



Facultad de Ingeniería

Escuela de Ingeniería en Construcción

**Evaluación de la influencia de la materialidad
de la envolvente, en la demanda termo-
energética. Caso de estudio: Facultad de
Ingeniería de la Universidad de Valparaíso**

por

Oswaldo Andrés Álvarez Lemunao

Trabajo de Título para optar al Grado de Licenciado en
Ciencias de la Ingeniería en Construcción y al Título de
Ingeniero Constructor

Prof. Guía: Claudio Carrasco

Noviembre, 2018

Agradecimientos

“A mi familia, a las maestras, y maestros que me ayudaron”

Índice

Glosario	5
Lista de figuras	7
Listado de Ecuaciones	9
Lista de tablas	10
Resumen	11
1. Introducción	12
1.1. <i>Objetivos</i>	13
1.1.1. <i>Objetivo General</i>	13
1.1.2. <i>Objetivos Específicos</i>	13
1.2. <i>Alcances y Limitaciones</i>	14
2. Antecedentes	15
2.1. <i>Edificio Hucke</i>	19
3. Marco teórico	21
3.1. <i>Termodinámica</i>	21
3.1.1. <i>Leyes de la termodinámica</i>	21
3.1.2. <i>Mecanismos de transferencia de calor</i>	24
3.2. <i>Energía, entorno y envolvente</i>	32
3.2.1. <i>Radiación solar</i>	32
3.2.1. <i>Orientación</i>	35
3.2.2. <i>Temperatura</i>	36
3.2.3. <i>Movimiento del aire (viento)</i>	37
3.2.4. <i>Humedad relativa</i>	37
3.2.5. <i>Envolvente</i>	38
3.2.6. <i>Puentes térmicos</i>	41
3.3. <i>Sistemas de evaluación de eficiencia energética</i>	43
3.3.1. <i>PassivHaus</i>	43
3.3.2. <i>Certificación Edificio Sustentable (CES)</i>	44
3.3.3. <i>LEED</i>	45
3.4. <i>Estimación de las cargas térmicas de refrigeración y calefacción</i>	49
3.5. <i>Simulación Energética</i>	52
3.5.1. <i>Metodologías para la simulación energética</i>	54
3.5.2. <i>Programas informáticos</i>	62
3.6. <i>Demanda y simulación energética en la literatura</i>	66
3.7. <i>Metodología</i>	77
3.7.1. <i>Determinar la demanda termo-energética</i>	77
3.7.2. <i>Proposición y evaluación de reformas en la materialidad de la envolvente</i>	84

4.	Simulación energética.....	85
4.1.	<i>Registros Climatológicos.....</i>	85
4.2.	<i>Definición Geométrica</i>	86
4.3.	<i>Definición Material.....</i>	89
4.4.	<i>Identificación de los puentes térmicos.....</i>	90
4.5.	<i>Definición de la transmitancia térmica en elementos con puentes térmicos.....</i>	95
4.6.	<i>Clasificación de los recintos</i>	101
4.7.	<i>Condiciones térmicas internas</i>	102
4.8.	<i>Simulación mediante programa informático</i>	105
5.	Análisis de los resultados.....	106
5.1.	<i>Determinación de la demanda termo-energética.</i>	106
5.2.	<i>Proposición de reformas en la materialidad de la envolvente.</i>	110
5.3.	<i>Evaluación de reformas en la materialidad de la envolvente.</i>	116
6.	Conclusiones y recomendaciones	127
7.	Anexos	132
7.1.	<i>Definición material.....</i>	132
7.2.	<i>Definición de la transmitancia térmica.....</i>	133
7.3.	<i>Análisis de los valores de transmitancia térmica</i>	146
7.4.	<i>Sectorización climático-habitacional de la region de Valparaíso (Sepúlveda, 2003).....</i>	147
8.	Bibliografía	148

Glosario

Azimut: Es el ángulo de una dirección contado en el sentido de las agujas del reloj a partir del norte geográfico.

Cénit: Zenith. Intersección de la vertical de un lugar y la esfera celeste. Punto más alto en el cielo con relación al observador, que se encuentra justo sobre su cabeza (90°).

Conductividad térmica (λ): Propiedad que describe la cantidad de energía que fluye durante 1 segundo a través de 1m² de material, que tiene 1m de espesor, cuando existe una diferencia de temperatura de 1°K entre las dos caras.

Condensación intersticial: Cambio de fase de vapor acuoso a líquido que se produce en el interior de un elemento constructivo, cuando éste se encuentra bajo la temperatura de punto de rocío.

Condensación superficial: Cambio de fase de vapor acuoso a líquido que se produce en la superficie de un elemento constructivo, cuando éste se encuentra bajo la temperatura de punto de rocío.

Condiciones psicrométricas: Condiciones de temperatura y cantidad vapor de agua, presentes en el aire.

Confort higro-térmico: manifestación subjetiva de conformidad o satisfacción con el ambiente térmico existente.

Demanda termo-energética: Es la cantidad de energía (en kWh/m²a) requerida para calefaccionar o refrigerar un espacio o edificio, para compensar el efecto de las cargas térmicas y mantener una condición de temperatura o confort térmico interior en base a los requerimientos individuales de cada espacio. Se diferencia del consumo energético en que este último resulta ser mayor al considerar la energía efectiva utilizada para cumplir ese objetivo, al incorporar en el cálculo energético la eficiencia del sistema.

Consumo termo-energético: Es la energía que consumen los sistemas de acondicionamiento térmico, la cual depende tanto de la demanda termo-energética como también de la eficiencia o desempeño de los sistemas de un edificio.

Envolvente: el conjunto de elementos y componentes constructivos que limitan térmicamente los espacios interiores de las condiciones del ambiente exterior de un edificio, definiendo el grado y forma de interacción entre ellos. Está constituida principalmente por los elementos de techumbre, muros, pisos y ventanas.

Esfera celeste: La esfera celeste o bóveda celeste es una esfera ideal, sin radio definido, concéntrica con el globo terrestre, en la cual aparentemente se mueven los astros.

Humedad relativa del aire: La humedad relativa es la relación porcentual entre la cantidad de vapor de agua real que contiene el aire y la que necesitaría contener para saturarse a idéntica temperatura.

Imagen termográfica o termografía: Imagen producida por un sistema un sistema sensible a la radiación infrarroja y que representa la distribución de temperatura radiante aparente sobre una superficie.

Modelo Paramétrico: Representación computacional de una estructura por medio de información geométrica y no geométrica

Puente Térmico: Aquella parte de un elemento constructivo en que su resistencia térmica, normalmente uniforme, se ve significativamente disminuida.

Punto de Rocío: Temperatura en la que el vapor de agua contenido en el aire inicia el proceso de condensación debido a que alcanza la saturación.

Resistencia térmica (R): Es la oposición que hace un cuerpo al paso de energía, es la propiedad inversa a la conductividad, es decir, $1/\lambda$.

Simulación dinámica: La simulación térmica dinámica es una predicción de las condiciones ambientales internas del espacio con resultados horarios en el periodo de un año completo.

Sustentable: Que satisface las necesidades del presente, sin comprometer las posibilidades de las generaciones futuras para satisfacer sus propias necesidades.

Temperatura radiante: cuantificación del calor que emiten por radiación los elementos del entorno.

Transmitancia térmica (U): También conocido como valor U, se refiere al flujo de calor que pasa por unidad de área de un elemento constructivo y por el grado de diferencia de temperatura entre dos ambientes que se encuentran separados por dicho elemento.

Valor U: Valor de la transmitancia térmica.

Lista de figuras

Figura 2.1.1 Edificio Hucke en Revista Sucesos.	19
Figura 2.1.2 Edificio Hucke en la actualidad.	20
Figura 3.1.1 Dos cuerpos alcanzan el equilibrio térmico.	21
Figura 3.1.2 Aumento de entropía durante una transferencia de calor.	23
Figura 3.1.3 Conducción de calor a través de un sólido en el cual el descenso de temperatura se comporta de manera lineal.	25
Figura 3.1.4 Convección forzada y convección natural.	27
Figura 3.1.5 Convección de aire en una habitación debido a un radiador.	28
Figura 3.1.6 Diagrama del calor absorbido y reflejado.	30
Figura 3.2.1 Transmisión de la radiación solar hacia la tierra.	33
Figura 3.2.2 Trayectoria solar.	33
Figura 3.2.3 Envolvente de un edificio.	38
Figura 3.4.1 Componentes del calor en del balance térmico en una edificación.	49
Figura 3.5.1 Fenómenos de Transferencia de Calor.	52
Figura 3.6.1 Demandas de climatización en kWh/m ² -año para el Edificio 1.	68
Figura 3.6.2 Demandas de climatización en kWh/m ² -año para el Edificio 2.	69
Figura 3.6.3 Demandas de climatización en kWh/m ² -año para el Edificio 3.	71
Figura 3.6.4 Coeficientes de correlación (r) con respecto a la demanda de enfriamiento para las variables estudiadas.	73
Figura 3.6.5 Demanda de enfriamiento anual con respecto al tipo de vidrio en términos de frecuencia acumulada.	74
Figura 3.7.1 Información del sitio de la estación meteorológica.	77
Figura 3.7.2 Cámara termográfica DALI T31.	79
Figura 3.7.3 Flujograma de la metodología.	84
Figura 4.1.1 Temperaturas promedio mensuales de bulbo seco del archivo climático.	85
Figura 4.2.1 Emplazamiento de la Facultad de Ingeniería.	86
Figura 4.2.2 Datos de ubicación en DesignBuilder.	86
Figura 4.2.3 Plano de la Facultad de Ingeniería de la Universidad de Valparaíso.	87
Figura 4.2.4. Plano del primer nivel ingresado en DesignBuilder.	88
Figura 4.2.5 Modelo geométrico 3D del edificio de la facultad de Ingeniería de la Universidad de Valparaíso.	88
Figura 4.3.1 Definición de materiales en DesignBuilder.	89
Figura 4.4.1 Configuración de la albañilería confinada por los perfiles metálicos.	90
Figura 4.4.2 Fachada oriente.	91
Figura 4.4.3 Termografía fachada oriente.	91
Figura 4.4.4 Perfiles estructurales fachada oriente.	92
Figura 4.4.5 Puente térmico fachada oriente.	92
Figura 4.4.6 Puente térmico al interior del edificio.	93
Figura 4.4.7 Puente térmico al interior del edificio perdiendo calor.	93
Figura 4.4.8 Puente térmico al interior del edificio ganando calor.	94
Figura 4.5.1 Simulación del área sin puente térmico en THERM.	96
Figura 4.5.2 Simulación del área con puente térmico con THERM.	96
Figura 4.5.3 Transmitancia térmica del cerramiento con el efecto del puente térmico.	98
Figura 4.5.4 Fachada oriente de la facultad de ingeniería de la universidad de Valparaíso.	99
Figura 4.7.1 Ganancias internas por ocupación.	102
Figura 4.7.2 Distribución de espacios en el modelo del edificio.	102
Figura 4.7.3 Datos del modelo para oficinas.	103
Figura 4.7.4 Ganancias por equipos para salas de clases.	103
Figura 4.7.5 Aire exterior mínimo para salas de clases e infiltraciones.	103

Figura 4.7.6 Perfil de programación del edificio.	104
Figura 4.8.1 Opciones de la simulación.	105
Figura 5.1.1 Demanda de refrigeración	106
Figura 5.1.2 Ganancias internas.....	107
Figura 5.1.3 Ganancias internas y solares mensuales.	107
Figura 5.1.4 Pérdidas y ganancias a través de los cerramientos.	108
Figura 5.1.5 Demanda de calefacción	109
Figura 5.1.6 Modelo de la facultad.....	109
Figura 5.2.1 Plantilla de datos de vidrios en DesignBuilder.	111
Figura 5.2.2 Funcionamiento de los vidrios Low - E.....	112
Figura 5.2.3 Valor U para ventana con vidrio simple.	112
Figura 5.2.4 Valor U para ventana con DVH con Low - E.....	113
Figura 5.2.5 Calculo de transmitancias y calor mediante THERM.	114
Figura 5.3.1 Demandas de calefacción (izquierda) y refrigeración (derecha) en kWh/m ² x mes del Escenario 01.....	116
Figura 5.3.2 Demandas de calefacción (izquierda) y refrigeración (derecha) en kWh/m ² x mes del Escenario 02.....	117
Figura 5.3.3 Demandas de calefacción (izquierda) y refrigeración (derecha) en kWh/m ² x mes del Escenario 03.....	117
Figura 5.3.4 Demandas de calefacción (izquierda) y refrigeración (derecha) en kWh/m ² x mes del Escenario 04.....	118
Figura 5.3.5 Demandas de calefacción (izquierda) y refrigeración (derecha) en kWh/m ² x mes del Escenario 05.....	119
Figura 5.3.6 Demandas de calefacción (izquierda) y refrigeración (derecha) en kWh/m ² x mes del Escenario 06.....	120
Figura 5.3.7 Demandas de calefacción (izquierda) y refrigeración (derecha) en kWh/m ² x mes del Escenario 07.....	121
Figura 5.3.8 Demandas de calefacción (izquierda) y refrigeración (derecha) en kWh/m ² x mes del Escenario 08.....	122
Figura 5.3.9 Demandas de calefacción (izquierda) y refrigeración (derecha) en kWh/m ² x mes del Escenario 09.....	123
Figura 5.3.10 Resultado de los Escenarios (kWh/m ² x año).	124
Figura 5.3.11 Comparación de ganancias solares por año.	125
Figura 5.3.12 Comparación de ganancias solares mensuales.	125
Figura 5.3.13 Comparación de pérdidas de calor a través de la envolvente por año.	126
Figura 7.2.1 Plano del primer nivel del edificio en estudio de la Universidad de Valparaíso.....	135
Figura 7.2.2 Configuración de los muros perimetrales de albañilería.	136
Figura 7.2.3 Configuración de la albañilería con los refuerzos metálicos.....	136
Figura 7.2.4 Cálculo de transmitancia mediante THERM.	137
Figura 7.2.5 Solución constructiva en base a ladrillo artesanal y estuco en una cara.	138
Figura 7.2.6 Transmitancia térmica del cerramiento con el efecto del puente térmico.	139
Figura 7.2.7 Corte tabique interior.	141
Figura 7.3.1 Zonificación Climática.....	146
Figura 7.4.1 Valor promedio mensual y anual de las variables climáticas para la ciudad de Valparaíso.	147

Listado de Ecuaciones

Ecuación 3.1.1 Cambio en la energía interna de un sistema debido al calor y trabajo.	22
Ecuación 3.1.2 Razón de cambio de la conducción de calor.	25
Ecuación 3.1.3 Ley de Fourier.	25
Ecuación 3.1.4 Calor emitido por un cuerpo negro de superficie A_s a una temperatura T_s	29
Ecuación 3.1.5 Calor emitido por una superficie radiante con emisividad ϵ	29
Ecuación 3.1.6 Calor absorbido por una superficie debido calor incidente y a la absorptividad de la superficie.	30
Ecuación 3.4.1 Ecuación de equilibrio térmico.	50
Ecuación 3.4.2 Ecuación del método de balance de calor para zonas interiores.	51
Ecuación 4.5.1 Calor producido por el puente térmico.	96
Ecuación 4.5.2 Transmitancia térmica lineal mediante formula del DA DB-HE/3.	96
Ecuación 4.5.3 Transmitancia térmica lineal.	97
Ecuación 4.5.4 Transmitancia térmica total considerando puentes térmicos.	97
Ecuación 7.2.1 Resistencia térmica en elementos simples.	133
Ecuación 7.2.2 Resistencia térmica total por un elemento conformado por varias capas.	133
Ecuación 7.2.3 Transmitancia térmica media de una superficie compuesta.	135
Ecuación 7.2.4 Longitud Característica B'	144

Lista de tablas

Tabla 3.6.1 Demandas de energía de acondicionamiento térmico para el Edificio 1.....	68
Tabla 3.6.2 Demandas de energía de acondicionamiento térmico para el Edificio 2.....	69
<i>Tabla 3.6.3 Demandas de energía de acondicionamiento térmico para el Edificio 3.....</i>	<i>70</i>
Tabla 3.7.1 Clasificación de los espacios.	80
Tabla 3.7.2 Calor generado por tipo de actividad.....	81
Tabla 3.7.3 Densidad Ocupacional.....	82
Tabla 4.3.1 Definición material.	89
Tabla 4.5.1 Transmitancia térmica en superficies sin puentes térmicos.	95
<i>Tabla 4.5.2 Transmitancia térmica lineal provocada por el puente térmico.....</i>	<i>98</i>
<i>Tabla 4.5.3 Transmitancia térmica total para un metro cuadrado de cerramiento con presencia de un puente térmico.</i>	<i>98</i>
Tabla 4.5.4 Transmitancia térmica total incorporando el aumento por puentes térmicos.	99
Tabla 4.5.5 Transmitancia térmica con efecto del puente térmico.	100
Tabla 4.6.1 Clasificación de los espacios.	101
Tabla 5.2.1 Propiedades térmicas y ópticas de los vidrios.	110
Tabla 5.2.2 Propiedades del mortero de vermiculita.	113
Tabla 5.2.3 Calculo de transmitancia para mortero de espesor 26 mm.	114
Tabla 5.2.4 Calculo de transmitancia para mortero de espesor 84 mm.	114
Tabla 5.2.5 Escenarios propuestos.	115
Tabla 5.2.6 Variables de los escenarios.	115
Tabla 5.3.1 Resultados del Escenario 01 en kWh/m ² x año.....	116
Tabla 5.3.2 Resultados del Escenario 02 en kWh/m ² x año.....	117
Tabla 5.3.3 Resultados del Escenario 03 en kWh/m ² x año.....	118
Tabla 5.3.4 Resultados del Escenario 04 en kWh/m ² x año.....	118
Tabla 5.3.5 Resultados del Escenario 05 en kWh/m ² x año.....	119
Tabla 5.3.6 Resultados del Escenario 06 en kWh/m ² x año.....	120
Tabla 5.3.7 Resultados del Escenario 07 en kWh/m ² x año	121
Tabla 5.3.8 Resultados del Escenario 08 en kWh/m ² x año.....	122
Tabla 5.3.9 Resultados del Escenario 09 en kWh/m ² x año.....	123
Tabla 5.3.10 Resultado de los escenarios.	124
Tabla 7.1.1 Conductividad térmica de materiales de construcción	132
Tabla 7.2.1 Resistencias térmicas de superficie en m ² x K/W.	134
Tabla 7.2.2 Transmitancia térmica ponderada de los cerramientos exteriores.....	137
Tabla 7.2.3 Transmitancia térmica lineal provocada por el puente térmico.....	138
<i>Tabla 7.2.4 Transmitancia térmica total para un metro cuadrado de cerramiento con presencia de un puente térmico.</i>	<i>139</i>
Tabla 7.2.5 Transmitancia térmica incorporando el aumento por puentes térmicos.....	139
Tabla 7.2.6 Transmitancia a través de los vidrios.	140
Tabla 7.2.7 Valor U para marcos de ventana no macizos.	140
Tabla 7.2.8 Resistencia térmica producto de la cámara de aire para flujos horizontales.....	142
Tabla 7.2.9. Transmitancia térmica en tabiques interiores.	142
Tabla 7.2.10 Resistencias térmicas para cámaras de aire no ventiladas horizontales con flujo térmico ascendente.	143
Tabla 7.2.11 Transmitancia térmica de la techumbre.....	143
Tabla 7.2.12 Resistencia térmica del suelo.....	144
Tabla 7.2.13 Longitud característica	144
Tabla 7.2.14 Transmitancia térmica para suelos enterrados.	145
Tabla 7.2.15 Transmitancia térmica en losas de entrepiso.....	145
Tabla 7.3.1 Análisis de las transmitancias térmicas de los elementos de la envolvente.....	146

Resumen

Se realizó un análisis de la influencia de la materialidad de la envolvente, en la demanda termo-energética del edificio de la Facultad de Ingeniería de la Universidad de Valparaíso, el cual fue construido 1908 e inicialmente proyectado para labores fabriles. El edificio presenta una envolvente de albañilería sin aislamiento y un elevado porcentaje de superficies acristaladas simples, incumpliendo los valores de transmitancia estipulados por la reglamentación vigente.

El estudio se realizó mediante simulación computacional con el software DesgnBuilder, utilizando como metodología la Guía técnica de apoyo número 2 del TDRe, para determinar la demanda total de climatización. Como primer objetivo se estableció la determinación de la demanda, para luego implementar reformas en la materialidad de la envolvente, motivadas por investigaciones previas e información técnica recopilada de la bibliografía. De esta manera, y a través de los resultados obtenidos, se evaluó cómo influyen las reformas, en la demanda necesaria para climatizar los ambientes.

Se obtuvieron disminuciones de la demanda termo-energética de más del 45%, en base al escenario actual, mediante la implementación de: control solar, y aislamiento en las superficies vidriadas y opacas de la envolvente. De esta manera, se concluyó que la materialidad de la envolvente en el caso estudiado, presenta una gran influencia de la demanda termo-energética, lo que conlleva, grandes potenciales de mejora para el edificio, en aras de lograr un edificio de consumo energético casi nulo, con un alto confort térmico.

Palabras claves: *materiales, envolvente, demanda termo-energética, simulación energética, puentes térmicos.*

1. Introducción

La creciente preocupación a causa de los constantes cambios climáticos a nivel mundial, han provocado que distintos actores relacionados a la industria de la construcción, centren sus esfuerzos en generar medidas que apoyen el uso eficiente de los recursos energéticos, puesto que, se ha estimado que el consumo de energía a nivel operacional requerido por las edificaciones, representa aproximadamente el 40% del consumo total a nivel mundial (Saheb et al., 2013). Muchas investigaciones han dirigido sus estudios en edificios construidos en décadas anteriores, por el interés que existe en la conservación del carácter histórico de estas estructuras, y porque habitualmente en estas, es posible encontrar problemas de climatización y confort térmico, los que generan alteraciones en el estado físico y mental de sus residentes, por lo cual, se hace necesario un mayor uso de energía para contrarrestar las deficiencias en el diseño que presentan (González et al., 2013; Martínez et al., 2016).

En aras a contribuir a un menor consumo de energía, sin descuidar un rango adecuado confort térmico, este trabajo tiene como objeto de estudio el edificio ex-Hucke, actual Facultad de Ingeniería de la Universidad de Valparaíso, el cual fue construido en 1908 y recientemente remodelado para uso académico. El objetivo de este estudio, es cuantificar los cambios en la demanda termo-energética del edificio, producto de la modificación de los materiales constructivos utilizados en su envolvente. Para conocer los alcances de estos cambios, ya que, pueden promover de manera efectiva reformas dirigidas a reducir las necesidades de climatización, y mejorar las condiciones interiores del edificio.

