%	46%
103	17,0	28,0	26.153,8	801,1	58%	46%
104	16,0	27,5	25.990,0	792,9	59%	46%
105	18,0	29,0	25.950,2	808,5	58%	46%
106	17,5	28,5	25.926,1	806,4	58%	46%
107	16,5	28,0	25.390,1	803,4	58%	47%
108	18,0	29,5	25.060,0	813,6	58%	48%

109	17,0	28,5	25.032,9	809,6	58%	48%
110	17,5	29,0	24.927,1	813,2	58%	48%
111	16,0	28,0	24.740,3	805,0	58%	49%
112	16,5	28,5	24.269,2	811,9	58%	50%
113	17,5	29,5	24.036,9	818,3	57%	50%
114	17,0	29,0	24.033,9	816,4	57%	50%
115	16,0	28,5	23.619,4	813,5	58%	51%
116	16,5	29,0	23.270,2	818,7	57%	52%
117	17,0	29,5	23.143,7	821,5	57%	52%
118	16,0	29,0	22.620,4	820,3	57%	53%
119	16,5	29,5	22.380,0	823,8	57%	54%
120	16,0	29,5	21.730,3	825,4	57%	55%

1.4.2 Edificio P

Tabla 20. Valores de demanda energética y confort térmico obtenidos por simulación paramétrica, Edificio P

Escenario	Setpoint calefacción [°C]	Setpoint refrigeración [°C]	Demanda energética [kWh]	Horas discomfort [hr]	Tiempo en confort [%]	Ahorro energético [%]
Base	22,5	24,5	140.745	54	97%	0%
1	22,5	25,0	136.202	63	97%	3%
2	22,5	25,5	132.118	83	96%	6%
3	22,0	24,5	132.099	96	95%	6%
4	22,0	25,0	127.671	105	95%	9%
5	22,5	26,0	128.434	113	94%	9%
6	22,0	25,5	123.680	124	94%	12%
7	22,5	26,5	125.081	139	93%	11%
8	22,0	26,0	120.055	153	92%	15%
9	22,0	26,5	116.739	179	91%	17%
10	22,5	27,0	122.034	180	91%	13%
11	21,5	24,5	123.810	192	90%	12%
12	21,5	25,0	119.482	200	90%	15%
13	22,0	27,0	113.738	213	89%	19%
14	21,5	25,5	115.571	218	89%	18%
15	21,5	26,0	112.003	247	87%	20%
16	22,5	27,5	119.325	251	87%	15%
17	21,5	26,5	108.723	271	86%	23%
18	22,0	27,5	111.071	282	85%	21%
19	22,5	28,0	116.981	283	85%	17%
20	22,5	28,5	115.020	296	85%	18%
21	21,5	27,0	105.773	302	84%	25%
22	22,5	29,0	113.399	302	84%	19%
23	22,5	29,5	112.092	305	84%	20%
24	22,0	28,0	108.786	317	83%	23%
25	22,0	28,5	106.870	329	83%	24%
26	22,0	29,0	105.298	336	83%	25%
27	22,0	29,5	104.036	340	82%	26%
28	21,0	24,5	115.880	356	81%	18%