Por esto en las páginas siguientes, se señalan los principios físicos que rigen las interacciones de calor entre el edificio y el entorno, y, además, los principales factores que afectan a la estructura durante su etapa de operación. Posteriormente se revisan algunos de los sistemas de certificación más populares actualmente, que utilizan métodos de simulación para llevar a cabo su evaluación. Y en relación a lo anterior, se da especial atención a las metodologías utilizadas por estos organismos para llevar a cabo una simulación, de tal modo, que a través de esta investigación, se da selección a la metodología más conveniente para el caso de estudio.

Además, se presentará una recopilación bibliográfica acerca del comportamiento energético de los edificios, que reúne, la experiencia internacional de diferentes organismos y estudios realizados por diferentes autores, los que darán sustento a los objetivos de esta investigación (Bustamante et al., 2011; Charisi, 2017; FENERCOM, 2011; Hatt et al., 2012; Ribero et al., 2016). En complemento a esto, se analizan los valores de transmitancia de los elementos de la envolvente del edificio (*ver Anexo 7.4*), según la NCh 1079 Of. 2008 (INN, 2008) y el TDRé (CITECUBB, 2012).

La simulación abarca como primer objetivo específico, la determinación termo-energética del estado actual de la estructura, para luego proponer reformas en la materialidad de la envolvente, y, de esta manera, evaluar la influencia de los materiales en ella, con el propósito de dar cumplimiento al segundo objetivo específico. Finalmente, se establecen las conclusiones de la investigación para cada uno de los objetivos planteados.

1.1. Objetivos

1.1.1. Objetivo General

- Evaluar la influencia de la materialidad de la envolvente, en la demanda termo-energética de la Facultad de Ingeniería de la Universidad de Valparaíso ubicado en General Cruz 222.

1.1.2. Objetivos Específicos

- Determinar y evaluar la demanda termo-energética de la Facultad de Ingeniería de la Universidad de Valparaíso.
- Evaluar reformas de materialidad en los sistemas constructivos de la envolvente del edificio, y determinar el impacto provocado por estas reformas en la demanda termo-energética de la Facultad de Ingeniería de la Universidad de Valparaíso.

1.2. Alcances y Limitaciones

El siguiente trabajo se realizó en base a los planos y especificaciones técnicas entregados por la Unidad de Planta Física y Construcciones Universitarias (UPFYCU) de la Universidad de Valparaíso. De forma complementaria a esta información se realizaron mediciones y análisis, con el fin de elaborar un modelo representativo del edificio de la facultad de Ingeniería de la Universidad de Valparaíso, ubicado en General Cruz N° 222. Haciendo uso de esta información se realizaron los cálculos y estudios de cargas térmicas.

La realización de este estudio contempla la máxima capacidad de ocupación permitida por la Ordenanza General de Urbanismo y Construcción, debido a que se plantean reformas que buscan disminuir las demandas de calefacción y refrigeración del edificio cuando se encuentra en el caso más desfavorable.

La simulación y estimación de cargas térmicas fueron realizados con el software DesignBuilder, el cual utiliza el motor de cálculo EnergyPlus, software reconocido a nivel mundial, creado por el departamento de Energía de los Estados Unidos (DOE). La utilización de DesignBuilder se realizó utilizando una licencia estudiantil.

2. Antecedentes

“Optimizar los componentes de forma aislada tiende a empeorar todo el sistema y por consiguiente el balance. Puede hacer que un sistema sea menos eficiente, con no unir correctamente esos componentes... Si no están diseñados para trabajar juntos, tenderán a trabajar el uno contra el otro”. *Capitalismo Natural* (Hawken, Lovins, & Lovins, 1999).

El creciente consumo de energía, ha llevado a que el interés mundial sitúe su mirada en aprovechar al máximo este recurso, según la Agencia Internacional de Energía (IEA) el sector inmobiliario es responsable del 40% del consumo energético global (Saheb et al., 2013). Es por esto que iniciativas como el nZEB (Nearly Zero Energy Buildings), pretenden que todas las edificaciones pertenecientes a la Unión Europea tengan un consumo energético neto casi nulo para finales del año 2020 (Charisi, 2017).

Países como España han adoptado este enfoque, implementando desde hace ya algunos años, cambios en su legislación para abordar estas iniciativas. Específicamente la aprobación del Código Técnico de la Edificación (CTE), el cual es el marco normativo que determina las exigencias que deben cumplir los edificios en relación con los requisitos básicos de seguridad y habitabilidad, este introdujo estrictas regulaciones en el estado español, con la iniciativa de fomentar un diseño sustentable, seguro, y con altos niveles de confort, lo cual fuerza a que los inmuebles cumplan con una serie de requerimientos técnicos y ambientales, siendo una de las principales características de eficiencia energética de la estructura, la limitación de la demanda energética. Para comprobar esto, deben llevarse a cabo análisis mediante el software oficial del CTE, LIDER+CALENER, siguiendo una metodología especialmente diseñada para su uso (Fernández-Membrive et al., 2015; Ruiz & Romero, 2011). Alemania por su parte, posee su propio estándar de bajo consumo energético denominado Passivhaus, creado por Wolfgang Feist y Bo Adamson, desde 1990 ha introducido límites energéticos a las construcciones de ese país, y desde entonces ha logrado difundirse a través de las regiones de Europa central y el resto del mundo (Hatt et al., 2012). Por su parte Estados Unidos desde mediados de 1990, por medio del US Green Building Council, inicio trabajos para la creación de un sistema de calificación de edificios sostenibles, con lo cual en el año 1998 este sistema ha pasado a denominarse LEED, con el objetivo de calificar la sostenibilidad de los edificios de una forma objetiva y racional (Ribero et al., 2016).

Si bien Chile presenta un menor consumo energético que los países mencionados anteriormente, el enfoque de estos dista mucho de nuestra realidad, la actual legislación carece de un análisis en cuanto al desempeño energético global de los inmuebles, estableciendo hasta ahora solo valores límites de transmitancia en los componentes de la envolvente, y certificaciones o calificaciones de carácter voluntario (Hernández & Meza, 2011). Según Celis et al., (2012) esta carencia, podría resolverse con la implementación de un sistema de evaluación energético como el que establece el CTE, que contempla el uso de métodos computacionales, los cuales son más precisos al momento de evaluar los efectos que generan valores de transmitancia de la envolvente, demanda de energía requerida y grado de eficiencia energética de una edificación. Por esto algunos autores señalan que deben adoptarse políticas en favor de lograr una mayor eficiencia en las construcciones de nuestro país, para en el largo plazo reducir la dependencia de energética de

fuentes extranjeras, asegurar el suministro energía, apoyar el desarrollo económico, y proporcionar un ambiente saludable y libre de contaminación. (Ossio et al., 2012).

El patrimonio arquitectónico, forma parte de la identidad y cultura de una ciudad. Valparaíso es reconocido a nivel mundial por el diseño arquitectónico de sus construcciones, llegando a ser catalogada como patrimonio de la humanidad por la UNESCO en el año 2003 (Sánchez & Jiménez, 2011). A principios del siglo pasado, la ciudad recibió una fuerte influencia de la revolución industrial, lo que se ve reflejado en las edificaciones erigidas durante ese periodo, entre ellas el edificio Hucke, un ícono de la ciudad puerto de esa época. El inmueble construido en 1908 en base a una estructura metálica a la vista, que se desarrolla como sistema mecano, es considerado inmueble de conservación histórica y está protegido por el Art. 60 de la LGUC. El 2014 concluyó su restauración, luego de ser afectado por el terremoto del año 2010. Convirtiéndose así en la actual sede de la facultad de Ingeniería de la Universidad de Valparaíso. El edificio compuesto de 5 niveles y un subterráneo, tiene una distribución de planta que considera aulas, laboratorios y oficinas administrativas (*mapa.valpo*).

En relación al carácter histórico que presenta el edificio en estudio, González et ál. (2013), señalan que, existe un difícil equilibrio entre eficiencia energética, conservación del patrimonio arquitectónico y satisfacción de los ocupantes, ya que si bien el hecho de remodelar un edificio histórico para su conservación, representa un valor agregado a la cultura y patrimonio de la ciudad, también conlleva un desafío el poder adaptarlo a las nuevas necesidades de uso que se le den. Ya que estos cuentan, con sistemas constructivos ligados a modos de vida y sistemas de refrigeración y calefacción totalmente diferentes a los actuales. Bajo estos argumentos, los autores exponen que la mayor dificultad que se presenta, en el objetivo de lograr mejoras en el comportamiento energético, de este tipo de construcciones, es que requieren de un exhaustivo conocimiento de su comportamiento total durante la etapa operativa. De la revisión bibliográfica efectuada por Martínez et al. (2016), los autores establecen que una rehabilitación con fines de optimización energética, en un edificio de carácter histórico, requiere de una rigurosa planificación, con el fin de conservar al máximo el valor arquitectónico que posee, pero, además consignan, que este tipo de edificios deben adecuarse a los estándares de eficiencia energética vigentes. El artículo, señala las metodologías que fueron utilizadas para lograr los dichos objetivos en varios proyectos de Europa, siendo la simulación computarizada, una técnica recurrente en la reconversión de recintos para uso académico, con el fin de mejorar el comportamiento ambiental de los espacios interiores. Por otro lado, afirman que el uso de esta tecnología para predecir el comportamiento de los edificios, se hace muy necesario en este tipo de estudios, ya que se requieren de un gran número cálculos, y precisión en los resultados, en vías de una apropiada toma de decisiones.

La edificación no es un proceso en serie, la relación entre clima y arquitectura es un aspecto clave en el proceso de diseño, ya que una estructura modifica, y es modificada, por el ambiente en el que está inserta, por lo cual estudiar los fenómenos a los que esta se verá enfrentada es una tarea de vital importancia, debido a que las condiciones ambientales interiores, estarán regidas por el grado de adaptación de la estructura al medio en que se encuentra (Bobadilla et al., 2012). En Chile, es posible encontrar actualmente una clara tendencia a utilizar grandes porcentajes de áreas vidriadas en los edificios de oficina, esta característica, también presente en el edificio ex-Hucke, es producto de la importación de diseños desde modelos de Europa central, donde la radiación UV, es muy baja comparada con la que presenta Chile, esto en muchos casos genera una excesiva ganancia solar, lo que eventualmente se traduce en un sobrecalentamiento de los espacios interiores (Bustamante et ál., 2011; Palme et al., 2016). Esta situación se torna crítica si el edificio

presenta una alta carga interna, debido al elevado número de personas que ingresan a él (Córdova, 2013), situación a la que también se ve enfrentado el edificio ex-Hucke, al ser utilizado como sede de la Universidad de Valparaíso, una institución educacional de uso público.

Algunos autores afirman que los problemas de climatización en edificios educacionales son recurrentes a nivel nacional. En específico la investigación llevada a cabo por Whitman et al. (2011), al evaluar la calidad de los ambientes interiores de este tipo de edificios, concluye que las condiciones térmicas son insuficientes y existe una inadecuada calidad del aire en los entornos interiores. Trebilcock et al. (2016), indican que los recintos de uso académico en Chile, generalmente descuidan en su diseño, el desempeño térmico de la estructura y que la mayoría funciona en régimen libre, es decir no poseen un sistema de calefacción o refrigeración que regule las temperaturas existentes de los ambientes de ocupación.

La falta de interés en el confort higrotérmico es un tema recurrente en la industria de la construcción, esto puede llevar en algunas situaciones a que el nivel de contaminantes presentes en el aire producto de un inadecuado diseño, alcance concentraciones dañinas para la salud. Según estudios de la OMS se ha estimado que en Chile, el 70% de los edificios poseen la condición de edificio enfermo, por no contar con sistemas de ventilación adecuados que provean una renovación continua de aire en los espacios interiores, provocando síntomas que afectan la salud y el desempeño laboral de los ocupantes (Campusano, 2012). En este aspecto el Reglamento Sobre Condiciones Sanitarias y Ambientales Básicas en los Lugares de Trabajo es claro al señalar que “todo lugar deberá mantener, por medios naturales o artificiales, una ventilación que contribuya a proporcionar condiciones ambientales confortables y que no causen molestias o perjudiquen a la salud del trabajador” (MINSAL 2015), por lo cual se hace necesario subsanar cualquier deficiencia de diseño que presente una estructura. En relación a lo expuesto, existen pruebas claras de una insuficiencia en el desempeño termo-energético del edificio ex-Hucke, ya que la ACHS durante el mes de Enero de 2017 realizó mediciones de temperatura debido a las recurrentes molestias del personal del quinto piso del edificio, en estas pruebas se mostró claramente cómo se sobrepasaron los valores límites de confort establecidos por la ASHRAE y el RITCH (CChRYC, 2007). A través del informe realizado por el ente evaluador, este finaliza recomendando la implementación de sistemas de climatización para asegurar una adecuada calidad del aire de los espacios interiores, ya que no se cuenta con ninguna actualmente (Olivares, 2017). Por otro lado, al analizar la composición de la envolvente, se puede señalar que esta posee una fachada que no cumple con las normativas vigentes de regulación térmica (*ver Anexo 7.3*), presentando un valor de transmitancia que supera los límites establecidos para la zona climática 4CL (Central litoral), lo que causaría los inadecuados rangos de temperatura dentro del edificio.

En relación a lo anterior, autores como (Charisi, 2017), indican que el simple hecho de incrementar el espesor de una capa de aislamiento en la envolvente de una estructura, representa una simple y muy efectiva forma de reducir la demanda de energía requerida. Aquí es donde la simulación, juega un papel fundamental en la toma de decisión, ya que con ella es posible realizar múltiples estudios, contrastando diversos sistemas constructivos y/o sistemas de climatización, en la búsqueda de mejorar el desempeño energético de las edificaciones en cuestión, siendo una herramienta ampliamente utilizada en la bibliografía (Balter et al., 2016; Cho et al., 2014; Córdova, 2013).

La comprobación de cargas de las cargas térmicas a través de programas de cálculos computacionales, permite simular el desempeño de la estructura durante su ciclo de vida, y no solo focalizarse en los valores límites de calefacción o refrigeración para periodos críticos o de mayor demanda, ya que estos pueden llegar a representar solo el 1% del periodo de operación, descuidando el porcentaje de tiempo restante. En este sentido el factor económico cobra importancia, ya que el costo de inversión en climatización de tipo pasiva, si bien, puede ser inicialmente elevado, podría ser recuperado en función del costo que generaría la utilización sistemas de climatización mecánicos durante el ciclo de vida de la estructura (MINETUR, 2008).

Un sistema de climatización pasiva al no necesitar energía para su funcionamiento, en contraposición con un sistema activo, representa una solución mucho más adecuada para nuestro país (Palme et al., 2016), ya que durante años se ha perpetuado un crecimiento sostenido del consumo final de energía, estableciéndose una clara dependencia energética (Hernández & Meza, 2011). Trebilcock (2011) es aún más enfático al señalar que el territorio nacional, se ha enfrentado a una crisis energética durante los últimos años, apuntando a que las edificaciones, siendo de uso público, comercial o residencial, representan un importante sector en el consumo de energía, llegando hasta el 25% del total a nivel nacional según cifras de la Comisión Nacional de Energía (CNE), por lo cual se hace necesario impulsar medidas que apoyen una reducción en la demanda energética.

Por lo anteriormente expuesto, se plantea la necesidad de realizar este estudio, ya que, existen indicios de una alta necesidad de demanda para climatizar los ambientes interiores, la que, en cierta medida, estaría influenciada por los materiales componentes de la envolvente. Por esto, para conocer los alcances que tienen los materiales en la demanda energética de climatización se realizara un análisis del edificio de la Facultad de Ingeniería de la Universidad de Valparaíso, mediante simulación computacional.

2.1. Edificio Hucke

Construido a principios del siglo XX, fue uno de los edificios icono del apogeo industrial de Valparaíso. La historia de este edificio, comienza con una modesta panadería en la Plaza del Orden (actual Plaza Aníbal Pinto), que con el paso de los años se convirtió en industria, lo que conllevó a la construcción de su fábrica en 1901 en el sector del Almendral. Fuente: *El mercurio* (Martes 10 de Julio 2012).

En 1906 la estructura fue destruida producto un fuerte sismo, lo que motivó a la familia Hucke a importar un edificio de acero tipo mecano inspirado en los diseños de Gustave Eiffel. Este tipo de construcciones en acero fueron muy utilizadas en las construcciones de mediados del siglo XIX en Inglaterra y Francia, las que exhibían una marcada influencia de la revolución industrial de la época. La estructura metálica fue construida en 1907/1908 y su montaje estuvo a cargo del arquitecto e ingeniero Otto Anwandter Fuente: *El mercurio* (Martes 10 de Julio 2012).

En 1985 el edificio nuevamente se ve afectado por un fuerte sismo, siendo esta vez la empresa Chilquinta Energía la encargada de su restauración, luego de adquirirla a fines de 1980, invirtiendo cerca de \$ 1000 millones en esta transacción. La existencia del edificio ha estado marcada por los sismos, siendo el terremoto del 2010 una nueva página en su historia de vida, ya que luego de los daños sufridos por este evento, las dependencias debieron ser desocupadas. Al año siguiente, el edificio pasó una vez más a la venta, siendo esta vez la Universidad de Valparaíso quien lo adquiriera en el año 2012, fecha cuando empezó con los trabajos de restauración, los que se extendieron hasta el 2014. Habiendo concluido todos los trabajos de reparación en el inmueble, el ex edificio Hucke pasó a formar parte de la casa de estudios como Facultad de Ingeniería. Fuente: *El mercurio* (Martes 10 de Julio 2012); *mapa.valpo* <http://mapa.valpo.net/content/fabrica-hucke>.



Figura 2.1.1 Edificio Hucke en Revista Sucesos.

Fuente: <http://edificiohucke.blogspot.com/>



Figura 2.1.2 Edificio Hucke en la actualidad.

Fuente: www.uv.cl

Actualmente, el edificio posee un importante valor histórico para la ciudad debido su arquitectura, la que da testimonio del Valparaíso industrial de principios del siglo XX, por lo que ha sido protegido por el Art. 60 de la LGUC como Inmueble de conservación histórica. Destaca por su imponente volumetría que realza la estética patrimonial del sector. El edificio tiene una superficie de 1.532 m², con un total edificado de 9.028 m² en los 5 pisos que posee, en su exterior está compuesto por muros de albañilería confinados por marcos de acero y presenta numerosas ventanas en toda su extensión. En el presente, alberga las carreras de Ingeniería en Construcción, Ingeniería Civil, Ingeniería Civil Biomédica e Ingeniería Civil en Informática.

Fuente: [mapa.valpo http://mapa.valpo.net/content/fabrica-hucke](http://mapa.valpo.net/content/fabrica-hucke).

3. Marco teórico

3.1. Termodinámica

El calor es un mecanismo de transferencia de energía que se activa mediante una diferencia de temperatura entre dos regiones del espacio. Por ejemplo, el mango de una cuchara dentro de una taza con café se calienta porque los electrones y átomos en movimiento constante en la parte sumergida de la cuchara chocan con los más lentos en la parte cercana del mango. Dichas partículas se mueven más rápido debido a las colisiones y chocan con el siguiente grupo de partículas lentas. Por lo tanto, la energía interna del mango de la cuchara se eleva a causa de la transferencia de energía debida a este proceso de colisión.

3.1.1. Leyes de la termodinámica

Ley cero de la termodinámica (ley de equilibrio)

Cuando un cuerpo se pone en contacto con otro que está a una temperatura diferente, el calor se transfiere desde el que tiene mayor temperatura al de menor temperatura, hasta que ambos alcanzan la misma temperatura (Fig. 3.1.1). **En ese punto se detiene la transferencia de calor y se dice que los dos cuerpos han alcanzado el equilibrio térmico.** Para el cual el único requerimiento es la igualdad de temperatura (Çengel & Boles, 2012).

La **ley cero de la termodinámica** establece que, si dos cuerpos se encuentran en equilibrio térmico con un tercero, están en equilibrio térmico entre sí. A modo de ejemplo si el tercer cuerpo se sustituye por un termómetro, la ley cero se puede volver a expresar como **dos cuerpos están en equilibrio térmico si ambos tienen la misma lectura de temperatura incluso si no están en contacto** (Çengel & Boles, 2012).

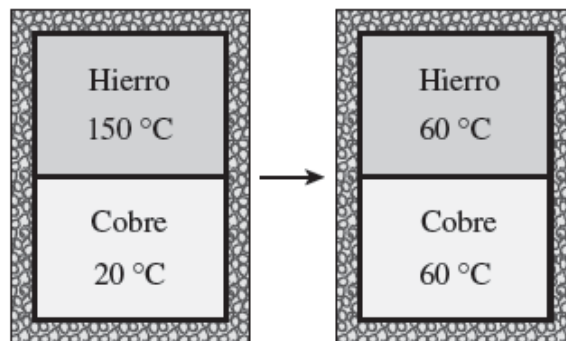


Figura 3.1.1 Dos cuerpos alcanzan el equilibrio térmico.

Fuente: Termodinámica, (Çengel & Boles, 2012).

Primera ley de la termodinámica

La primera ley de la termodinámica establece que la energía no se puede crear ni destruir durante un proceso; sólo puede cambiar de forma. Esta ley describe procesos que solo cambian la energía interna de un sistema, en el cual las únicas transferencias de energía son mediante calor (Q) y trabajo (W). Por lo tanto, cada cantidad de energía por pequeña que sea debe justificarse durante un proceso (Çengel & Boles, 2012).

$$dE_{int} = dQ + dW$$

Ecuación 3.1.1 Cambio en la energía interna de un sistema debido al calor y trabajo.

Fuente: Termodinámica, (Çengel & Boles, 2012).

Segunda Ley de la termodinámica

La segunda ley de la termodinámica describe la direccionalidad de los procesos termodinámicos naturales y puede plantearse de varias formas equivalentes. El planteamiento de máquina térmica es que ningún proceso cíclico puede convertir calor totalmente en trabajo; el planteamiento de refrigerador es que ningún proceso cíclico puede transferir calor de un lugar más frío a uno más caliente sin aporte de trabajo mecánico (Sears et al., 2013). Algunos ejemplos de esta segunda ley son:

Cuando dos objetos a diferentes temperaturas se colocan en contacto térmico, la **transferencia de energía neta por calor siempre es del objeto más caliente al objeto más frío, nunca del más frío al más caliente** (Serway & Jewett Jr., 2008).

Una bola de caucho que se deja caer al suelo rebota varias veces y con el tiempo llega al reposo, pero una bola que se encuentra en el suelo nunca reúne energía interna del suelo y comienza a rebotar por cuenta propia (Serway & Jewett Jr., 2008).

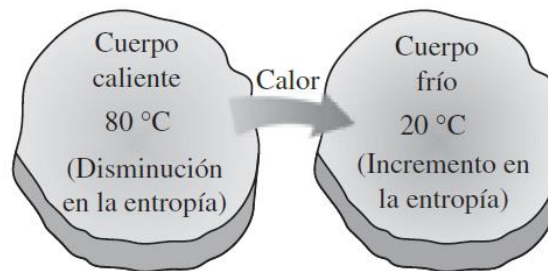
Un péndulo en oscilación al final llega al reposo debido a que colisiona contra las moléculas del aire y a la fricción en el punto de suspensión. La energía mecánica del sistema se convierte en energía interna en el aire, el péndulo y la suspensión; la conversión contraria de energía nunca se presenta (Serway & Jewett Jr., 2008).

Un planteamiento importante de la segunda ley de la termodinámica es que la entropía de un sistema aislado puede aumentar, pero nunca disminuir. Si un sistema interactúa con sus alrededores, el cambio total de entropía del sistema y de los alrededores nunca puede disminuir. Si

la interacción implica solo procesos reversibles, la entropía total es constante y $\Delta S = 0$; si hay procesos irreversibles, la entropía total aumenta y $\Delta S > 0$ (Sears et al., 2013).

El aumento de entropía en todos los procesos naturales irreversibles mide el aumento del desorden o la aleatoriedad del Universo asociado con ese proceso. Si consideramos el ejemplo de mezclar agua caliente y fría. Podríamos haber usado el agua caliente y la fría como depósitos de alta y baja temperatura de una máquina térmica. Al tomar calor del agua caliente y cederlo a la fría, podríamos haber obtenido algo de trabajo mecánico. Sin embargo, una vez que las dos aguas se mezclan y alcanzan una temperatura uniforme, esa oportunidad de convertir calor en trabajo mecánico se pierde irremediabilmente. El agua tibia nunca se separará en porciones fría y caliente. No hay disminución de energía cuando se mezclan las aguas fría y caliente; lo que se pierde es la oportunidad de convertir parte del calor del agua caliente en trabajo mecánico. Por lo tanto, cuando la entropía aumenta, la energía está menos disponible, y el Universo se vuelve más aleatorio o “gastado” (Serway & Jewett Jr., 2008).

En esencia, el calor es una forma de energía desorganizada, y algo de esta desorganización (entropía) fluirá con calor (Fig. 3.1.3). Como resultado, la entropía y el nivel de desorden molecular o aleatoriedad del cuerpo caliente disminuyen con la entropía mientras que el nivel de desorden molecular del cuerpo frío aumenta. La segunda ley requiere que el incremento en la entropía del cuerpo frío sea mayor que la disminución en la entropía del cuerpo caliente, por lo tanto, la entropía neta del sistema combinado (cuerpos frío y caliente) aumenta. Es decir, el sistema combinado se halla en un estado de mayor desorden en el estado final. Se puede concluir entonces que el proceso sólo puede ocurrir en la dirección del aumento de entropía global o desorden molecular (Çengel & Boles, 2012).



Durante un proceso de transferencia de calor, la entropía neta aumenta. (El incremento en la entropía del cuerpo frío sobrecompensa la disminución en la entropía del cuerpo caliente.)

Figura 3.1.2 Aumento de entropía durante una transferencia de calor.

Fuente: Termodinámica (Çengel & Boles, 2012).

Tercera Ley de la termodinámica

La temperatura Kelvin define una escala de temperatura con base en el ciclo de Carnot y la segunda ley de la termodinámica, y es independiente del comportamiento de cualquier sustancia específica. Por lo tanto, la escala de temperatura Kelvin es en verdad absoluta.

Un planteamiento de la tercera ley de la termodinámica es que es imposible alcanzar el cero absoluto en un número finito de pasos termodinámicos. **El punto cero de la escala Kelvin se denomina cero absoluto.** En el cero absoluto, el sistema tiene su mínima energía interna total (cinética más potencial) posible. Sin embargo, a causa de efectos cuánticos, no es cierto que en $T=0$ cese todo el movimiento molecular. Hay razones teóricas para creer que no es posible lograr el cero absoluto experimentalmente, aunque se hayan alcanzado temperaturas por debajo de 10^{-7} °K. Por lo que **cuanto más nos acercamos al cero absoluto, más difícil será acercarse más** (Sears et al., 2013).

3.1.2. Mecanismos de transferencia de calor

El calor se puede transferir en tres modos diferentes: *conducción*, *convección* y *radiación*. Todos los modos de transferencia de calor requieren la existencia de una diferencia de temperatura y todos ellos ocurren del medio que posee la temperatura más elevada hacia uno de temperatura más baja. A continuación, se da una breve descripción de cada mecanismo.

Conducción

La conducción es la transferencia de energía de las partículas más energéticas de una sustancia hacia las adyacentes menos energéticas, como resultado de interacciones entre esas partículas. La conducción puede tener lugar en los sólidos, líquidos o gases. En los gases y líquidos la conducción se debe a las *colisiones* y a la *difusión* de las moléculas durante su movimiento aleatorio. En los sólidos se debe a la combinación de las *vibraciones* de las moléculas en una red y al transporte de energía por parte de los *electrones libres*. Por ejemplo, llegará el momento en que una bebida enlatada fría en un cuarto cálido se caliente hasta la temperatura ambiente como resultado de la transferencia de calor por conducción, del cuarto hacia la bebida, a través del aluminio. La *rapidez* o *razón* de la conducción de calor a través de un medio depende de la *configuración geométrica* de éste, su *espesor* y el *material* de que esté hecho, así como de la *diferencia de temperatura* a través de él. Se sabe que al envolver un tanque de agua caliente con fibra de vidrio (un material aislante) se reduce la razón de la pérdida de calor de ese tanque. Entre más grueso sea el aislamiento, menor será la pérdida de calor. También se conoce que un tanque de agua caliente perderá calor a mayor rapidez cuando se baja la temperatura del cuarto en donde se aloja. Además, entre más grande sea el tanque, mayor será el área superficial y, por consiguiente, la razón de la pérdida de calor (Çengel & Ghajar, 2011).

La razón de la conducción de calor a través de una capa plana es proporcional a la diferencia de temperatura a través de ésta y al área de transferencia de calor, pero es inversamente

proporcional al espesor de esa capa, donde la constante de proporcionalidad k es la conductividad térmica del material, que es una medida de la capacidad de un material para conducir calor (Çengel & Ghajar, 2011).

$$\dot{Q}_{cond} = kA \frac{T_1 - T_2}{\Delta x} = -kA \frac{\Delta T}{\Delta x}$$

Ecuación 3.1.2 Razón de cambio de la conducción de calor.

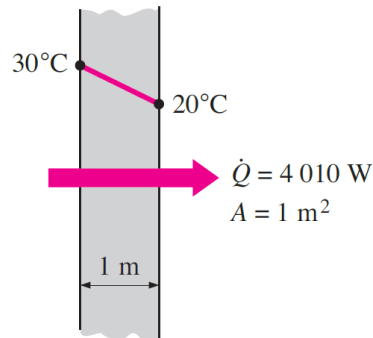
Fuente: Transferencia de calor y masa (Çengel & Ghajar, 2011).

Cuando el límite de $\Delta x \rightarrow 0$, la ecuación se reduce a la forma diferencial, la cual se llama **ley de Fourier de la conducción del calor** (Çengel & Ghajar, 2011).

$$\dot{Q}_{cond} = -kA \frac{dT}{dx} (W)$$

Ecuación 3.1.3 Ley de Fourier.

Fuente: Transferencia de calor y masa (Çengel & Ghajar, 2011)



a) Cobre ($k = 401 \text{ W/m} \cdot \text{K}$)

Figura 3.1.3 Conducción de calor a través de un sólido en el cual el descenso de temperatura se comporta de manera lineal.

Fuente: Transferencia de calor y masa (Çengel & Ghajar, 2011).

Conductividad térmica

La conductividad térmica de un material se puede definir como la razón de transferencia de calor a través de un espesor unitario del material por unidad de área por unidad de diferencia de temperatura. La conductividad térmica de un material es una medida de la capacidad del material para conducir calor. Un valor elevado para la conductividad térmica indica que el material es **un buen conductor del calor** y un valor bajo indica que es un mal conductor o que es un **aislante** (Çengel & Ghajar, 2011).

Materiales aislantes

Si dos sistemas están separados por un material aislante, como madera, espuma de plástico o fibra de vidrio, se afectan mutuamente con más lentitud, puesto que la conductividad térmica del material aislante es menor a la de otros materiales, haciendo que la transferencia de calor tome más tiempo. Las hieleras portátiles se fabrican con materiales aislantes para retardar el calentamiento del hielo y de la comida fría en su interior, **que tratan de llegar al equilibrio térmico** con el aire veraniego. Un aislante ideal es un material que no permite la interacción entre los dos sistemas; **evita que alcancen el equilibrio térmico** si es que no estaban en él inicialmente. Los aislantes ideales son solo eso: una idealización; los aislantes reales, como los de las hieleras, no son ideales, así que finalmente su contenido alcanzara el equilibrio térmico con los sistemas que interactúe (Sears et al., 2013).

Convección

La **convección** es transferencia de calor por movimiento de una masa de fluido de una región del espacio a otra. Como ejemplos conocidos están los sistemas de calefacción domésticos de aire caliente y de agua caliente, el sistema de enfriamiento de un motor de combustión y el flujo de sangre en el cuerpo. Si el fluido circula impulsado por un ventilador o una bomba, el proceso se llama convección forzada; si el flujo se debe a diferencias de densidad causadas por expansión térmica, como el ascenso de aire caliente, el proceso se llama convección natural o convección libre (Sears et al., 2013).

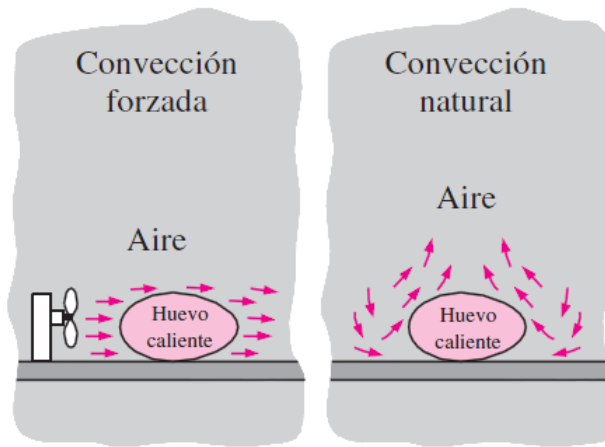


Figura 3.1.4 Convección forzada y convección natural.

Fuente: *Transferencia de calor y masa* (Çengel & Ghajar, 2011).

La convección libre en la atmósfera desempeña un papel dominante en la determinación del clima, y la convección en los océanos es un mecanismo importante de transferencia global de calor. En una escala menor, los halcones que planean y los pilotos de planeadores aprovechan las corrientes térmicas que suben del suelo caliente. El mecanismo de transferencia de calor más importante dentro del cuerpo humano (necesario para mantener una temperatura casi constante en diversos entornos) es la convección forzada de la sangre, bombeada por el corazón (Sears et al., 2013).

Sin las corrientes de convección sería muy difícil hervir agua. Ya que, a medida que el agua se calienta en una tetera, las capas inferiores se calientan primero. Esta agua se expande y eleva hasta lo alto porque su densidad es más baja, observándose el ascenso de burbujas de vapor durante la ebullición. Al mismo tiempo, el agua fría más densa en la superficie se hunde hasta el fondo de la tetera y se calienta (Serway & Jewett Jr., 2008).

El mismo proceso se presenta cuando una habitación se calienta mediante un radiador. El radiador calienta el aire en las regiones más bajas de la habitación. El aire caliente se expande y eleva hasta el techo debido a su densidad más baja. El aire más frío y denso de arriba se desciende, y se establece un patrón continuo de corriente de aire (Serway & Jewett Jr., 2008).

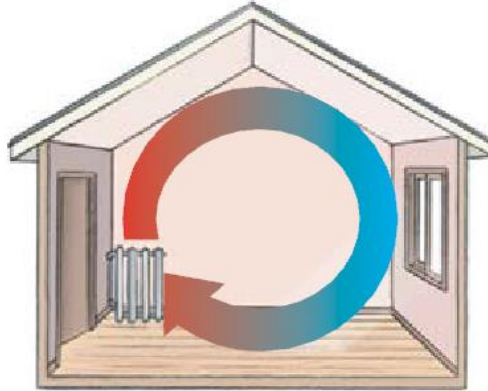


Figura 3.1.5 Convección de aire en una habitación debido a un radiador.

Fuente: Física para ciencias e ingeniería (Serway & Jewett Jr., 2008).

Radiación

La radiación es la energía emitida por la materia en forma de **ondas electromagnéticas** (o fotones) como resultado de los cambios en las configuraciones electrónicas de los átomos o moléculas. A diferencia de la conducción y la convección, la transferencia de calor por radiación no requiere la presencia de un medio interventor. De hecho, la transferencia de calor por radiación es la más rápida (a la velocidad de la luz) y no sufre atenuación en un vacío. Ésta es la manera en la que la energía del Sol llega a la Tierra (Çengel & Ghajar, 2011).

En los estudios de transferencia de calor es de interés la **radiación térmica**, que es la forma de radiación emitida por los cuerpos debido a su temperatura. La que, es diferente de las otras formas de radiación, como los rayos X, los rayos gamma, las microondas, las ondas de radio y de televisión, **que no están relacionadas con la temperatura. Todos los cuerpos a una temperatura arriba del cero absoluto emiten radiación térmica** (Çengel & Ghajar, 2011).

La radiación es un fenómeno volumétrico y **todos los sólidos, líquidos y gases emiten, absorben o transmiten radiación en diversos grados**. Sin embargo, la radiación suele considerarse como un fenómeno superficial para los sólidos que son opacos a la radiación térmica, como los metales, la madera y las rocas, ya que las radiaciones emitidas por las regiones interiores de un material de ese tipo nunca pueden llegar a la superficie, y la radiación incidente sobre esos cuerpos suele **absorberse solo en unas cuantas micras hacia adentro de dichos sólidos** (Çengel & Ghajar, 2011).

La razón máxima de la radiación que se puede emitir desde una superficie a una temperatura termodinámica T_s (en K o R) es expresada por la ley de Stefan-Boltzmann como:

$$\dot{Q}_{emitida,máx} = \sigma A_s T_s^4 \quad (W)$$

Ecuación 3.1.4 Calor emitido por un cuerpo negro de superficie A_s a una temperatura T_s .

Fuente: Transferencia de calor y masa (Çengel & Ghajar, 2011).

donde $\sigma = 5.67 \times 10^{-8} \text{ W/m}^2 \cdot \text{K}$ es la *constante de Stefan-Boltzmann*. La superficie idealizada que emite radiación a esta razón máxima se llama **cuerpo negro** y la radiación emitida por éste es la **radiación del cuerpo negro**. La radiación emitida por todas las superficies reales es menor que la emitida por un cuerpo negro a la misma temperatura y se expresa como (Çengel & Ghajar, 2011):

$$\dot{Q}_{emitida} = \varepsilon \sigma A_s T_s^4 \quad (W)$$

Ecuación 3.1.5 Calor emitido por una superficie radiante con emisividad ε .

Fuente: Transferencia de calor y masa (Çengel & Ghajar, 2011).

donde ε es la emisividad de la superficie. La emisividad cuyo valor está en el intervalo $0 \leq \varepsilon \leq 1$, es una medida de cuán próxima está una superficie de ser un cuerpo negro, para el cual $\varepsilon = 1$.

Otra importante propiedad relativa a la radiación de una superficie es su **absortividad α** , la cual es la fracción de la energía de radiación incidente sobre una superficie **que es absorbida por ésta**. Como la emisividad, su valor está en el intervalo $0 \leq \alpha \leq 1$. Un cuerpo negro absorbe toda la radiación incidente sobre él. **Es decir, un cuerpo negro es un absorbente perfecto ($\alpha = 1$) del mismo modo que es un emisor perfecto** (Çengel & Ghajar, 2011).

En general, tanto ε como α de una superficie dependen de la temperatura y de la longitud de onda de la radiación. La ley de Kirchhoff de la radiación afirma que la **emisividad y la absortividad de una superficie a una temperatura y longitud de onda dadas, son iguales**. En muchas aplicaciones prácticas, las temperaturas de la superficie y de la fuente de radiación incidente son del mismo orden de magnitud, y la absortividad promedio de una superficie se considera igual a su emisividad promedio (Çengel & Ghajar, 2011).

$$\dot{Q}_{absorvida} = \alpha \dot{Q}_{incidente} \quad (W)$$

Ecuación 3.1.6 Calor absorbido por una superficie debido calor incidente y a la absorptividad de la superficie.

Fuente: Transferencia de calor y masa (Çengel & Ghajar, 2011).

En la ecuación $\dot{Q}_{incidente}$ es la razón a la cual la radiación incide sobre la superficie y α es la absorptividad de la superficie. Para las superficies opacas (no transparentes), la parte de la radiación incidente no absorbida por la superficie se refleja (Çengel & Ghajar, 2011).

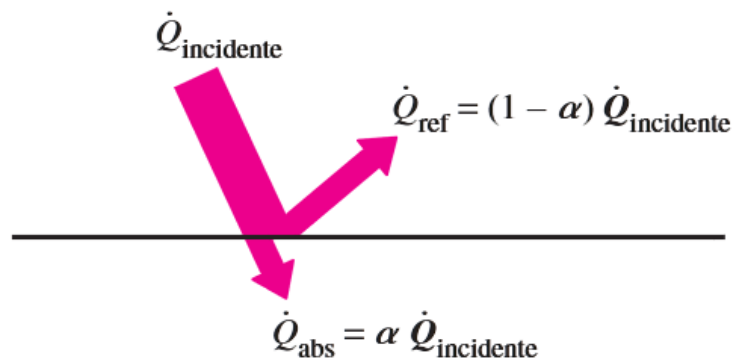


Figura 3.1.6 Diagrama del calor absorbido y reflejado.

Fuente: Transferencia de calor y masa. (Çengel & Ghajar, 2011).

La diferencia entre las razones de la radiación emitida por la superficie y la radiación absorbida es la **transferencia neta de calor por radiación**. Si la razón de absorción de la radiación es mayor que la de emisión, se dice que la superficie está **ganando** energía por radiación. De lo contrario, se dice que la superficie está **perdiendo** energía por radiación (Çengel & Ghajar, 2011).

Radiación, clima y cambio climático.

Nuestro planeta constantemente absorbe la radiación proveniente del Sol. En el equilibrio térmico, la rapidez con la que nuestro planeta absorbe la radiación solar debe ser igual a la rapidez con la que el sol emite radiación en el espacio.

La presencia de una atmósfera en nuestro planeta tiene un efecto significativo en este equilibrio. La mayor parte de la radiación emitida por el Sol (que tiene una temperatura superficial de 5800 K) está en la parte visible del espectro, a la que la atmósfera es transparente. Sin embargo, la temperatura media de la superficie de la Tierra es solo 287 K (14°C). Por lo tanto, la mayor parte de la radiación que nuestro planeta emite al espacio es radiación infrarroja, al igual que la radiación de las personas. Sin embargo, nuestra atmósfera no es completamente transparente a la radiación infrarroja. Esto se debe a que nuestra atmósfera contiene dióxido de carbono (CO₂), que es su cuarto constituyente más abundante (después del nitrógeno, oxígeno y argón). Las moléculas de CO₂ de la atmósfera tienen la propiedad de absorber parte de la radiación infrarroja emitida por nuestro planeta hacia el espacio. Entonces, se irradia de nuevo la energía absorbida en la atmósfera, pero una parte de esta energía se irradia hacia abajo, hacia la superficie, en lugar de escapar hacia el espacio. Para mantener el equilibrio térmico, la superficie de la Tierra debe compensar esto aumentando su temperatura T y, por ende, su tasa total de energía radiante (que es proporcional a T^4). Este fenómeno, llamado **efecto de invernadero**, hace que la temperatura de la superficie de nuestro planeta se eleve aproximadamente 33°C con respecto a la que registraría si no hubiera CO₂ atmosférico. Sin CO₂, la temperatura media de la superficie terrestre estaría por debajo del punto de congelación del agua, y la vida como la conocemos, sería imposible (Sears et al., 2013).

Mientras que el CO₂ atmosférico tiene un efecto benéfico, demasiado CO₂ puede tener consecuencias extremadamente negativas. Las mediciones de aire atrapado en el antiguo hielo de la Antártida revelan que durante los últimos 650,000 años el CO₂ ha constituido menos de 300 partes por millón de la atmósfera. Sin embargo, desde el inicio de la era industrial, la quema de combustibles fósiles tales, como el carbón y el petróleo, han elevado la concentración de CO₂ en la atmósfera a niveles sin precedentes. Como consecuencia de ello, a partir de 1950 la temperatura media mundial de la superficie ha aumentado en 0.6°C, y la Tierra ha experimentado los años más cálidos jamás registrados. Si seguimos consumiendo combustibles fósiles al mismo ritmo, en el año 2050 la concentración atmosférica de CO₂ llegará a 600 partes por millón. El aumento de temperatura resultante tendrá efectos dramáticos en el clima de todo el mundo. En las regiones polares enormes cantidades de hielo se derretirían y correrían, lo que aumentaría los niveles del mar en todo el mundo y amenazaría los hogares y las vidas de cientos de millones de personas que viven cerca de la costa. Hacer frente a estas amenazas es uno de los mayores desafíos que tiene ante sí la civilización del siglo XXI. (Sears et al., 2013).

3.2. Energía, entorno y envolvente

El calor tiene diferentes mecanismos de transmisión a través la envolvente del edificio. Siempre que existe una diferencia de temperatura entre dos puntos de esta, se producirá un flujo de calor desde la región más caliente hacia la más fría hasta que las temperaturas se igualen. La temperatura exterior depende del clima en el que se encuentra la estructura, y el modo en que se transfiera el calor a través de ella al interior del recinto. Esto dependerá de la orientación, geometría, resistencia térmica de los materiales y de la transmitancia de los cerramientos. Debido a esto, a continuación, se describen los fenómenos que afectan el comportamiento térmico de una estructura, así como también, el concepto de envolvente y puentes térmicos, ya que, a través de estos últimos, se conectara el clima interior con el exterior.