29	21,0	25,0	111.637	363	81%	21%
30	21,5	27,5	103.170	365	81%	27%
31	21,0	25,5	107.808	380	80%	23%
32	21,5	28,0	100.937	404	79%	28%
33	21,0	26,0	104.299	408	79%	26%
34	21,5	28,5	99.085	417	78%	30%
35	21,5	29,0	97.562	422	78%	31%
36	21,5	29,5	96.343	427	78%	32%
37	21,0	26,5	101.080	432	77%	28%
38	21,0	27,0	98.183	460	76%	30%
39	20,5	24,5	108.341	479	75%	23%
40	20,5	25,0	104.216	486	75%	26%
41	20,5	25,5	100.463	502	74%	29%
42	21,0	27,5	95.656	518	73%	32%
43	20,5	26,0	97.027	529	72%	31%
44	20,0	24,5	101.283	548	71%	28%
45	20,5	26,5	93.870	554	71%	33%
46	20,0	25,0	97.256	554	71%	31%
47	21,0	28,0	93.490	562	71%	34%
48	20,0	25,5	93.574	569	70%	34%
49	21,0	28,5	91.693	575	70%	35%
50	20,5	27,0	91.031	580	70%	35%
51	21,0	29,0	90.218	580	70%	36%
52	21,0	29,5	89.041	584	70%	37%
53	19,5	24,5	94.685	593	69%	33%
54	20,0	26,0	90.192	596	69%	36%
55	19,5	25,0	90.745	599	69%	36%
56	19,5	25,5	87.146	613	68%	38%
57	20,0	26,5	87.095	620	68%	38%
58	19,0	24,5	88.594	623	68%	37%
59	19,0	25,0	84.718	630	67%	40%
60	20,5	27,5	88.569	632	67%	37%
61	19,5	26,0	83.826	639	67%	40%
62	18,5	24,5	82.968	642	67%	41%
63	19,0	25,5	81.182	642	67%	42%
64	20,0	27,0	84.326	645	66%	40%
65	18,5	25,0	79.165	647	66%	44%
66	18,0	24,5	77.839	655	66%	45%
67	18,5	25,5	75.685	659	66%	46%
68	18,0	25,0	74.087	661	66%	47%

69	19,5	26,5	80.795	664	65%	43%
70	17,5	24,5	73.150	665	65%	48%
71	19,0	26,0	77.911	668	65%	45%
72	17,5	25,0	69.437	669	65%	51%
73	18,0	25,5	70.665	673	65%	50%
74	20,5	28,0	86.471	680	65%	39%
75	17,5	25,5	66.050	682	64%	53%
76	18,5	26,0	72.470	685	64%	49%
77	19,5	27,0	78.087	688	64%	45%
78	20,5	28,5	84.723	692	64%	40%
79	19,0	26,5	74.935	693	64%	47%
80	20,0	27,5	81.930	694	64%	42%
81	20,5	29,0	83.288	698	64%	41%
82	18,0	26,0	67.494	698	64%	52%
83	20,5	29,5	82.144	701	63%	42%
84	17,5	26,0	62.912	707	63%	55%
85	18,5	26,5	69.550	710	63%	51%
86	19,0	27,0	72.288	717	63%	49%
87	18,0	26,5	64.606	722	62%	54%
88	17,5	26,5	60.054	731	62%	57%
89	19,5	27,5	75.741	734	62%	46%
90	18,5	27,0	66.952	734	62%	52%
91	20,0	28,0	79.889	743	61%	43%
92	18,0	27,0	62.041	745	61%	56%
93	17,5	27,0	57.511	754	61%	59%
94	20,0	28,5	78.195	757	61%	44%
95	19,0	27,5	69.992	760	60%	50%
96	20,0	29,0	76.801	763	60%	45%
97	20,0	29,5	75.696	765	60%	46%
98	18,5	27,5	64.695	776	60%	54%
99	19,5	28,0	73.750	782	59%	48%
100	18,0	27,5	59.807	788	59%	58%
101	17,5	27,5	55.303	796	59%	61%
102	19,5	28,5	72.096	798	58%	49%
103	19,5	29,0	70.735	804	58%	50%
104	19,5	29,5	69.655	806	58%	51%
105	19,0	28,0	68.042	807	58%	52%
106	18,5	28,0	62.779	822	57%	55%
107	19,0	28,5	66.427	825	57%	53%
108	19,0	29,0	65.091	830	57%	54%

109	18,0	28,0	57.912	833	57%	59%
110	19,0	29,5	64.034	834	57%	55%
111	18,5	28,5	61.181	840	56%	57%
112	17,5	28,0	53.422	840	56%	62%
113	18,5	29,0	59.863	845	56%	57%
114	18,5	29,5	58.819	849	56%	58%
115	18,0	28,5	56.332	851	56%	60%
116	18,0	29,0	55.025	856	55%	61%
117	17,5	28,5	51.855	858	55%	63%
118	18,0	29,5	53.991	861	55%	62%
119	17,5	29,0	50.554	863	55%	64%
120	17,5	29,5	49.526	867	55%	65%