3.2.1. Radiación solar

Es un factor que depende de la dirección de incidencia de la radiación proveniente del sol, producida por los movimientos relativos entre la tierra y el sol. El tipo de radiación que llega a la tierra se distribuye en una amplia zona del espectro electromagnético. Dentro de estos podemos distinguir los siguientes tipos:

Radiación de onda corta (ultravioleta): de 125 a $3900 \times 10^{-10}(m)$, en gran parte es absorbida por la atmosfera;

Radiación visible: de 3800 a $7600 \times 10^{-10}(m)$, son las de mayor intensidad;

Radiación de onda larga (infrarrojo): $7600 \times 10^{-10}(m)$ a $0,1(mm)$.

La radiación solar en todos sus espectros, incide sobre la parte exterior de la atmosfera terrestre, con un valor aproximado de irradiación de **1366 W/m²**, que es llamado el valor de la **constante solar**. Para llegar a la tierra, esta radiación debe atravesar unos 8 (km) de aire, reduciendo considerablemente su flujo energético con la difusión, absorción, difracción y refracción, que se produce en el encuentro de la radiación, con las distintas capas de la atmosfera. El espectro original también cambia producto de la latitud, estación y hora del día en que se encuentre. A lo que también se suma la existencia de nubes y contaminación, los cuales disminuyen la cantidad de radiación recibida en la superficie de la tierra (Serra & Coch, 2000).

En relación a la arquitectura, la radiación solar que recibe un edificio, también depende de la inclinación con que llega ésta a su envolvente, y del ángulo en que se encuentra el sol respecto del norte. **Las estaciones del año se diferencian por el ángulo de inclinación de los rayos del sol**, lo que afecta a la cantidad de energía que llega efectivamente a las envolventes. En Chile existen diferencias entre la radiación solar en verano (mayor) y en invierno (menor) (Bobadilla et al., 2012).

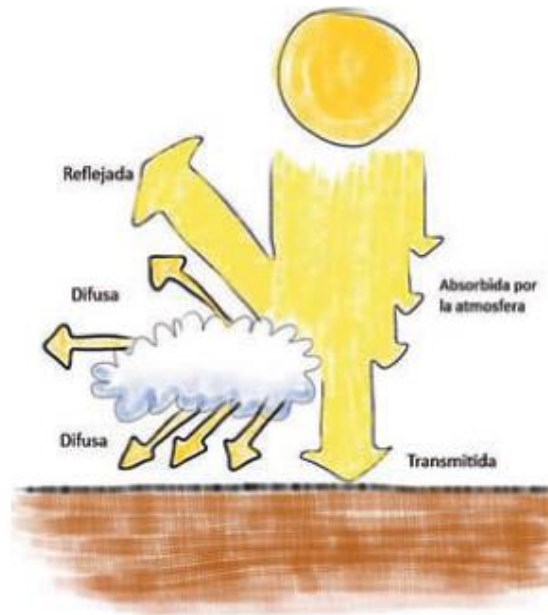


Figura 3.2.1 Transmisión de la radiación solar hacia la tierra.

Fuente: Manual de Diseño Pasivo y Eficiencia Energética en Edificios Públicos (Bobadilla et al., 2012)

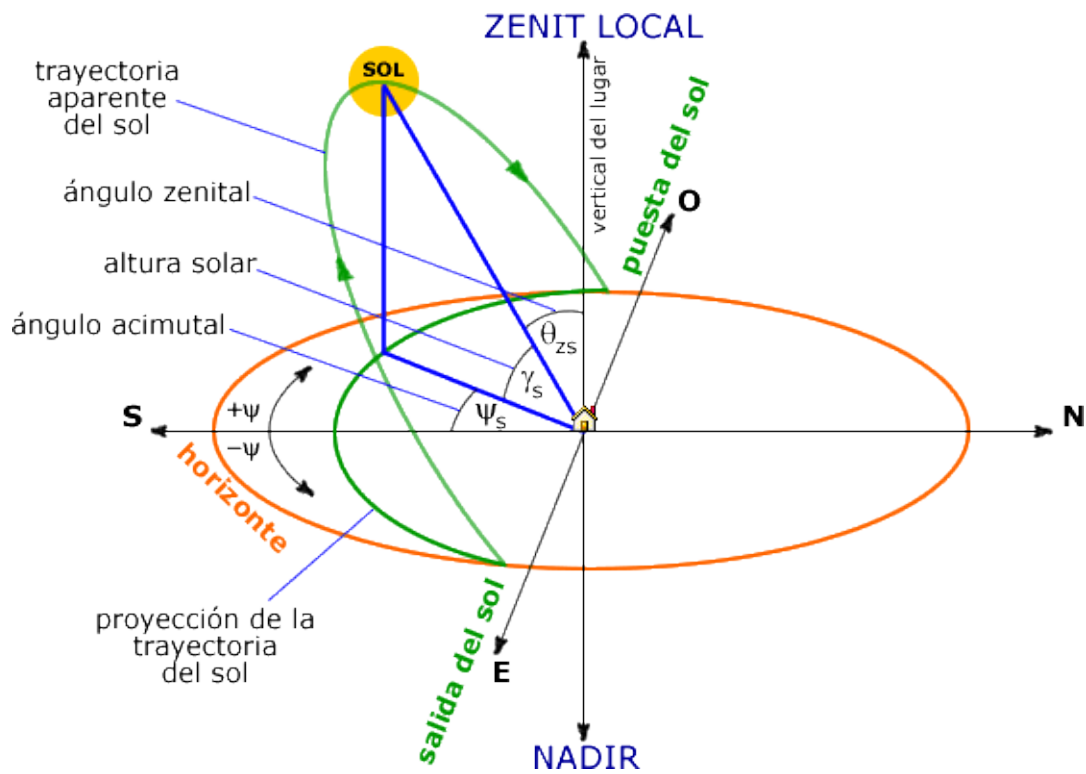


Figura 3.2.2 Trayectoria solar.

Fuente: Universidad de Jaén (UJAEN)

Los datos o valores de radiación incidente en el edificio, dependen del azimut y la altitud del sol respecto del cenit. (Bobadilla et al., 2012). Además, como se mencionó anteriormente, la radiación solar cambia en el tiempo, según el día y la hora de una manera cíclica anual. En relación a esto existen **ábacos y tablas** que dan valores típicos de un lugar o latitud en particular, entre estos modelos de datos, los valores más frecuentes son los de energía incidente sobre un plano vertical en diferentes orientaciones, o sobre un plano horizontal. No obstante, la radiación total que puede recibir un plano en diferentes direcciones, será la suma de la posible radiación directa, más la radiación difusa de la bóveda celeste, y finalmente, la radiación reflejada (reflexión) por el suelo hacia el plano. **Estos valores son válidos para un día claro, pero en la práctica deben ser corregidos, debido a que la nubosidad del clima en el lugar, hará que estos valores sean más bajos que en los de cielo despejado** (Serra & Coch, 2000).

3.2.1. Orientación

Según Bobadilla et al., (2012) la orientación de los edificios determina en gran parte la demanda energética de calefacción y refrigeración del mismo en el futuro. **Una buena orientación podría minimizar considerablemente las demandas energéticas** a través del control de las ganancias solares.

Las edificaciones públicas se caracterizan por altas ganancias internas generadas por los usuarios, equipos e iluminación, por lo que se recomienda (siempre que sea posible) una orientación **norte y sur de sus fachadas principales**, ya que esto facilita las estrategias de protección de fachadas. Las distintas fachadas de una edificación tienen diferentes condiciones de asoleamiento, dependiendo de su orientación estos presentarán las siguientes características:

Norte

Una fachada orientada al norte recibe la **radiación solar durante la mayor parte del día**, dependiendo de la latitud en que se encuentre y la época del año. En invierno el sol se encuentra más bajo con respecto al cenit por lo que tendrá una mayor penetración a través de superficies acristaladas. Esta fachada se puede sombrear fácilmente en verano con protecciones horizontales como aleros o repisas de luz.

Este

La fachada Este recibirá el **sol por la mañana tanto en invierno como en verano. En esta orientación el sol es bajo ya que recién asoma por el horizonte**. La presencia de superficies acristaladas en esta fachada puede generar sobrecalentamiento en determinados climas si no es protegida.

Sur

Esta fachada **no recibe radiación solar en forma directa** durante gran parte del año. Sólo en verano puede recibir algo de sol, dependiendo de la latitud. Debido a esto, esta fachada no requiere de protección solar, pero sus superficies acristaladas deben lograr un adecuado **balance que evite excesivas pérdidas de calor y logre una adecuada iluminación natural**, dependiendo del clima en que se emplace.

Oeste

La fachada oeste recibe **radiación solar durante la tarde**, lo que coincide con **las más altas temperaturas del día**. Debido a esto, **esta fachada tiene los mayores riesgos de sobrecalentamiento en verano**, por lo que es necesario proteger las superficies acristaladas que se encuentran sobre ésta. Las protecciones solares pueden ser exteriores, interiores, móviles, fijas, o incluso puede ser un vidrio con control solar.

3.2.2. Temperatura

La temperatura es una característica macro y microclimático, como consecuencia del asoleamiento (como factor macro climático) y variaciones ocasionadas por otros factores macro y microclimáticos. La temperatura del aire depende fundamentalmente de la temperatura de las superficies, que se calientan o enfrían al recibir o emitir radiación y que ceden calor al aire por convección (Serra & Coch, 2000).

Algunas características que modifican la temperatura del aire son:

- **Latitud**, que influye sobre la masa atmosférica que debe atravesar la radiación solar, antes de llegar a la superficie
- **Altura**, la altura sobre el nivel del mar disminuye la temperatura unos 0,5° C por cada 100 metros de altura
- **Relación masa tierra-agua**, que condiciona la inercia térmica y las oscilaciones de temperatura
- **Altura relativa**, que condiciona los efectos de **inversión térmica**.
- **Exposición a los vientos**, las características de los vientos, favorecerán condiciones más, o menos cálidas.

Durante el día y a lo largo del año, las temperaturas experimentan variaciones que se repiten cíclicamente, en gran parte, por la cantidad de radiación solar que recibe un determinado lugar, como se mencionó anteriormente. **A modo general, los climas más continentales y desérticos son los que manifiestan en mayor medida fluctuaciones de temperatura, tanto a lo largo del ciclo diario, como estacional.** En cambio, las variaciones de temperatura día-noche en los climas mediterráneos son pequeñas respecto a los climas continentales, comúnmente las diferencias pueden ser de 3 °C en días nublados, y subir a cerca de 10 °C en días despejados, especialmente en verano. Estos climas que se incluyen dentro de los templados, durante la época de invierno la temperatura suele mantenerse por debajo de la zona de confort, en cambio, en verano, normalmente se encuentra en dicha zona durante la mayoría de los días. En otra arista la influencia de la topografía es una variable importante, no solo por el factor altura absoluta, la cual produce un efecto directo sobre la temperatura, sino también, por la orientación del relieve que exista, y la altura relativa de una ubicación respecto de su entorno próximo. En relación a esto último, es interesante resaltar el efecto de **inversión térmica: normalmente las partículas y gases se dispersan en la atmosfera, durante el día, el suelo calentado por la radiación solar, calienta el aire circundante, y este asciende con las partículas que contiene.** Por la noche el suelo comienza a perder calor y así paulatinamente enfría la capa de aire circundante, quedando ésta por debajo. **Si el sol no calienta lo suficiente el suelo, para que el aire de la capa inferior ascienda, esta queda atrapada por las capas de aire superiores que se encuentran a una temperatura un poco más elevada, y así se produce el fenómeno denominado inversión térmica.** Este fenómeno es recurrente en zonas geográficas que presentan depresiones como valles, generando episodios de contaminación ambiental, producto del smog contenido en las capas inferiores de aire y que a su vez puede ser efecto de la insuficiencia de los inmuebles para mantenerse en los rangos de confort (Serra & Coch, 2000).

3.2.3. Movimiento del aire (viento)

Es una característica macro y micro-climática, que influye también en otras características. Los vientos son movimientos de masas de aire debido a diferencias de temperaturas (y presión) en la atmósfera por efecto de la radiación solar. El viento puede afectar las características de temperatura: enfriando o calentando el ambiente; favoreciendo la ventilación y reduciendo la humedad; mejorando la calidad de la atmósfera (dispersando la contaminación); y puede reducir o incrementar los ruidos locales. Algunos movimientos del aire, son a **causa de las diferentes inercias térmicas, que tienen las masas de la tierra y del mar; campo o ciudad; desierto y bosque, las que generan las brisas**. Estos son vientos que compensan las diferencias de presión, debido a las diferentes temperaturas del aire. **La inercia de la térmica de la tierra, al ser más pequeña que la del mar** (calor específico tierra: 660 kcal/m³ °C; agua 1000 kcal/m³ °C), **hace que, por la mañana, el aire se caliente más rápido sobre la tierra, que sobre el mar**. Este aire menos denso sube, y es sustituido, por otro más denso y frío proveniente del mar, **originándose la brisa marina** (dirección mar-tierra). **Al atardecer se produce el fenómeno contrario** (la tierra se enfría con mayor velocidad), y se origina el viento de tierra a mar (Serra & Coch, 2000).

3.2.4. Humedad relativa

La humedad relativa nos indica el porcentaje de vapor de agua que contiene el aire, en relación, al máximo que este podría contener a esa temperatura. Por esto, si la humedad específica es constante, **toda la variación de la temperatura dirigirá una variación de la humedad relativa**. Las **oscilaciones de humedad relativa se manifiestan cíclicamente y en general en sentido contrario a las oscilaciones de temperatura**. Ya que cuando la **temperatura del aire es mínima tiene menor capacidad para contener vapor de agua**, si la temperatura continúa disminuyendo, el aire llegará a su punto de saturación enfriándose, y a partir de ese momento, empezará la condensación del vapor de agua contenido en el aire (ARESFORMACIÓ, 2010; Serra & Coch, 2000).

El aire contiene una mayor cantidad de vapor de agua si se encuentra cerca de fuentes de agua como el mar o lagos, y menor cantidad si se trata de climas áridos o desérticos. La humedad del aire influye en la sensación térmica y en la posibilidad de condensación. En relación a esto, es **necesario tener en cuenta que en climas con alta humedad relativa y bajas temperaturas invernales existen mayores riesgos de ocurrencia de condensación en los elementos constructivos** (Bobadilla et al., 2012).

3.2.5. Envolvente

La envolvente de una edificación tiene una vital importancia en el desempeño energético de un edificio, ya que esta genera la mediación entre el espacio interior – que debe ser confortable - y el clima exterior. La envolvente se compone por elementos de cubierta, fachadas, pisos y cerramientos en contacto con el **terreno (figura 3.2.5)**. Los parámetros que deben considerarse al momento de estudiar la envolvente son: diseño; orientación del edificio; ubicación, tipo y porcentaje de superficies acristaladas; materialidad de los elementos que la componen; y otros (Bobadilla et al., 2012).

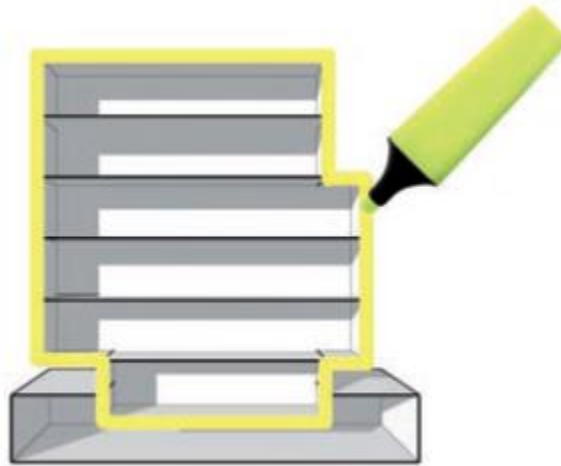


Figura 3.2.3 Envolvente de un edificio.

Fuente: Manual de Diseño Pasivo y Eficiencia Energética en Edificios Públicos (Bobadilla et al., 2012).

Regulación térmica de la envolvente

A nivel mundial muchos países han iniciado políticas para reducir la energía requerida por el sector inmobiliario, estableciendo regulaciones en las características térmicas envolvente, y/o en el total de la energía transferida a través de esta. Para esto, se han construido pautas y lineamientos que conduzcan hacia diseños más eficientes. Frecuentemente, 2 estándares de construcciones son los utilizados para regular el desempeño térmico una envolvente constructiva (Natephra et al., 2018), los cuales se presentaran a continuación:

Regulaciones en el valor total de la transferencia térmica (OTTV)

La restricción en el valor total de la transferencia térmica (OTTV), es un tipo de estándar generalmente utilizado en climas cálidos (especialmente en el Sudeste de Asia). Fue propuesto inicialmente en la American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers (ASHRAE) en 1975. Es aplicable a edificaciones refrigeradas mecánicamente con el objetivo de prescribir características térmicas de la envolvente (HKIA, 2012; Natephra et al., 2018). El OTTV es un valor que indica la tasa promedio de transferencia de calor hacia un edificio, a través de su envolvente. Las mayores componentes de esta transferencia son: la tasa de transferencia de calor por conducción a través de los muros, y la tasa de transferencia de calor por radiación solar a través de los vidrios de ventana. A continuación, se muestra la ecuación general del valor total de la transferencia térmica:

$$OTTV = \frac{\sum Q}{\sum A} \text{ (W/m}^2\text{)}$$

Ecuación 3.2.1 Valor de la transferencia térmica total (OTTV).

Fuente: Calculation and Application of OTTV and U-value (HKIA, 2012)

Donde:

Q: Tasa total de calor transferido a través de la envolvente (W);

A: Área bruta de la envolvente del edificio (m^2).

A través de la ecuación se puede observar que el OTTV es un valor involucra toda la envolvente (suelos, techos y muros exteriores), limitando la cantidad de energía que ingresa al edificio por metro cuadrado de esta, a diferencia de los estándares de aislamiento térmico que utilizan el valor U, los cuales, establecen restricciones individuales para cada elemento componente de la envolvente.

Estándares de aislamiento térmico a través del valor U

Son un tipo de estándar (comúnmente utilizados en climas fríos), que limitan el valor de transmitancia térmica (valor U) de los elementos que componen la envolvente del edificio. El valor U, es una medida de la tasa de transferencia de calor a través de un metro cuadrado de área de material, por cada grado de diferencia de temperatura en una condición estándar (usualmente una diferencia de 24°C con una humedad del 50%, sin viento). Es un factor a considerar en el diseño de edificios, específicamente en la elección de sus materiales. Cuanto menor sea el valor U, menor será la tasa de transferencia de calor, y mayor su resistencia al flujo de calor (HKIA, 2012). En Chile, este es el tipo de estándar utilizado, mediante la construcción de un sistema de calificación en base al valor U establecido por la NCh1079 Of.2008 y de esta manera restringir la transferencia de calor de los componentes de la envolvente, como muros exteriores, ventanas, cubiertas y pisos. A continuación, se muestra la ecuación base para el cálculo de la transmitancia térmica:

$$U = \frac{1}{R} (W / (m^2 \times K))$$

Ecuación 3.2.2 Transmitancia térmica

Fuente: NCh1079 Of.2008

Donde:

U: Transmitancia térmica ($W / (m^2 \times K)$);

R: Resistencia térmica ($(m^2 \times K) / W$).

Este tipo de estándar, al normar cada elemento de forma independiente, tiene la ventaja de clarificar de forma sencilla las características térmicas que poseen las soluciones constructivas de las edificaciones, y por ende generar soluciones puntuales y objetivas, para producir un mejor desempeño térmico.

A nivel mundial, existen diferentes sistemas de certificación del grado de sustentabilidad de una construcción, estos utilizan en mayor o menor medida alguno de los indicadores mencionados anteriormente, con el objeto, de promover estrategias de eficiencia energética en el sector inmobiliario. Es por esto, que en el punto 3.3 *Sistemas de evaluación de eficiencia energética*, se presentaran algunos de los sistemas de certificación más populares actualmente, como parte de la revisión del estado del arte.

3.2.6. Puentes térmicos

Se considera puente térmico a zonas concretas de la envolvente del edificio en los cuales se presenta una drástica variación de la resistencia térmica, ya sea por un cambio de geometría; un cambio de los materiales empleados (penetración de la envolvente de materiales con una conductividad térmica distinta) o por un cambio en el espesor del revestimiento (ISO 7435 / NCh3136/1 of.2008) (Bobadilla et al., 2012).

Los puentes térmicos son difíciles de solucionar o evitar una vez que la obra está construida, por ello se hace importante detectarlos en etapa de diseño de manera de eliminarlos o reducir sus consecuencias negativas los cuales pueden ser tan graves como un efecto significativo sobre la demanda de energía al aumentar las pérdidas de calor o aumentar las ganancias solares durante el verano; una reducción de las temperaturas superficiales interiores; puntos fríos en el edificio; peligro de condensación intersticial o superficial; deterioro de la estructura; degradación estética de los cerramientos con el aumento de costos de mantención y, el más perjudicial, la disminución de condiciones higiénicas y de confort de los usuarios por condensación de vapor de agua y aparición de moho y hongos (Bobadilla et al., 2012).

- Puentes Térmicos Puntuales: se presentan en zonas puntuales, por ejemplo, en la intersección de tres cerramientos formando un vértice de la envolvente exterior.
- Puentes Térmicos Lineales: se manifiestan a lo largo de una determinada longitud, por ejemplo, entre la intersección de dos cerramientos verticales exteriores que forman una esquina.
- Puentes Térmicos por geometría: se manifiestan en aquellas zonas donde hay un cambio de dirección de la envolvente sin que ésta presente cambios de materialidad.
- Puentes Térmicos constructivos: se manifiestan en aquellas zonas con o sin cambio de dirección de la envolvente, donde se encuentran materialidades con diferentes resistencias térmicas.

Fuente: (Bobadilla et al., 2012)

Evaluación de Puentes Térmicos:

Los puentes térmicos pueden ser evaluados a través del método de cálculo manual especificado en la NCh853 Of.2007, determinando un valor ponderado asociado a las áreas expuestas al puente. Adicionalmente, la NCh3136/1 Of.2008 define un procedimiento más preciso para determinar puentes térmicos considerando el problema como un caso multidimensional al igual que el ASHRAE 1365 RP. Este último plantea que se estudie mediante un software de simulación 2D el puente térmico de manera aislada, con el fin de calcular la cantidad de calor que atraviesa por la solución constructiva, luego calcular la cantidad de calor que atraviesa por la solución donde no existe puente térmico, despejar el aumento de calor entregado por el puente térmico, y con esto obtener la transmitancia térmica lineal, con la cual es posible determinar la cantidad de calor que aumenta en metros lineales el puente térmico (Bobadilla et al., 2012; Lawton et al., 2011).

Los métodos de simulación permiten a través de un software 2D y 3D, determinar valores U o flujos de calor asociados a una solución constructiva. Estos programas son específicos y generalmente arrojan visualizaciones detalladas de la zona que se quiere evaluar. **Sin embargo, para medir su influencia sobre la demanda total de energía, el detalle debe ser incorporado a un programa que permita evaluaciones globales asumiendo todas las variables que afectan el desempeño del edificio,** siendo la solución constructiva una más de ellas. En construcciones ya está ejecutadas, **se puede identificar los puentes térmicos a través de una termografía, utilizando una cámara especializada.** Ésta entregará una visión de las zonas frías o calientes de la envolvente, lo que permite detectar y evaluar posibles mejoras a problemas de puentes térmicos. Fuente: (Bobadilla et al., 2012).

THERM

El Manual de Diseño Pasivo y Eficiencia Energética en Edificios Públicos (Bobadilla et al., 2012), muestra distintos programas para la simulación de puentes térmicos entre ellos THERM, el cual es un programa informático de vanguardia desarrollado en el Lawrence Berkeley National Laboratory (LNBL). Es utilizado por compañías manufactureras, ingenieros, educadores y estudiantes entre otros (Fuente: <https://windows.lbl.gov/software/therm>).

Este programa permite modelar efectos bidimensionales de transferencia de calor en componentes constructivos como ventanas, paredes, cimientos, techos; accesorios; y elementos que requieran del estudio de puentes térmicos. Mediante el análisis de transferencia de calor se puede evaluar la eficiencia energética de un producto y los patrones locales de temperatura y su distribución en el elemento, lo que puede relacionarse en algunos casos con problemas de condensación, daños por humedad e integridad estructural. El análisis bidimensional de transferencia de calor por conducción de THERM se basa en el método de los elementos finitos, esto modelar un amplio rango de geometrías sin importar su complejidad (Fuente: <https://windows.lbl.gov/software/therm>).

3.3. Sistemas de evaluación de eficiencia energética

3.3.1. PassivHaus

A través de lo que publica Guía del estándar Passivhaus (FENERCOM, 2011), este modelo se formuló oficialmente en 1988 por el profesor Bo Adamson de la Universidad sueca de Lund, y el profesor Wolfgang Feist, del Instituto alemán de Edificación y Medio Ambiente. En 1990 se realizó el primer proyecto en estándar Passivhaus, en el cual se desarrollaron 4 casas pareadas en la ciudad de Darmstadt, Alemania.

Los edificios construidos bajo los preceptos del Passivhaus son edificios confortablemente cálidos en invierno y agradablemente frescos en verano, y que admiten cualquier tipo de forma o diseño. Aunque inicialmente fue aplicado a viviendas unifamiliares, su uso se adaptó a otras tipologías como escuelas, centros cívicos, iglesias, estaciones de bomberos, etc. Estos edificios pueden ahorrar hasta un 90% de su consumo energético respecto a las construcciones convencionales, siempre y cuando se cumplan con los principios básicos de la normativa.

El certificado PassivHaus de una edificación, supone que la demanda de energía para calefacción o refrigerar, es tan baja que se hace innecesario la implementación de un sistema adicional de acondicionamiento mecánico. La energía necesaria puede aportarse a través de la renovación higiénica del aire, ya que solo necesita una fuente adicional solo en momentos puntuales. A continuación, se muestran algunos de los parámetros básicos para dar cumplimiento al modelo Passivhaus:

- Demanda máxima para calefacción de $15 \text{ kWh/m}^2 \times \text{año}$.
- Demanda máxima para refrigeración de $15 \text{ kWh/m}^2 \times \text{año}$.
- Consumo de energía primaria no superior a $120 \text{ kWh/m}^2 \times \text{año}$.
(Energía primaria de todos los sistemas de calefacción, refrigeración, agua caliente sanitaria, electricidad auxiliar, electricidad general, electrodomésticos, etc.)
- Valor del ensayo de estanqueidad al aire $\leq 0,6/h n_{50}$
(Renovaciones de aire por hora de acuerdo a la EN 13829 para una diferencia de presión de 50 pascales)
- Temperaturas superficiales interiores de la envolvente térmica $> 17^\circ \text{ C}$ durante invierno.

Estos hitos fueron desarrollados a nivel teórico en los años 90 y posteriormente se experimentaron en una edificación. A partir de ello se desarrolló un software que fue afinándose a partir de los datos experimentales en localizaciones de todo el mundo. Como resultado se ha obtenido un sencillo software denominado Passive House Planning Package (PHPP), con el cual es posible alcanzar los objetivos que comprende el estándar. De esta manera se garantiza el

funcionamiento en adecuadas condiciones de confort (EN15251) de la edificación durante todo el año, en todo lugar (climas fríos) y para todo usuario. Cabe señalar que cuando se habla de todo lugar, se refiere en específico, a los climas que presenta Europa central, cuna del estándar Passivhaus. Sin embargo, la extensión de los criterios del modelo hacia climas más cálidos, podría ocasionar episodios de sobrecalentamiento en los espacios interiores, es, en este aspecto, donde el estándar aún se encuentra en fase de desarrollo, incorporando valores característicos y experiencias que permitan adaptarlo a otro tipo de clima.

Es por esto, que se recalca el hecho de que **un edificio Passivhaus, no se consigue mediante una acumulación de varios elementos pasivos (no es posible logra el estándar por fases), ya que elementos concretos pueden tener una influencia positiva y/o negativa (por ej. porcentaje de acristalamiento) en la demanda energética total, por lo tanto, es importante calcular el funcionamiento durante el ciclo de un año completo**, a fin de corroborar el adecuado desempeño energético de las construcciones.

Fuente: (FENERCOM, 2011).

3.3.2. Certificación Edificio Sustentable (CES)

El objetivo del sistema es evaluar, calificar y certificar el grado de sustentabilidad ambiental de un edificio, entendiendo ésta como la capacidad de un edificio de lograr niveles adecuados de calidad ambiental interior, con un uso eficiente de recursos y baja generación de residuos y emisiones. Este sistema puede ser aplicado a edificios de uso público con cualquier carga ocupacional, siendo la condición mínima que posea al menos un recinto regularmente ocupado.

Este proceso de certificación consta de dos etapas, la Pre-Certificación y la Certificación propiamente tal, extendiéndose con el sello “Plus Operación” en la eventualidad de que se solicite adicionalmente. En resumen, las etapas son:

- Pre-certificado “Edificio Sustentable”: Se evalúa la arquitectura e instalaciones del edificio.
- Certificado y Sello “Edificio Sustentable”: Se evalúa la arquitectura, instalaciones y construcción del edificio.
- Sello “Plus Operación”: Se evalúa la gestión durante la operación del edificio.

La Pre-Certificación se establece principalmente como una instancia de evaluación de la etapa de diseño que permite introducir mejoras a su arquitectura e instalaciones, en forma previa o durante su construcción. En cambio, la Certificación se obtiene una vez que se ha efectuado la

recepción municipal, de manera de efectuarse sobre el edificio construido definitivamente y en condiciones de ser ocupado.

La Pre-Certificación y la Certificación se basa en el cumplimiento de un conjunto de 23 variables, desagregadas en 15 requerimientos obligatorios y 33 requerimientos voluntarios que otorgan puntaje. Los requerimientos voluntarios poseen una ponderación relativa en el conjunto, que se traduce en puntaje. El máximo puntaje que puede obtenerse es de 100. Para obtener la certificación se debe cumplir con los requerimientos obligatorios, y adicionalmente los voluntarios, para obtener un puntaje mínimo de 30 puntos. A partir de este mínimo, se proponen tres rangos de certificación en base al indicador global del edificio, estos son:

- “Edificio Certificado”: 30 a 54,5 puntos
- “Certificación Destacada”: 55 a 69,5 puntos
- “Certificación Sobresaliente”: 70 a 100 puntos

Como método de evaluación de los indicadores del edificio, existen 2 alternativas, la evaluación **prescriptiva**, y la **prestacional**. La primera de ellas, se enfoca en las causas que influyen en la Calidad del Ambiente Interior (CAI) y el uso de recursos (energía y agua), **fijando criterios determinados tales como valores límite de transmitancia térmica de la envolvente y rendimiento nominal de equipos**. Su ventaja es que simplifica la evaluación es que simplifica la evaluación de cumplimiento, y la desventaja es que **no permite analizar las sinergias y efectos indeseados por diversas causas**. Por otra parte, la evaluación prestacional en términos simples, se enfoca en los “efectos” en la calidad del ambiente interior y el uso de recursos, fijando requerimientos basados en prestaciones o resultados (output), usando los sistemas pasivos y activos como “inputs”. Se realiza mediante **programas informáticos especializados** de tipo “dinámico”, o planillas de cálculo. **Su ventaja es que es que permite medir sinergias y corregir efectos indeseados**, y la desventaja es que requiere de herramientas de análisis y conocimientos específicos para utilizarlas. Como criterio general, entre más cercana a resultados “reales” sea la evaluación, la metodología se complejiza. Si bien **cuando el edificio a evaluar tiene baja complejidad, la evaluación prescriptiva es una buena aproximación**. Dado lo anterior y como ocurre en otros sistemas, **la evaluación prestacional otorga, en general un mayor puntaje** que la prescriptiva.

Fuente: (IC & IDIEM, 2014).

3.3.3. LEED

Acrónimo para Leadership in Energy and Environmental Design (Liderazgo en Energía y Diseño Medioambiental). Es un programa de certificación voluntario e independiente para edificios Sustentables, que reconoce las buenas prácticas en materia medioambiental de eficiencia energética. Esta herramienta fue desarrollada en el año 2000 por el U.S. Green Building Council (USGBC), convirtiéndose en la actualidad, en el sistema de sustentabilidad para edificios de mayor consistencia y relevancia global. El objetivo de esta certificación, es, mejorar la forma de diseñar, construir, operar y mantener las edificaciones, con el fin de disminuir los impactos ambientales

resultantes de su ciclo de vida, manteniendo espacios interiores saludables, seguros y confortables para los ocupantes.

Tipologías de proyectos que Certifica

La certificación, se estructura en Sistemas de Clasificación (Rating Systems) para organizar las categorías de proyectos, dado que tiene herramientas de evaluación específicas para cada categoría. Este sello para construcciones sustentables, es lo bastante flexible para que distintos tipos de proyectos puedan certificarse, ya sean nuevos o existentes, edificios completos o parte de ellos, colegios, hospitales, residenciales, edificios corporativos o de planta libre, entre otros. Seguidamente se mencionan los Sistemas de Clasificación LEED:

- LEED BD + C (Building Design and Construction)
Colegios – Núcleo y envolvente – Hospitales – Retail – Nuevas Construcciones – Residenciales Multifamiliares de altura – Hoteles – Data Center – Centros de Bodegaje
- LEED BD + C (Home Design and Construction)
Casas – Viviendas mutifamiliares de baja y mediana altura para proyectos Residenciales, LEED provee 3 alternativas de certificación dependiendo tanto de la cantidad de familias que habitan la vivienda, como de la cantidad de pisos que la edificación posee, existiendo la siguiente sub-clasificación:
 - Viviendas de 1 a 3 pisos: LEED for Homes
 - Viviendas de 4 a 6 pisos: Multifamily Midrise
 - Viviendas de más de 6 pisos: BD + C New Construcion, con los requerimientos específicos para vivienda
- LEED ID + C (Interior Design and Construction)
Interiores Comerciales – Retail – Hostelería
- LEED O + M (Operations and Maintenance)
Edificios Existentes (completos, no parte de ellos) - Colegios - Retail - Data Center - Hostelería Centros de Bodegaje - Multifamiliares
- LEED ND (Neighborhood development)
Desarrollo de Barrios (plan y proyecto construido)

Aspectos Temáticos que Evalúa

LEED es un sistema de certificación multi-criterio, lo que significa, que cubre distintos aspectos de sustentabilidad, y por tanto, aborda los diferentes impactos medioambientales de un proyecto durante su ciclo de vida, lo que además de ser favorable para el hábitat natural, también conlleva beneficios sociales y económicos. Para esto, existen 9 categorías (7 principales y 2 adicionales) que abarcan y organizan estos criterios de sustentabilidad. En la actual versión (v4) del sistema LEED, las categorías son:

- Sitios Sustentables
- Eficiencia de agua
- Energía y atmosfera
- Materiales y recursos
- Calidad del ambiente interior
- Innovación en diseño
- Prioridad regional
- Proceso Integrado
- Locación y Transporte

Categorías de Certificación

Las categorías de la certificación LEED se rigen por medio de la obtención de puntaje en las distintas variables que plantea, siendo el puntaje mínimo para obtener algún certificado 40 puntos, y el máximo 110. Antes de obtener algún tipo de certificado primero se debe cumplir con ciertos requisitos obligatorios, que no otorgan puntaje, pero constituyen la base de la certificación. Realizado lo anterior, por medio de la revisión y evaluación del proyecto, existen 4 categorías de certificación según el puntaje total obtenido. A continuación, se mencionan las categorías establecidas por cada nivel de puntaje:

Certificado: 40 a 49 puntos

Plata: 50 a 59 puntos

Oro: 60 a 79 puntos

Platino: 80+ puntos

Fuente: Green Building Council Chile (<http://www.chilegbc.cl/web2017/index.php?sec=proyectos-leed>).

Energía y Atmosfera

Se hace mención especial en esta temática de la certificación sustentable LEED, ya que para optar a alguna categoría de certificación existen 3 prerrequisitos dentro de este apartado. Específicamente el prerrequisito número 2 denominado Rendimiento Energético Mínimo, y, en palabras del mismo documento este: “Establece una calificación de eficiencia energética mínima de los sistemas del edificio, de tal manera que reduzca los impactos ambientales y económicos asociados al uso excesivo de energía”. Para esto existen 3 opciones las cuales son:

1. Simulación Energética Completa del Edificio
2. Cumplimiento Prescriptivo: ASHRAE Advanced Energy Design Guide
3. Cumplimiento Prescriptivo: Advanced Building Core Performance Guide

Situando el foco en la opción número 1, dado que va acorde a este trabajo, el documento señala que el rendimiento del edificio propuesto debe demostrar mejoras de un 10 % respecto a la línea base del edificio, o un 5 % para renovaciones mayores de edificios existentes.

Calcular la línea base del edificio propuesto, debe realizarse de acuerdo a la metodología indicada en el Apéndice G del ANSI/ASHRAE/IESNA Standard 90.1 – 2016, utilizando un software de simulación energética. En la sección 3.5.1 “*Metodologías para la simulación energética*” del documento presente, se profundiza sobre este procedimiento.

Fuente: (ChileGBC, 2012).

3.4. Estimación de las cargas térmicas de refrigeración y calefacción.

Las condiciones térmicas de los espacios interiores de una edificación dependerán de las pérdidas y ganancias de calor que existan cuando esta interactúe con el medio circundante y se encuentre en etapa de operación. El edificio tenderá a calentarse cuando las ganancias de calor sean mayores a las pérdidas, y a enfriarse en el caso contrario. Estos escenarios pueden llegar a crear discomfort en los ambientes interiores, por esta razón se hace necesario calefaccionar o refrigerar un ambiente mediante sistemas de climatización para contrarrestar los desbalances que podrían llegar a ocurrir. A continuación, se muestra los conceptos generales para la estimación de las cargas térmicas de una edificación.

El cálculo de cargas térmicas de refrigeración y calefacción se realiza mediante un equilibrio térmico del edificio en estudio. En este balance se consideran las pérdidas y ganancias de las distintas componentes de calor (figura 3.3.1) igualándolas a 0 mediante la ecuación de la figura 3.3.2:

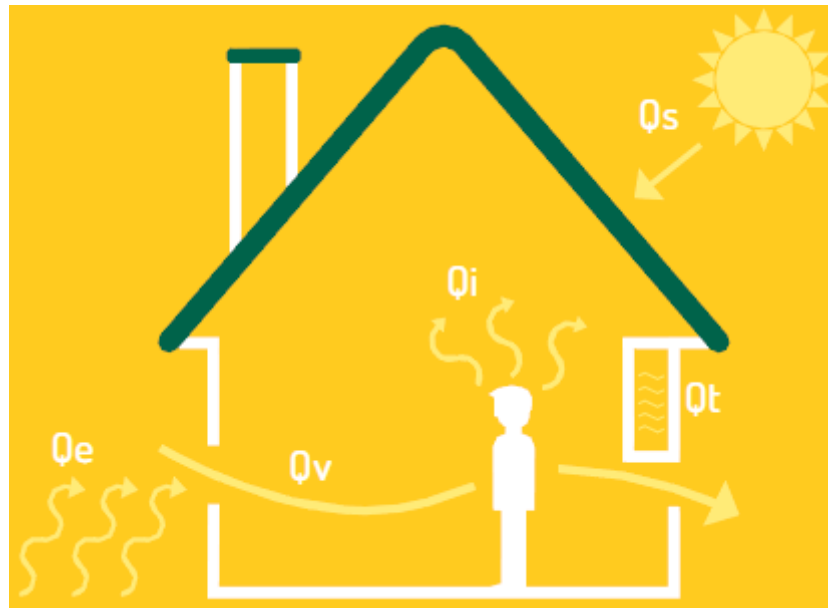


Figura 3.4.1 Componentes del calor en del balance térmico en una edificación.

Fuente: Manual de (Re) Acondicionamiento Térmico. (CDT, 2016).

$$Q_s \pm Q_i \pm Q_t \pm Q_v \pm Q_e = 0$$

Ecuación 3.4.1 Ecuación de equilibrio térmico.

Fuente: Manual de (Re) Acondicionamiento Térmico. (CDT, 2016).

Donde:

Q_s	=	Ganancias solares;
Q_i	=	Ganancias internas;
Q_t	=	Pérdidas o ganancias de calor por conducción;
Q_v	=	Pérdidas o ganancias producto de la ventilación;
Q_e	=	Pérdidas o ganancias por efecto de la evaporación.

Ganancias solares (Q_s): Se refiere a las formas en que la radiación solar que incide sobre la edificación, estas pueden ser de forma indirecta por medio de las superficies opacas expuestas al exterior (muros y cubiertas), y en mayor medida de forma directa a través de las superficies acristaladas.

Ganancias internas (Q_i): Las ganancias internas provienen de las fuentes de calor que están dentro de la envolvente del edificio. Estas incluyen: personas, iluminación, equipos (computadores, TV, etc.) y artefactos (cocina, hervidor, etc.). Estas ganancias pueden considerarse como positivas en épocas invernales, sin embargo, en periodos de mayor calor, pueden resultar en sobrecalentamiento.

Calor por conducción (Q_t): La cantidad de calor que se pierde o gana por la envolvente, esta dependerá de las características térmicas de las soluciones constructivas, y de las diferencias de temperatura entre el interior y el exterior.

Calor por Ventilación (Q_v): La cantidad de calor que se pierde o gana producto de la ventilación cuando el aire exterior ingresa al interior del edificio, renovando o expulsando el aire interior hacia afuera. Esta ventilación puede darse de forma deliberada por medio de ventanas o puertas, o de manera involuntaria, mediante la infiltración de aire a través de fisuras o aberturas de la envolvente.

Evaporación (Q_e): La cantidad de calor que se pierde o gana por efecto del calor absorbido por la evaporación que se puede generar dentro o fuera de la vivienda.

Lo expuesto anteriormente fue extraído del Manual de (Re) Acondicionamiento Térmico (CDT, 2016), a modo de explicar de manera general los modelos matemáticos que son utilizados

para el cálculo de cargas térmicas de una edificación. Estos modelos hacen uso de las ecuaciones de termodinámica según el mecanismo de transferencia de calor correspondiente al flujo de calor que interactúe con el edificio. Existen variados modelos matemáticos para el cálculo de las cargas de refrigeración y calefacción (Método de Balance de Calor, Método de las Series Radiantes de Tiempo, Método de las Funciones de Transferencia), algunos más complejos que otros, dependiendo del grado de precisión que se requiera. A continuación, se expone el método de balance de calor, el cual es uno de los métodos más precisos en la determinación de cargas térmicas, y es el utilizado por el software EnergyPlus, que a su vez será el utilizado para desarrollar esta investigación.

Método de balance de calor

Según lo publicado en el capítulo 18 del ASHRAE Handbook – Fundamentals, (2017), el método de balance de calor tiene como principio el balance del calor interno de las caras superficiales de cada zona. Este balance térmico reúne los siguientes componentes de transferencia de calor: radiación de onda larga, radiación de onda corta, radiación producto de los equipos, conducción a través de los muros y convección. Estas componentes se enlazan mediante la siguiente ecuación:

$$q''_{LWX} + q''_{SW} + q''_{LWS} + q''_{ki} + q''_{sol} + q''_{conv} = 0$$

Ecuación 3.4.2 Ecuación del método de balance de calor para zonas interiores.

Fuente: Handbook – Fundamentals ASHRAE, (2017)

Donde:

q''_{LWX} = intercambio neto del flujo de radiación de onda larga entre las superficies de la zona, W/m^2 ;

q''_{SW} = flujo neto de radiación de onda corta proveniente de las luces a las superficies, W/m^2 ;

q''_{LWS} = flujo de radiación de onda larga desde los equipos a la zona, W/m^2 ;

q''_{ki} = flujo conductivo a través de las paredes, W/m^2 .

q''_{sol} = flujo solar transmitido, y absorbido en las superficies, W/m^2 .

q''_{conv} = flujo de calor convectivo hacia el aire de la zona, W/m^2 .

3.5. Simulación Energética

Los balances energéticos que se producen en el edificio dependen tanto de parámetros climáticos como del propio edificio. La acción combinada y simultánea de los parámetros climáticos como la radiación solar, la temperatura del aire, la humedad, el viento, etc., provocan la respuesta térmica del edificio. Esta respuesta depende a su vez de la envolvente y la estructura interna del edificio, como son la forma del edificio, la orientación, superficie, aperturas al exterior, el tipo de muros, los materiales de los cerramientos, entre otros; y del uso y nivel de ocupación del edificio (Fernández, 2016). Es por esto, que muchos estudios se han realizado mediante simulación (Ascione et al., 2017; Bustamante et al., 2011; Charisi, 2017; Klimczak et al., 2018; Rodriguez et al., 2018), debido las múltiples prestaciones de esta técnica.

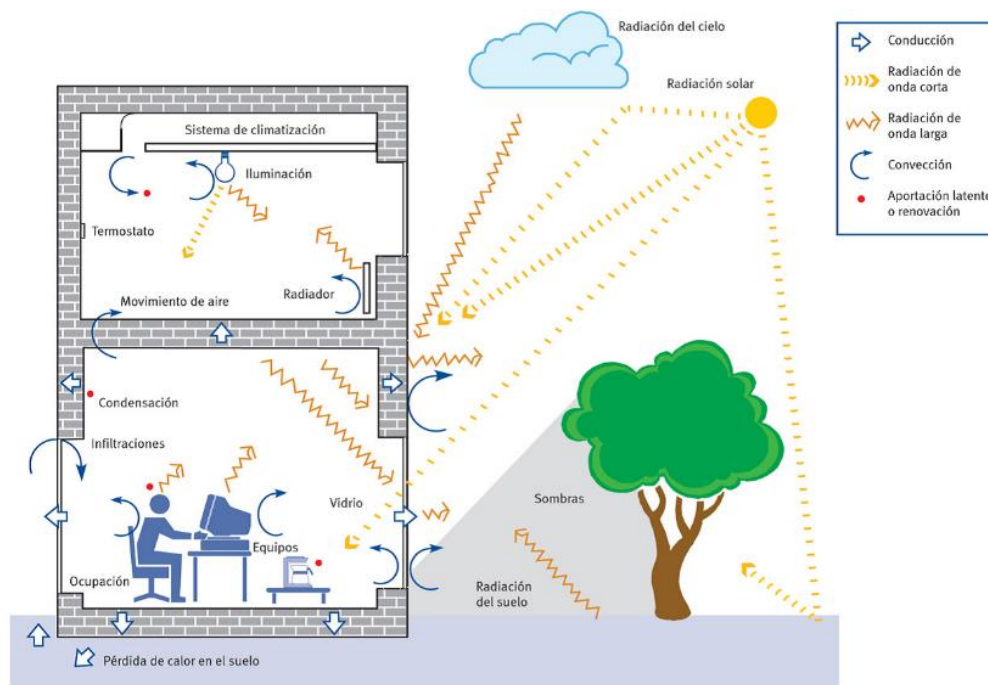


Figura 3.5.1 Fenómenos de Transferencia de Calor.

Fuente: <http://www.simulaciontermica.com>.

La física de un edificio y de sus instalaciones es muy compleja. Entre la envolvente del edificio y los elementos interiores se producen intercambio de flujos energéticos que definen el comportamiento térmico y ambiental del edificio. A la energía que entra en una zona se le denomina ganancia térmica, y a la potencia que hay que introducir o extraer de una zona, para mantener unas determinadas condiciones de temperatura y humedad se le denomina carga térmica. La suma de las diferentes cargas térmicas, positivas o negativas del edificio, a lo largo de un periodo de tiempo corresponde con la demanda térmica del edificio. **Las ganancias térmicas pueden no convertirse instantáneamente en cargas térmicas, ya que debido a la inercia térmica del edificio esta conversión puede tardar un tiempo (Fernández, 2016).**

El objetivo de la simulación es determinar durante un periodo de tiempo dado, la demanda energética o de regulación de un sistema, para que un ambiente se encuentre en condiciones establecidas para el confort de los ocupantes. Logrando predecir las fluctuaciones de energía necesarias para un ambiente en función de los cambios de su carga interna y externa. Esta demanda de cada una de las contribuciones, es muy variable en el tiempo y depende, de las condiciones climáticas, del tipo de edificio, sus características térmicas y del uso y control que se establezca. Otra característica importante es la **inercia térmica** que presentan los materiales de construcción que componen la envolvente térmica, esto es **la velocidad con la que cualquier variación de las condiciones ambientales exteriores o interiores producen sobre las condiciones térmicas de las zonas internas. Esta inercia nunca es despreciable y ello conlleva la necesidad de la simulación térmica para acercarnos de forma fiable a la demanda real; es decir no es posible el uso de procedimientos estacionarios de cálculos de cargas instantáneas para establecer con rigor la demanda energética del edificio** (MINETUR, 2008).

La razón fundamental por la que se utilizan métodos de simulación para el cálculo de la demanda es que en la práctica es muy costoso y difícil medir la demanda real de climatización, ya que, se tienen que independizar cada flujo de calor y analizar la posibilidad de reducirlos, por lo que se utilizan modelos que estiman la demanda teórica de climatización (Fernández, 2016).

Si bien, la simulación energética es capaz de predecir la demanda de climatización de un edificio, para esto, requiere de todas las variables que influyen en él, tanto exteriores como interiores. Para realizar esta tarea, sin dejar de lado los aspectos más relevantes de una simulación, existen guías que indican estos aspectos y establecen una hoja de ruta para obtener buenos resultados. Por lo anteriormente dicho, en el siguiente apartado, se mencionan las metodologías existentes, recopiladas del estado arte.

3.5.1. Metodologías para la simulación energética

Apéndice G del ANSI/ASHRAE/IESNA Standar 90.1 – 2016

Como se mencionó anteriormente en el apartado de Atmosfera y Energía de la Certificación LEED (ver 3.3.3), la ASHRAE establece un procedimiento para la simulación energética, dentro del apéndice G del ANSI/ASHRAE/IESNA Standar 90.1 – 2016, este último, específicamente, establece el Método de Clasificación de Desempeño (Performance Rating Method) para edificios no residenciales, ya sean, nuevos, o alteraciones de edificios existentes. El objetivo de este método es medir el desempeño energético de un edificio, comparándolo con una línea base. La línea base se construye a partir del mismo diseño del edificio en evaluación, pero con los requerimientos mínimos indicados en el estándar. De esta manera se obtiene el consumo energético del edificio propuesto y del edificio base, lo cual, es comparado con el fin de clasificar su desempeño energético. El estándar, junto con mencionar las etapas a realizar, para dar cumplimiento a los requisitos que plantea, indica los requerimientos generales del programa de simulación, y la simulación energética propiamente tal. A continuación, se presenta un extracto del documento:

Programa de simulación

El programa de simulación deberá ser un programa informático para el análisis del consumo energético en edificaciones, como DOE-2, BLAST o EnergyPlus (sin limitarse a estos). Además, deberá tener como mínimo la capacidad explícita de modelar los siguientes puntos:

- 8760 horas por año
 - Variaciones horarias de ocupación, potencia de iluminación, potencia de equipos diversos, punto de ajuste de termostato, y operación de sistema HVAC, definidos separadamente para cada día de la semana y festivos.
 - Efectos de masa térmica
 - Diez o más zonas térmicas
 - Curvas de rendimiento de carga parcial para equipamiento mecánico
 - Curvas de corrección de capacidad y eficiencia para equipos mecánicos de calefacción y refrigeración.
 - Economizadores de aire con control integrado
 - Características del diseño del edificio de línea base especificadas en el apéndice.
-
- El programa de simulación deberá tener la capacidad de determinar directamente el desempeño energético de edificios, o producir informes horarios de uso de energía, por una fuente de energía adecuada.
-
- El programa de simulación deberá ser capaz de realizar cálculos de diseño de cargas para determinar las capacidades requeridas por equipos de HVAC y las tasas de flujos de aire y

agua en conformidad con estándares y manuales de ingeniería aceptados (como por ejemplo ASHRAE Handbook-Fundamentals).

- El programa de simulación deberá estar testeado de acuerdo al ASHRAE Estándar 140.

El programa deberá realizar la simulación utilizando información climática horaria, como temperatura y humedad del sitio, en el cual esta propuesto el edificio. En ciudades o regiones con más de una información climática, y para lugares donde los datos climáticos no estén disponibles, el diseñador deberá seleccionar los datos climáticos que mejor representen el clima del sitio de construcción.

Además, el apéndice G establece algunos de los requerimientos de modelado, para el cálculo del desempeño del edificio propuesto y para el edificio de línea base. En seguida se indican los apartados que comprenden estos requerimientos:

- Diseño del modelo
- Adiciones y alteraciones
- Clasificación de uso de espacios
- Horarios
- Envolvente
- Iluminación
- Bloques térmicos (grupos térmicos) – Zonas diseñadas de HVAC
- Bloques térmicos (grupos térmicos) – Zonas no diseñadas de HVAC
- Bloques térmicos (grupos térmicos) – Edificios residenciales multifamiliares
- Sistemas de HVAC (aire acondicionado)
- Sistemas de servicios de calentamiento de agua
- Cargas de receptáculo (equipos de oficina) y otras.
- Limitaciones de modelado del programa de simulación
- Condiciones exteriores
- Distribuciones de transformadores
- Elevadores
- Refrigeración

Dentro de los alcances de este procedimiento, el apéndice informa que tanto el desempeño energético del edificio propuesto, como el de la línea base, no son predicciones del consumo real de energía durante la etapa de operación. La experiencia real presentara diferencias con estos cálculos, debido a cualquier variación en relación con los apartados mencionados anteriormente.

Fuente: Apéndice G del ANSI/ASHRAE/IESNA Standar 90.1 (ASHRAE, 2016)

Apéndice 9 del manual CES

En el Manual de Certificación Edificio Sustentable, específicamente en la variable 5 “Demanda de Energía”, opción 1, se establece una evaluación prestacional con el fin de justificar una disminución de la demanda y consumo de energía de los edificios bajo observación. Esto, porque lo que establece el procedimiento es una comparación del edificio en cuestión, con un edificio de referencia. Mencionado lo anterior, es posible apreciar una semejanza directa con respecto al ANSI/ASHRAE/IESNA Standar 90.1. A continuación se expone lo que el manual señala:

Objetivo y alcance de la evaluación prestacional

La metodología de la evaluación prestacional y los procedimientos que la componen, tienen como objetivo poder cuantificar la reducción o aumento de la demanda y/o consumo de energía, bajo ciertas condiciones de uso.

Puede ser utilizada para evaluar el comportamiento de un edificio en etapa de diseño, así como el de un edificio existente. La evaluación se realiza mediante programas informáticos especializados o mediante una planilla de cálculo, como la proveída por el sistema de certificación. (CES).

El manual también señala los alcances de este tipo de evaluación, los cuales se anuncian a continuación:

- La evaluación prestacional no ofrece una alternativa al cumplimiento de los requerimientos obligatorios del sistema de certificación.
- La evaluación prestacional no es en ningún caso predictiva del comportamiento del edificio durante su etapa de operación.

Cuando utilizar la evaluación prestacional

Para efectos del sistema de certificación, la evaluación prestacional de la demanda de energía deberá utilizarse en los edificios que tengan al menos una de las siguientes características:

- **Tamaño:** superficie construida mayor a 700 m², excluidos subterráneos y estacionamientos.
- **Operación:** Funciona bajo un régimen de operación continuo.
- **Acrilamiento y Radiación Solar:** Poseer un porcentaje de ventana mayor a 40% considerando todas las fachadas del edificio, siendo dicho porcentaje en fachadas E y O no superior al porcentaje en fachada N, NE y NO. Poseer un porcentaje de acristalamiento en la cubierta del edificio, mayor a 5%, excluyendo aleros
- **Cargas Internas:** Poseer cargas internas mayores o iguales a 40W/m² por ocupación, iluminación y equipos, considerando todos los recintos del edificio.

Evaluación de edificios nuevos, existentes, y de interés patrimonial cultural.

Los requerimientos y procedimientos aplicaran tanto a edificios nuevos como existentes. Para edificaciones declaradas por la autoridad pertinente como de interés patrimonial cultural, tales como **Monumentos Nacionales, inmuebles de conservación histórica y edificios pertenecientes a zonas típicas, los requerimientos podrán ajustarse al “potencial de mejora” de cada edificio.**

Programas informáticos y sus características mínimas

La evaluación prestacional dinámica deberá utilizar un programa de simulación especializado, el cual deberá ser de base computacional y que permita analizar la demanda y consumo de energía del edificio. Deberá permitir modelar como mínimo lo siguiente:

- Todas las horas del año (8760 horas)
- Variaciones horarias en ocupación, iluminación, equipos misceláneos, seteo de termostatos, operación del sistema de climatización y agua caliente sanitaria, definidos separadamente para cada día de la semana.
- Efecto de la inercia térmica
- Al menos diez zonas térmicas
- Curvas de comportamiento a carga parcial para equipos mecánicos
- Curvas de corrección de la eficiencia y capacidad para equipos mecánicos de climatización.

El sistema de certificación indica algunos programas que, en la actualidad existen programas informáticos que cumplen con estas condiciones, tales como TAS, DesignBuilder, EnergyPlus. BLAST, DOE-2, IES, eQUEST, entre otros.

La simulación se realizará utilizando archivos climáticos con valores horarios del clima, para la localidad en que se emplaza el edificio. En caso de localidades que no poseen un archivo climático, o que posean más de uno, el profesional a cargo de la simulación deberá seleccionar y justificar el uso de un archivo climático que mejor represente la localidad de emplazamiento del edificio.

Procedimiento de evaluación

El cliente entregara la información necesaria para la entidad evaluadora realice los modelamientos y simulaciones. Estos pueden ser entregados directamente siempre que hayan sido desarrollados o visados por un asesor con registro CES. En dicho caso, los antecedentes serán reconocidos por la entidad evaluadora, facilitando el proceso de certificación.

El proceso de modelamiento y simulación deberá ser documentado, y dicha documentación debe ser entregada a la entidad evaluadora, incluyendo la información de entrada (inputs) y de salida (outputs) de la simulación, así como fichas técnicas de los materiales de la envolvente, equipos y sistemas de climatización como el manual detalla a continuación:

- Valores calculados de demanda de energía en climatización e iluminación del edificio objeto y el edificio de referencia.
- Valores Calculados de consumo de energía del edificio objeto y el edificio de referencia.
- Lista de las características del diseño arquitectónico y de las instalaciones que expliquen el comportamiento energético del edificio objeto, y que difieren de las características del edificio de referencia.
- Reporte de inputs y outputs del programa de simulación, incluyendo un desglose de la demanda de energía para climatización, refrigeración e iluminación; cargas internas por ocupación, iluminación y equipos; pérdidas y ganancias por la envolvente y ventilación.
- Horas de discomfort anuales.
- Tasas de ventilación e infiltración.
- Características y rendimientos de los equipos de climatización y ACS.

El sistema de Certificación Edificio Sustentable, separa la evaluación de la demanda de energía de la evaluación de consumo de energía, con el objeto de incentivar las “estrategias pasivas” del diseño arquitectónico por sobre las “estrategias activas” de las instalaciones. Lo anterior según explica el manual no se debe entender en ningún caso que las estrategias activas no sean necesarias; al contrario, son fundamentales para el correcto funcionamiento del edificio y la adecuada entrega de sus prestaciones, como por ejemplo la calidad del ambiente interior.

Fuente: (IC & IDIEM, 2014)

Guía técnica de apoyo número 2 del TDR_e

Las 2 metodologías mencionadas anteriormente, muestran una clara semejanza y por esto puede decirse que la metodología propuesta por el manual CES está basada en el ANSI/ASHRAE/IESNA Standar 90.1, debido a que este último lleva mucho más tiempo en vigencia. La siguiente metodología no es la excepción y presenta varias semejanzas, sin embargo, exhibe una redacción más acotada y detallada de los requerimientos de la simulación. Por esto, a continuación se detallan las características y procedimientos que plantea la Guía Técnica de apoyo N° 2 “Limitación de la Demanda Energética de Edificios” (CITECUBB, 2012):

Registros climatológicos

Para la ejecución de simulaciones de desempeño, deberán utilizarse registros climatológicos de datos obtenidos con una frecuencia horaria (hora a hora), privilegiándose la obtención de estos datos desde fuentes meteorológicas oficiales.

En caso de no existir o verse dificultado el acceso a una base de datos oficial de la localidad del proyecto, podrá utilizarse alternativamente una base de datos climatológicos obtenida mediante la triangulación de datos de las estaciones de medición disponibles más cercanas al lugar. En cualquier caso, deberá declararse el origen de la base de datos para su validación.

Definición Geométrica

Para la definición geométrica del edificio, se debe contar con todos los antecedentes relevantes, incluyendo planos y especificaciones técnicas de arquitectura, emplazamiento y otros que el equipo de diseño pudiera aportar para tal efecto.

Se creará un modelo que represente íntegramente el edificio, en cuanto a su forma, dimensiones, orientación, condición de contacto con el terreno y obstáculos remotos que puedan generar sombra sobre los cerramientos exteriores.

Para la evaluación de los vanos se deberá incluir aquellos obstáculos remotos, como voladizos, celosías, salientes laterales y cualquier otro elemento de control solar exterior, además del retranqueo de planos.

Definición Material

En el caso de elementos constructivos opacos, se deberá considerar las propiedades físicas (conductividad térmica y densidad) de los materiales que conformen las diferentes soluciones

constructivas. Los valores de estas propiedades se podrán obtener de certificados de ensayos de materiales otorgadas por instituciones acreditadas, según lo informado en la normativa NCh 853 Of. 2007 o el Manual de Aplicación de la Reglamentación Térmica (MART) del MINVU.

Para los elementos constructivos acristalados, se deberá considerar las propiedades físicas (conductividad térmica, densidad y factor solar) de los materiales que conformen las soluciones. Los valores de estas propiedades se podrán obtener de certificados de ensayos de materiales otorgadas por instituciones acreditadas, o según lo informado en la normativa NCh 853 Of. 2007.

Clasificación de los recintos

Los recintos ubicados al interior de la envolvente térmica de los edificios se clasificarán en recintos habitables y recintos no habitables:

- a) **Recinto habitable:** recinto interior destinado al uso de personas, cuya densidad de ocupación, actividad principal y tiempo de estancia exigen condiciones térmicas y de salubridad adecuadas.
- b) **Recinto no habitable:** recinto interior cuya ocupación, por ser ocasional, excepcional o por periodos muy cortos de tiempo, solo exige condiciones de salubridad adecuadas. Se incluyen dentro de esta categoría recintos tales como: laboratorios, salas de conservación de materiales, salas de máquinas, bodegas, etc.

Condiciones térmicas internas

Los requerimientos de confort térmico para cada recinto habitable o grupo de recintos habitables deberán ser definidos de acuerdo a la Guía Técnica de Apoyo N° 7: "Confort Higrotérmico"

En los recintos no habitables se permitirá una oscilación libre de la temperatura interior, cuando estos locales no tengan una condición de régimen especial de funcionamiento. En el caso de recintos no habitables que presenten requerimientos de temperatura para su operación, deberá definirse un rango de temperatura operacional particular con el fin de estimar la contribución del sistema de climatización del recinto a la demanda de energía.

Para efectos de cálculo de la demanda energética, los recintos se clasificarán en función de la cantidad de calor disipado en su interior, de acuerdo a la actividad principal que los caracterice y al periodo de utilización de cada espacio, en las siguientes categorías:

- a) **Recintos con carga interna baja:** espacios en los que se disipa poco calor. Son los espacios destinados principalmente a permanecer en ellos, con carácter eventual o sostenido. En esta categoría se incluyen espacios tales como: habitaciones, salas de estar, junto con sus zonas de circulación asociadas, etc.

- b) **Recintos con carga interna alta:** espacios en los que se genera gran cantidad de calor por causa de su ocupación y/o la operación de iluminación o equipos. Son aquellos espacios no incluidos en la definición de espacios con baja carga interna. El conjunto de estos espacios conforma la zona de alta carga interna del edificio. En esta categoría se incluyen espacios tales como: salas de clases, servidores de computación, auditorios, laboratorios de computación, cocinas industriales, salas de atención de público, etc.

Junto con lo anterior, deberá definirse un perfil de ocupación y operación con las fuentes de aportes y pérdidas de calor, para cada recinto o grupo de recintos, de acuerdo a su tipo:

- a) **Cargas de ocupación:** se deberá definir de acuerdo a la actividad metabólica de los ocupantes proyectados para el recinto, cuyo número, nivel de actividad y régimen de ocupación deberá ser estimado según el programa arquitectónico, información gráfica contenida en las plantas de arquitectura e indicaciones que pudiese aportar la institución mandante.

- b) **Cargas de iluminación artificial:** para la estimación de cargas de calor por operación de luminarias, deberá considerarse la aplicación de unidades eficientes. La contribución calórica particular de este ítem deberá ser concordante, en forma simultánea, con los requerimientos contenidos en la Guía Técnica de Apoyo N°4: “Eficiencia Energética de las Instalaciones de Iluminación.

- c) **Cargas de operación de equipos:** deberá considerarse la operación de artefactos eléctricos y equipos que contribuyan a la carga de calor de los recintos, incluyendo la eficiencia de operación de los sistemas de climatización, de acuerdo a lo señalado en la Guía Técnica de Apoyo N° 3: “Rendimiento de las Instalaciones Térmicas y de Climatización”

- d) **Cargas de ventilación e infiltración:** en todo caso, para la estimación de tasas de ventilación en recintos habitables y su contribución en términos de aportes o pérdidas de calor, se deberá dar cumplimiento simultáneo a las condiciones contenidas en la guía Técnica de Apoyo N° 6 “Calidad del Aire Interior”

El método de cálculo se formalizará a través de un programa informático que realiza de manera automática cálculos de demanda de energía, previa entrada de los datos necesarios para la definición del modelo de simulación. Los programas informáticos validados para la verificación de la limitación de demanda energética son: TAS, **DesginBuilder**, EnergyPlus, Trnsys, IES.

Fuente: TDRé (CITECUBB, 2012)

3.5.2. Programas informáticos

Existen muchos programas informáticos para la simulación energética de edificios, a través de la revisión bibliográfica realizada por Crawley et al., (2008), en la que compara las capacidades de 20 programas informáticos, se ha logrado acotar la lista, y si bien, los programas informáticos en general realizan una función similar, la manera en que estos interactúan con el usuario es muy diversa, por esto que, a continuación, se muestran los programas más utilizados y sus características principales:

Energyplus

EnergyPlus es un programa de simulación energética de edificios, utilizado por investigadores y profesionales relacionados a las áreas de la ingeniería y construcción, para modelar tanto el consumo de energía (para calefacción, refrigeración, ventilación, iluminación y otros), como el de agua en los edificios. Es un programa consola, que lee datos de entrada y escribe resultados en archivos de texto. Algunas de las características y capacidades de EnergyPlus incluyen:

- Soluciones integrales y simultáneas, de las condiciones de las zonas térmicas y la respuesta de los sistemas HVAC, lo que no supone que el sistema HVAC pueda cumplir con las cargas térmicas de la zona. Puede simular espacios bajo acondicionamiento y sin acondicionamiento.
- Solución basada en el balance de calor de los efectos radiativos y convectivos que generan temperaturas superficiales, confort térmico y cálculos de condensación.
- Cálculos de iluminación y deslumbramiento para informes de confort visual y control de iluminación.
- Modelo combinado de transferencia de calor y masa que considera el movimiento de aire entre las zonas
- Intervalos de tiempo sub-horarios definibles por el usuario, para la interacción entre las zonas térmicas y el ambiente, y con etapas de tiempo con variaciones automáticas de las interacciones entre zonas térmicas y los sistemas HVAC.

Energy Plus destaca como uno de los motores de simulación energética más validados en la industria, habiendo sido utilizado como herramienta de análisis para cientos de estudios de manera satisfactoria, además el software cuenta con el reconocimiento de la ASHRAE (American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers), ANSI (American National Standard Institute), e IEA (International Energy Agency) (Dirks et al., 2015).

Fuente: <https://energyplus.net/>

Hourly analysis program (HAP)

Contiene 2 herramientas en un solo programa: dimensionado de sistemas de aire acondicionado HVAC y simulación horaria del desempeño energético edificaciones, con lo que es posible obtener consumo y costo de energía. HAP está diseñado para para ingenieros, con el propósito de facilitar el trabajo diario de estimar cargas; diseño de sistemas; y evaluación del rendimiento energético. Los resultados generan por medio de gráficos e informes, proporcionando resúmenes e información detallada sobre el edificio; sistema; y desempeño de equipos. Este programa es adecuado el estudio de edificios nuevos o existentes. Finalmente, este programa ofrece amplias funciones para configurar y controlar los sistemas de aire acondicionado (HVAC) y componentes (Crawley et al., 2008).

TRNSYS

Es un software de entorno gráfico, utilizado para simular el comportamiento de sistemas transitorios. Aun cuando la gran mayoría de las simulaciones se centran en la evaluación del rendimiento de los sistemas de energía térmica y eléctrica, TRNSYS también se puede utilizar para modelar otros sistemas dinámicos, como el flujo del tráfico o los procesos biológicos.

TRNSYS se compone de dos partes, la primera es un motor (llamado kernel) que lee y procesa el archivo de entrada, resuelve el sistema de forma iterativa, determina la convergencia y grafica las variables del sistema. El "kernel" también provee de utilidades que (entee otras cosas) determinan propiedades termo-físicas, invierten matrices, realizan regresiones lineales, e interpolan archivos de datos externos. La segunda parte de TRNSYS es una extensa biblioteca de componentes, cada uno de los cuales modela el rendimiento de una parte del sistema. Algunas de sus principales aplicaciones abarcan los siguientes puntos:

- Simulación energética de edificios (incluye modelado LEED).
- Proceso termo-solares.
- Sistemas de bomba de calor por geotérmica.
- Estudio de sistemas de energía.
- Evaluación de tecnología emergente.
- Sistemas fotovoltaicos y eólicos.
- Operaciones solares de alta temperatura.
- Calibración de datos de simulación.

Fuente: <http://www.trnsys.com/>

TAS

Es un software en basado en complementos informáticos, destinados a simular el rendimiento energético de los edificios y sus sistemas. El módulo principal es TAS Building Designer, este realiza simulaciones dinámicas, integrando flujos de aire natural y forzado. El programa tiene una interfaz gráfica 3D que incluye importación de archivos CAD. Por otro lado, TAS Systems es un simulador de sistemas, controles HVAC, que puede trabajar conjuntamente, con el simulador de edificios. TAS Ambiens, es un sólido, y fácil de usar módulo CFD, que produce secciones transversales, de las micro variaciones del clima de un espacio (Crawley et al., 2008).

TAS combina la simulación térmica dinámico de los edificios, con cálculos de ventilación natural, que incluyen funciones de control avanzadas de las aberturas del edificio, y la capacidad de simular complejos sistemas. Este programa tiene 30 años de uso comercial en el Reino Unido, y el resto del mundo (Crawley et al., 2008).

DesignBuilder

Es un programa para la simulación energética de edificios con una estructura modular organizada en torno a un modelador 3D, el cual funciona como núcleo Actualmente el programa dispone de 9 módulos, cada uno de los cuales ofrece un tipo de análisis específico, con el propósito de complementarse entre sí, para ofrecer un análisis de desempeño energético integral. A continuación, se mencionan los módulos que ofrece DesignBuilder:

- **Visualización:** Permite visualizar modelos virtuales en forma de perspectivas renderizadas, la cual además estudiar el impacto del soleamiento en el edificio, mediante diagramas de recorridos solares 3D de acuerdo a la ubicación geográfica de cada proyecto.
- **Simulación:** Permite simulaciones dinámicas avanzadas, en la que Designbuilder funciona como una interfaz gráfica de usuario (GUI) para EnergyPlus, siendo este último el motor de cálculo de la simulación.
- **Optimización:** Este módulo emplea algoritmos evolutivos para determinar alternativas para el proyecto que ofrezcan el mayor beneficio en términos económicos, energéticos y/o de confort, considerando un amplio rango de variables, objetivos y restricciones de diseño.

- **Iluminación:** Permite la evaluación y optimización del uso de luz natural en edificios, para mejorar las condiciones de confort lumínico y al mismo tiempo reducir las cargas térmicas y consumos energéticos asociados con la iluminación artificial. Esto es llevado a cabo mediante el motor de cálculo Radiance, con el que es posible calcular parámetros de desempeño lumínico como, el nivel de iluminancia y los factores de luz diurna.
- **Coste:** Por medio de este módulo es posible evaluar las implicancias económicas del desempeño energético y medioambiental de los edificios, considerando los costes de construcción y de energía, así como también los costes asociados a su ciclo de vida.
- **CFD:** Permite evaluar de manera detallada las condiciones interiores de los edificios, como el movimiento y distribución de las masas de aire y temperatura. Utilizando los mismos métodos que cualquier programa CFD genérico, pero sin la necesidad de conocimientos altamente especializados.
- **HVAC:** Es una útil y flexible herramienta para acceder a funciones avanzadas de análisis de sistemas HVAC que proporciona EnergyPlus. Con este módulo es posible simular una amplia gama de sistemas de calefacción, refrigeración, y ventilación, así como sus componentes con un alto nivel de detalle.
- **LEED:** Ofrece una serie de funciones para evaluar los requerimientos de los créditos de energía del sistema de certificación LEED, mediante el modelado del edificio y sus sistemas de acuerdo al Apéndice G del estándar ASHRAE 90.1 2007 y 2010.
- **EMS:** Sistema de Gestión de Energía (Energy Management System) permite incluir secuencias de comandos, o scripts, en las simulaciones, para personalizar el comportamiento del edificio y sus sistemas. Con esta herramienta es posible ampliar las funciones de Energy Plus para, por ejemplo, modelar controles avanzados de los sistemas de climatización, ventilación natural, iluminación y acristalamiento.

Fuente: Manual de ayuda DesignBuilder en español (Ordoñez, 2017)

3.6. Demanda y simulación energética en la literatura

En la literatura actual es posible encontrar variados estudios referentes a reducir la demanda de energía, utilizando métodos de simulación computacional. Es por esto que a continuación se recopilarán algunos estudios de interés, que servirán de guía para este estudio y su finalidad de mejorar la eficiencia energética de la facultad de Ingeniería.

Análisis de comportamiento térmico de edificios de oficinas en comunas de la región metropolitana, Chile (Bustamente et ál., 2011)

En este estudio se analizó el comportamiento térmico de 2 edificios de oficina, de la región metropolitana de Santiago. Uno de ellos presenta fachada de muro cortina completamente transparente con uso de vidrio selectivo; otro, con fachada de muros de hormigón y ventanas de vidrio simple; y finalmente también fue analizado un edificio con fachada doble piel supuesto en la ciudad de Santiago, el cual fue recogido de estudios en la bibliografía.

Se estimaron las demandas de refrigeración y calefacción para todos los edificios mediante simulación dinámica con el software TAS, luego de esto, se realizaron modificaciones en los sistemas constructivos de cada uno de ellos, para evaluar el cambio que producen las modificaciones en las necesidades de demanda. Las configuraciones, detalles y especificaciones técnicas de los edificios en cuestión, se establecieron de acuerdo a la documentación de cada uno de ellos, y a continuación, se muestra un resumen de los datos de entrada para las simulaciones:

Edificio 1:

- Muro cortina: DVH Cristal Sun Energy Gvb 6 mm, 12 de cámara de aire y vidrio claro de 4mm.
 - Transmitancia solar: 0,4
 - Transmitancia lumínica: 0,5
- Piso sobre subterráneo: Hormigón armado 150 mm
- Cubierta: Hormigón armado 150 mm - Poliestireno expandido 80 mm.

Edificio 2:

- Ventanas: vidrio simple claro
 - Transmitancia solar: 0,87
 - Transmitancia lumínica: 0,9
- Muros de Hormigón armado de 150 mm.
- Piso sobre subterráneo: Hormigón armado 150 mm
- Cubierta: Hormigón armado 150 mm - Poliestireno expandido 60 mm.

Edificio 3:

- Ventanas norte y sur: DVH Cristal Sun Energy Gvb 6 mm, 12 de cámara de aire y vidrio claro de 4mm.
 - Transmitancia solar: 0,4
 - Transmitancia lumínica: 0,5
- Muros: Hormigón Armado 150 mm - Poliestireno expandido 50 mm
- Cubierta: Acero cincado, cielo de Hormigón Armado - Poliestireno expandido 80mm.
- Doble piel exterior: vidriado simple
 - Transmitancia solar: 0,87
 - Transmitancia lumínica: 0,9

Las tablas a continuación, muestran los resultados obtenidos por las simulaciones efectuadas, en ellas se organizan los valores estimados de calefacción, refrigeración y porcentaje de reducción de la demanda de refrigeración, producto de las modificaciones realizadas al Escenario 1.

Demandas de energía de acondicionamiento térmico para el Edificio 1			
	Calefacción kWh/m ² año	Refrigeración kWh/m ² año	Disminución de refrigeración (%)
Escenario 1: Sin modificaciones.	3,9	62,5	-
Escenario 2: Escenario 1, con alero de 90 cm, en fachada norte; fachada oriente y poniente asume protección solar de celosías opacas verticales.	5,9	52,1	16,6
Escenario 3: Escenario 2, con ventilación nocturna de 8 ren/h entre las 22:00 y 7:00 de domingo a viernes en la mañana, entre octubre y marzo (incluidos).	2,4	39,8	36,3

Tabla 3.6.1 Demandas de energía de acondicionamiento térmico para el Edificio 1.

Fuente: Análisis de comportamiento térmico de edificios de oficinas en comunas de la región metropolitana, Chile (Bustamante et al., 2011).

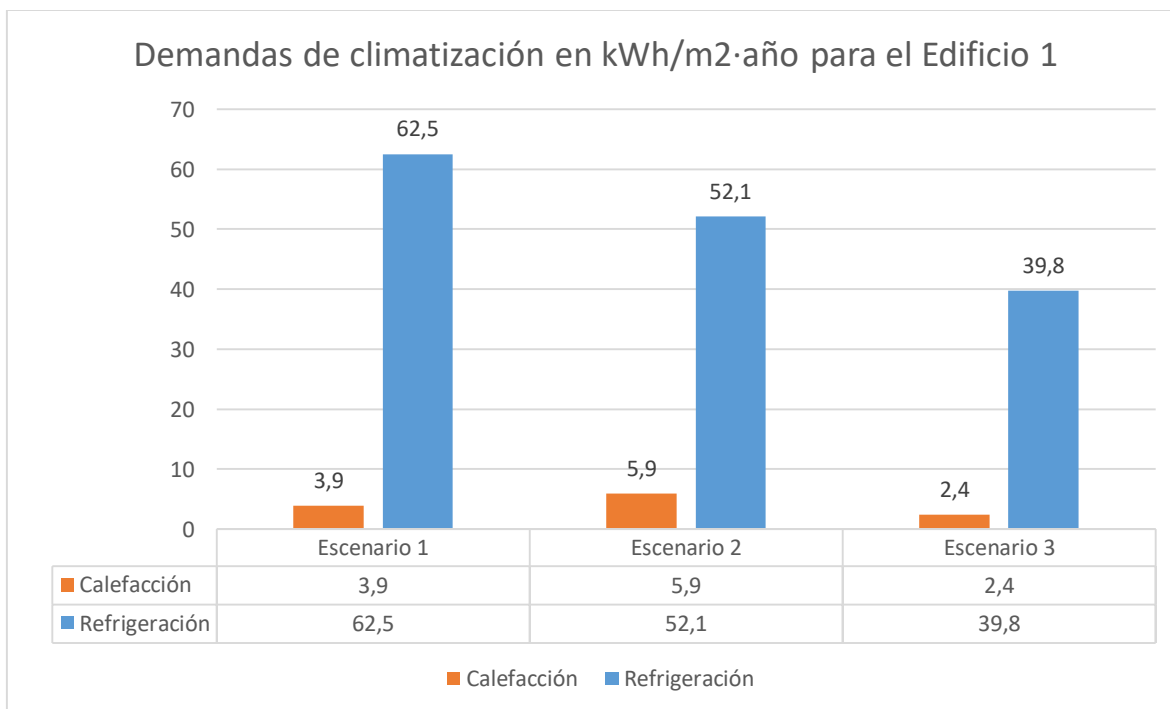


Figura 3.6.1 Demandas de climatización en kWh/m²·año para el Edificio 1.

Fuente: Análisis de comportamiento térmico de edificios de oficinas en comunas de la región metropolitana, Chile (Bustamante et al., 2011).

Demandas de energía de acondicionamiento térmico para el Edificio 2			
	Calefacción kWh/m² año	Refrigeración kWh/m² año	Disminución de refrigeración (%)
Escenario 1: Sin modificaciones.	19,2	26,8	-
Escenario 2: Escenario 1, asume el total de ventanas como DVH: Sun Energy Gvb 6mm, 12 mm cámara de aire y vidrio claro 4 mm. TS = 0,4 y TI = 0,5.	17,7	23,4	12,7
Escenario 3: Escenario 2, con aislación térmica de 50 mm exterior al muro; alero 90 cm en fachada norte; protección solar vertical en fachada poniente y oriente.	8,2	25,2	6
Escenario 4: Escenario 3, con ventilación nocturna de 8 ren/h entre las 22:00 y 7:00 de domingo a viernes en la mañana, entre octubre y marzo (incluidos).	9,7	12,2	54,5

Tabla 3.6.2 Demandas de energía de acondicionamiento térmico para el Edificio 2.

Fuente: Análisis de comportamiento térmico de edificios de oficinas en comunas de la región metropolitana, Chile (Bustamante et al., 2011).

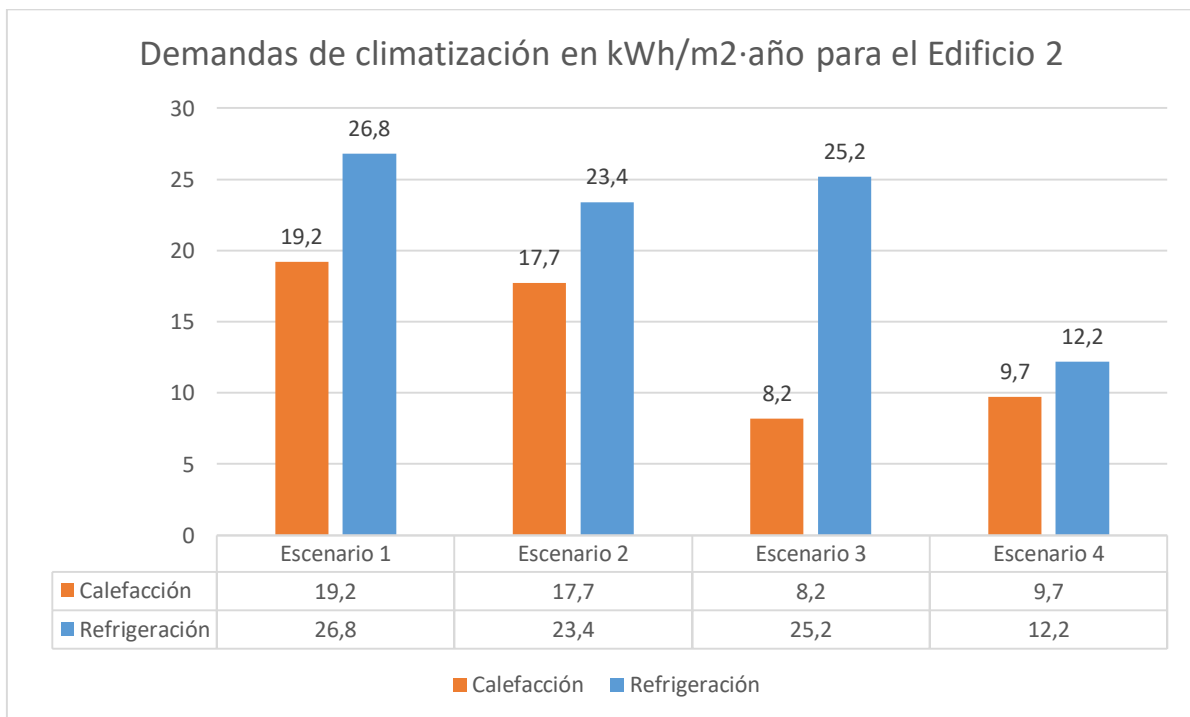


Figura 3.6.2 Demandas de climatización en kWh/m²·año para el Edificio 2.

Fuente: Análisis de comportamiento térmico de edificios de oficinas en comunas de la región metropolitana, Chile (Bustamante et al., 2011).

Demandas de energía de acondicionamiento térmico para el Edificio 3			
	Calefacción kWh/m2 año	Refrigeración kWh/m2 año	Disminución de refrigeración (%)
Escenario 1: Edificio con ventanas y doble piel cerradas.	9,8	25,6	-
Escenario 2: Ventanas del edificio cerradas; ventana inferior y superior de la doble piel abiertas durante octubre a marzo (incluidos). Resto del año, todas las aperturas cerradas.	9,9	22,7	11,3
Escenario 3: Ventilación nocturna: ventanas del edificio cerradas en el día, y abiertas en un 30% durante la noche, desde octubre a marzo (incluidos); ventana inferior y superior de la doble piel abiertas durante el mismo periodo. Resto del año supone todas las aperturas cerradas.	10,2	13,2	48,3
Escenario 4: Se elimina la doble piel; alero 90 cm en ventanas norte; ventilación nocturna igual al Escenario 3. Resto del año supone todas las aperturas cerradas.	11,6	6,8	74,3

Tabla 3.6.3 Demandas de energía de acondicionamiento térmico para el Edificio 3.

Fuente: Análisis de comportamiento térmico de edificios de oficinas en comunas de la región metropolitana, Chile (Bustamante et al., 2011).

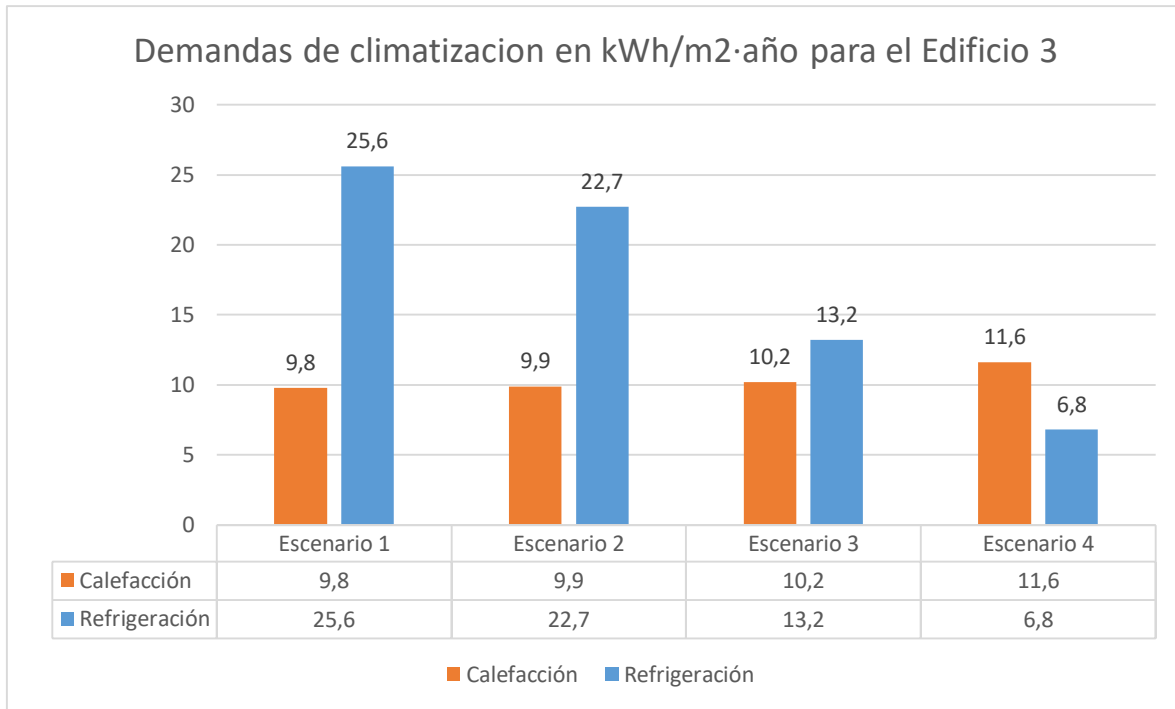


Figura 3.6.3 Demandas de climatización en kWh/m²·año para el Edificio 3.

Fuente: Análisis de comportamiento térmico de edificios de oficinas en comunas de la región metropolitana, Chile (Bustamante et al., 2011).

Finalmente, al amparo de los resultados, los autores concluyen que el edificio que presenta muro cortina con un 100% de superficie vidriada presenta un mejor comportamiento durante el periodo de calefacción con respecto al edificio con fachada combinada, esto, debido a la alta ganancia solar; doble vidriado hermético; y muros con aislamiento. Sin embargo, este edificio (Edificio 1) con fachada completamente vidriada, presenta una alta demanda de refrigeración, incluso la que llega a duplicar la demanda (refrigeración) del Edificio 2. A continuación de esto, señalan que, si bien el fenómeno de sobrecalentamiento se presenta en ambos edificios, es más severo en el primero de ellos (Edificio 1). Por esto, ellos **señalan que un edificio con fachadas 100 % vidriadas presenta un peor comportamiento que uno con fachada combina**. Esto porque aun con la presencia de vidrios selectivos en el Edificio 1, o con cualquiera de las modificaciones propuestas en los escenarios de este, no se logra bajar la demanda de refrigeración hasta los niveles del caso base (Escenario 1) del Edificio 2.

En cuanto a las modificaciones realizadas en el Edificio 2, se puede apreciar que la implementación de doble vidriado hermético (DVH) y aislación térmica en muros, provoca que la demanda de calefacción baja a menos de la mitad que el escenario original, llegando a menos de 10 kWh/m² año. **Además, es posible apreciar que la ventilación nocturna durante el periodo de refrigeración (octubre a marzo) en conjunto con las protecciones solares, logran que el edificio presente un alto estándar de eficiencia energética.**

Los autores además señalan que la doble piel no ofrece un buen comportamiento térmico para el Edificio 3, y que, en el supuesto de ofrecerlo, se lograría con una compleja operación de sus aperturas, que requerirían de ser abiertas en ciertas horas de algunos días.

Para finalizar el estudio resalta que el mejor comportamiento de los edificios bajo, se obtiene mediante fachadas parcialmente vidriadas, con doble vidrio hermético, protección solar exterior opaca en ventanas y ventilación nocturna. Además, aconsejan que los vidrios selectivos permiten disminuir significativamente las ganancias solares en los edificios, pero no logran eliminar el riesgo de sobrecalentamiento. Si se desea conseguir un alto estándar en el comportamiento térmico, debe usarse protección solar, pero ello conllevaría a una contradicción al hecho de construir una fachada 100% acristalada.

ENVOLVENTES: LA PIEL DE LOS EDIFICIOS (Baixas, 2012)

Baixas, (2012) señala que para un clima mediterráneo con estación seca prolongada según clasificación de Köppen, (el cual poseen la región de Valparaíso y Metropolitana de nuestro país), los veranos tiene la característica de ser calurosos y con altos índices de radiación solar a lo largo del año. **Si bien el frío invierno que afecta a estas regiones exige cuidar los sistemas de aislación y captación solar, en los veranos se deberían considerar protecciones solares y sistemas de ventilación adecuada.** Estas características, según expresa el autor, deberían ser suficientes para evitar recurrir a equipos mecanizados de enfriamiento. Por otra parte, en la temporada invernal se hace necesario considerar sistemas eficientes de aislación, hermeticidad y captación solar. Señala que estas medidas deberían ser suficientes para reducir apreciablemente los consumos energéticos de climatización que hoy en día rondan los 120 (kWh/m² x año), siendo posible llegar hasta los 10 (kWh/m² x año) mediante uso de sistemas pasivos según lo que indica la experiencia internacional (Baixas, 2012).

PARÁMETROS DE DISEÑO Y DESEMPEÑO ENERGÉTICO EN EDIFICIOS DE CLIMA MEDITERRÁNEO (Bustamante & Encinas, 2012)

En el estudio realizado por Bustamante & Encinas (2012), se realizó un **análisis de sensibilidad** mediante simulaciones computacionales, para evaluar **el nivel de importancia relativo** en la demanda de enfriamiento de los siguientes parámetros:

- Porcentaje de acristalamiento
- Tipo de protección solar
- Tipo de vidrio
- Orientación

Este estudio propuso un modelo arquitectónico estándar y estadísticamente representativo del mercado de edificios de oficinas en Santiago de Chile, dentro de este modelo, se establecieron 288 casos, correspondientes a todas las posibles combinaciones de variantes para cada parámetro de diseño. El clima utilizado para las simulaciones fue clima mediterráneo o templado cálido según la clasificación de Köppen.

En la siguiente figura se muestran los resultados del estudio, siendo r el coeficiente de correlación de Pearson, el cual adopta un valor de 1 para una correlación perfecta y 0 cuando no existe una correlación lineal entre las variables.

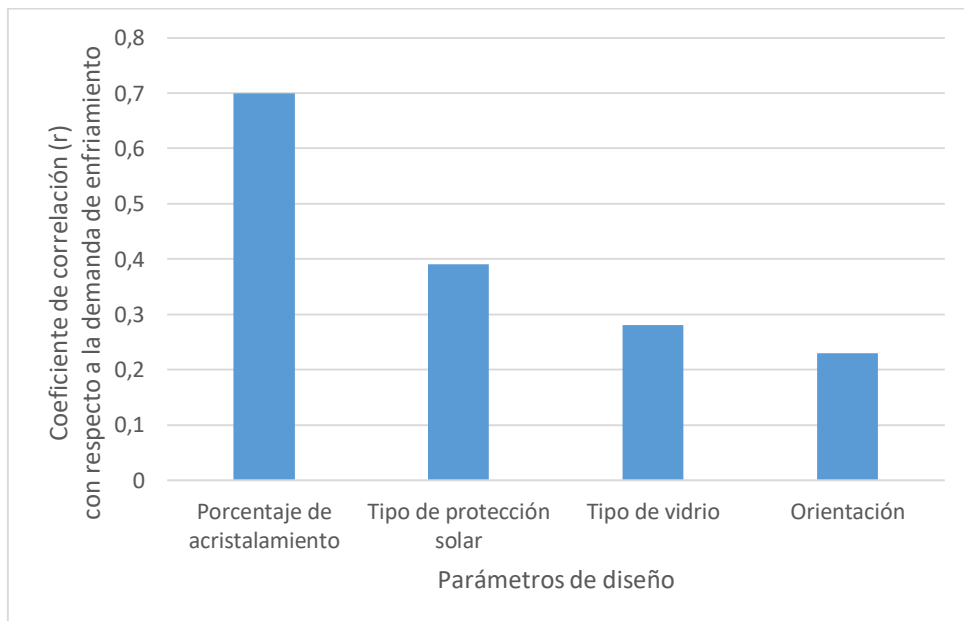


Figura 3.6.4 Coeficientes de correlación (r) con respecto a la demanda de enfriamiento para las variables estudiadas.

Fuente: PARÁMETROS DE DISEÑO Y DESEMPEÑO ENERGÉTICO EN EDIFICIOS DE CLIMA MEDITERRÁNEO (Bustamante & Encinas, 2012).

La correlación más fuerte entre demanda de enfriamiento y tipo de variable, está dada por el Porcentaje de acristalamiento ($r=0,70$), seguido por Tipo de protección solar ($r=0,39$), Tipo de vidrio ($r=0,28$) y finalmente orientación ($r=0,23$).

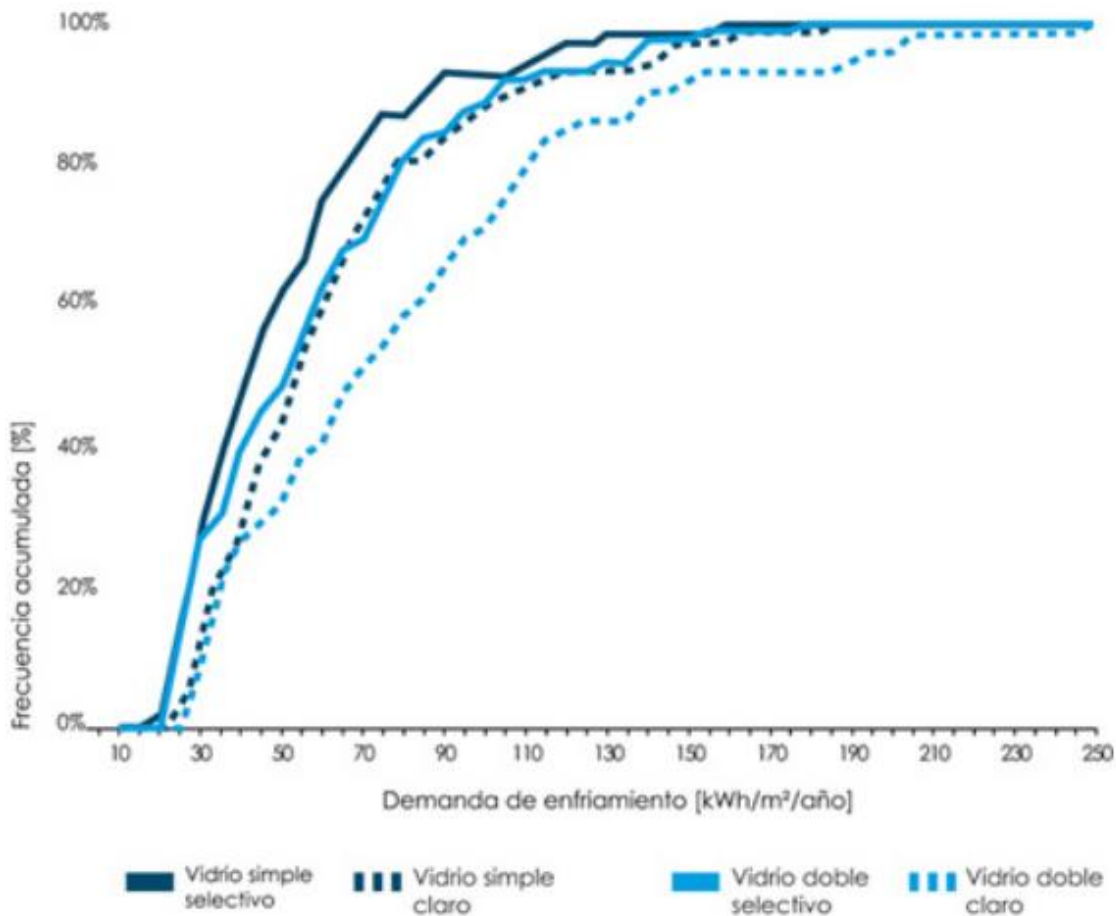


Figura 3.6.5 Demanda de enfriamiento anual con respecto al tipo de vidrio en términos de frecuencia acumulada.

Fuente: PARÁMETROS DE DISEÑO Y DESEMPEÑO ENERGÉTICO EN EDIFICIOS DE CLIMA MEDITERRÁNEO (Bustamante & Encinas, 2012).

En el análisis de la variable **Tipo de vidrio** los autores concluyen que el **doble vidriado puede elevar las probabilidades de sobrecalentamiento** (por reducir la capacidad de perder calor por la envolvente), por lo que se hace necesario incorporar alguna **propiedad que reduzca la ganancia solar por radiación como la que poseen los vidrios selectivos**. En la figura 3.4.2, se muestra como en el **80%** de los casos que poseen **doble vidrio selectivo** la demanda de enfriamiento alcanza un valor cercano a los **80 (kWh/m² x año)**, mientras que para la misma frecuencia acumulada en el caso de **doble vidrio claro** la demanda de enfriamiento sube a cerca de **110 (kWh/m² x año)**. Esta última observación es importante ya que el doble vidriado se ha instalado como un estándar generalizado de las soluciones constructivas de gran parte de los edificios que se construyen en Santiago. Es por esto que se recomienda la incorporación de vidriado selectivo para las soluciones constructivas de paramentos vidriados (Bustamante & Encinas, 2012).

El rol de la envolvente en alcanzar edificios de consumo de energía casi nulo (Charisi, 2017)

En el estudio titulado *El rol de la envolvente en alcanzar edificios de consumo de energía casi nulo* (Charisi, 2017), el autor analiza mediante simulación energética los cambios en la demanda que presenta una edificación al modificar su envolvente, con el objetivo de encontrar soluciones que contribuyan a reducir significativamente la demanda de energía de las edificaciones, ya que esto, constituye uno de los pasos esenciales para para lograr edificios de consumo casi nulo (NZEB). En el estudio se realizaron simulaciones mediante el software DesignBuilder, utilizando un modelo destinado a uso residencial, de 2 pisos y de área 180 m².

En primera instancia, se puso a prueba un aumento en la capa de aislante (poliestireno expandido), situado en la parte exterior de los muros, el estudio mostro que una capa de 20 cm de aislante genera una reducción en la demanda energética anual de un 14% para zonas climáticas frías. Cambiando el poliestireno expandido, por un Panel Aislado al Vacío (VIP) de 5 cm de espesor, la reducción en la demanda total de energía es mucho mayor, alcanzando un 13,65% para climas cálidos y aproximadamente un 16%, es preciso señalar que estos paneles pueden estar vacíos en su núcleo, o contener un material micro-poroso que permita que el gas contenido sea expulsado, y puesto que deben mantenerse su núcleo al vacío estos sistemas deben soportar una presión de 10,3 ton/m² (Cremers, 2005), todas estas características hacen que estos paneles posean una baja conductividad térmica ($\lambda=0,007$ W/mK) siendo incluso menor a la conductividad del aire.

En cuanto a las aperturas, el autor afirma que un bajo factor solar SHGC (g), tienen un gran impacto la reducción de la demanda de refrigeración. El SHGC afecta a la cantidad de ganancia solar, y es considerada beneficiosa para zonas climáticas calurosas, con lo cual, consigue reducciones en refrigeración de hasta 10,83%.

Por último, el artículo concluye señalando que las protecciones solares son muy efectivas en climas cálidos, reduciendo la ganancia solar y por ende la demanda de refrigeración, consiguiendo ahorros de energía de hasta 8% anual, por el contrario, en climas fríos, en los cuales la demanda de refrigeración representa un porcentaje menor en relación a la demanda total, las protecciones solares generaron un incremento en la demanda de energía de un 1%.

Análisis del desempeño térmico de los sistemas constructivos de un edificio de oficinas mediante simulaciones dinámicas (Rodríguez et al., 2018).

Rodríguez et al., (2018) examinaron el desempeño térmico de un edificio de oficinas con diferentes sistemas constructivos mediante simulación con el software TRNSYS. Se propuso el estudio de 3 variables (impermeabilizante, muro y cristal) mediante las siguientes configuraciones: 2 sistemas constructivos para cubierta, 3 para muros y 3 para acristalamiento, con el objetivo de estimar la posible disminución del consumo energético del edificio.

De acuerdo con el análisis efectuado indican que el elemento que tiene un **mayor impacto sobre la disminución del consumo energético, es el aislamiento de los muros, seguido por la aplicación de impermeabilizante en la cubierta**. En cuanto a la consideración de diferentes cristales en las ventanas, ellos señalan que esta variable tendría un menor impacto en el desempeño energético del edificio.

Finalmente, el estudio muestra reducciones en el gasto operativo anual de hasta 25,5% con respecto al caso base, en adición a esto, los autores hacen énfasis en **que el análisis de una edificación debiera realizarse siempre de forma anual**, ya que, al incorporar una o varias estrategias enfocadas mejorar solo las condiciones de térmicas verano, estas podrían afectar el desempeño durante invierno o viceversa, lo cual trae como consecuencia la neutralización de las ganancias o ahorros prometidos por la incorporación de la estrategia aislada.

3.7. Metodología

3.7.1. Determinar la demanda termo-energética.

La determinación de la demanda energética de la facultad de Ingeniería de la Universidad de Valparaíso, se realizará mediante simulación computacional, en base al procedimiento establecido en la Guía Técnica de Apoyo Número 2 del TDR (CITECUBB, 2012), desarrollado por la Dirección de Arquitectura del Ministerio de Obras Públicas. Esto, porque se presenta de manera explícita y sencilla, y dado que este trabajo es una primera aproximación hacia este tipo de estudios, hacen de esta la más apropiada. A continuación, se detallan las etapas de la metodología en cuestión:

Registros Climatológicos

Para la ejecución de las simulaciones de desempeño energético, se utilizarán los registros de una base de datos climatológica con una frecuencia horaria (hora a hora) de un año como completo (8670 horas). Obtenidos mediante la estación de medición más cercana al lugar que se dispone, que, en este caso, es la estación meteorológica Valparaíso/El belloto ubicada en la región de Valparaíso, en la siguiente imagen se muestran los datos de su ubicación:

The image shows a web form titled "Información del sitio" with a close button (X) in the top right corner. The form is divided into a header "Información general" and several input fields. The fields are as follows:

Field Name	Value
Nombre	Valparaiso/El Bellot
Tipo	Weather station w/o global rac
Coordenadas	-33,05 (°N Lat), -71,35 (°E Lon), WGS84
Número WMO	855620
Altitud	70 m a.s.l.
Huso horario (timezone)	-4 UTC
Referencia de tiempo	-30 min
Situación	Situación abierta

To the right of the form is a map showing the location of the station in Valparaíso, Chile. The map includes labels for "Concón", "Quillota", "Limache", and "raíso Villa Alomana". A blue dot on the map indicates the station's location. The map footer reads "© OpenStreetMap - Map data ©2018 OpenStre".

Figura 3.7.1 Información del sitio de la estación meteorológica.

Fuente: Elaboración propia en base a la base de datos proporcionada por Meteororm.

Definición Geométrica

Para la definición geométrica del edificio, se utilizarán: planos de planta, elevaciones, cortes y especificaciones técnicas, del edificio de la Facultad de Ingeniería de la Universidad de Valparaíso ubicado en calle General Cruz 222. Estos antecedentes fueron adquiridos mediante la Unidad de Planta Física y Construcciones Universitarias, la cual, es la entidad encargada de administrar estos registros.

Definición material

La definición material de los elementos constructivos opacos, se determinará conforme a lo establecido en la Guía A del CIBSE (Chartered Institution of Building Services Engineers), la cual es una de las principales fuentes de referencia para diseñadores de edificios sustentables de bajo consumo energético (CIBSE, 2007).

Para los elementos constructivos acristalados, se considerarán las propiedades físicas conforme a lo establecido por la IGDB (International Glazing Database), la cual es una colección de datos ópticos para elementos de acristalamiento. Estos datos son obtenidos mediante un espectrofotómetro, y son proporcionados a la IGDB por medio del fabricante, siendo sujeto de una cuidadosa revisión (Fuente: <https://windows.lbl.gov/software/igdb>).

En complemento a este apartado, se incluirán 2 procedimientos, con el propósito de incluir la influencia de los puentes térmicos en el edificio, estos se detallan a continuación:

Identificación de los puentes térmicos

Se identificarán los puentes térmicos según lo que indica el Manual de Diseño Pasivo y Eficiencia Energética en Edificios Públicos (Bobadilla et al., 2012), a través de termografías, utilizando una cámara especializada. Específicamente el equipo de trabajo utilizado, será una cámara termográfica DALI modelo T31, a continuación, se muestra una fotografía del equipo.



Figura 3.7.2 Cámara termográfica DALI T31.

Fuente: Elaboración propia.

Definición de la transmitancia térmica en elementos con puentes térmicos

Para la definición de la transmitancia térmica en los elementos con puentes térmicos, se realizará el procedimiento de cálculo de transmitancia térmica lineal utilizado en el ASHARE 1365 RP (Lawton et al., 2011), basado en la ISO 10211:2007 mediante el uso del software THERM, para luego calcular la transmitancia térmica total por unidad de área mediante lo señalado en el Capítulo 25, apartado 2 del ASHRAE Fundamentals Handbook, (ASHRAE, 2017).

Clasificación de los recintos

De acuerdo con lo que establece la metodología, los recintos ubicados al interior de la envolvente térmica del edificio se clasificarán en recintos habitables y recintos no habitables, de la siguiente manera:

Clasificación de los espacios	Habitable	No habitable
Sala de Clase	x	
Oficinas	x	
Pasillo	x	
Hall	x	
Auditorios	x	
Sala de reuniones	x	
Biblioteca	x	
Laboratorios/Talleres	x	
Bodegas		x
Archivos		x
Baños		x

Tabla 3.7.1 Clasificación de los espacios.

Fuente: Elaboración Propia.

Condiciones térmicas internas

Las condiciones interiores de los recintos habitables serán definidos de acuerdo a los valores límites de confort higrotérmico para sistemas activos de calefacción y/o refrigeración de la Guía Técnica de Apoyo N° 7: “Confort Higrotérmico” (CITECUBB, 2012), y se detallan a continuación:

Calefacción: Temperatura 20° C, Humedad Relativa \leq 55%

Refrigeración: Temperatura 25° C, Humedad Relativa \leq 55%

Para los recintos interiores no habitables definidos en el punto anterior, no se consideran sistemas de acondicionamiento por lo que la temperatura podrá oscilar libremente, tal como lo permite la metodología utilizada (CITECUBB, 2012).

Conforme a lo que indica la metodología, los espacios definidos como habitables, se clasificaran en función de la cantidad de calor disipado en su interior, de acuerdo a la actividad principal que los caracteriza:

Recintos con carga interna baja: Pasillo, Hall, Auditorios, Salas de reuniones, Biblioteca.

Recintos con carga interna alta: Salas de clase, Oficinas, Laboratorios/Talleres.

Cargas de Ocupación

La actividad metabólica proyectada para los ocupantes dentro del recinto se extrae del ASHRAE Handbook-Fundamentals (ASHRAE, 2017). Estos valores se detallan a continuación mediante la siguiente tabla:

Calor generado por tipo de actividad	
Actividad	(W/pers.)
Leer, sentado	99
Escribir a mano	108
Escribir a maquina	117
Trabajo en oficina ligero	130
Caminar	180
Levantar/Embalar	216
Cocinar	189
Aseo/Limpieza	284

Tabla 3.7.2 Calor generado por tipo de actividad.

Fuente: Elaboración propia en base al ASHRAE Handbook-Fundamentals (ASHRAE, 2017).

La densidad ocupacional se establece de acuerdo a lo señalado en la Ordenanza General de Urbanismo y Construcción (O.G.U.C) para edificios educacionales, esto porque el cálculo de la demanda energética, considerara esta variable en el caso mayor solicitud permitida de acuerdo a la normativa vigente. La siguiente tabla señala los valores que adopta la densidad ocupacional para cada tipo espacio:

Densidad Ocupacional		
Destino	m2 x persona	Pers./m2
Salones, Auditorios	0,5	2,00
Salas de uso múltiple, casino	1	1,00
Salas de clase	1,5	0,67
Camarines, gimnasios	4	0,25
Talleres, Laboratorios, Bibliotecas	5	0,20
Oficinas administrativas	7	0,14
Cocina	15	0,07

Tabla 3.7.3 Densidad Ocupacional

Fuente: Elaboración propia en base a la O.G.U.C.

Y se establecerá un horario de ocupación 8:00 am. a 18:00 pm. de lunes a viernes, por concentrar el mayor número de actividades, como configuración adicional se establecerá que el mes de febrero, el edificio no presentará ocupación, por lo que la demanda será nula.

Cargas de iluminación artificial:

La carga por uso de iluminación artificial se dividirá en 2 tipos, la primera para recintos que requieran de una mayor cantidad de luz debido a que su uso está relacionado con actividades como lectura o estudio, será de 12 W/m² (Bustamante et al., 2011; CIBSE, 2007; Córdova, 2013). La segunda será para los lugares que requieren de una iluminación adecuada, solamente para efectos de tránsito como pasillos, halls, y escaleras, este valor será de 5 W/m² (Bustamante et al., 2011).

Cargas de Operación de Equipos:

Como carga interna por uso de equipos en oficinas se considerara una ganancia de calor de 15 W/m² (Bustamante et al., 2011; CIBSE, 2007; Córdova, 2013), para laboratorios de computación se incorporará una ganancia de calor adicional por el uso de computadores de 110 W (CIBSE, 2007), y serán considerados para cada persona, lo que cual genera 22 W/m² por concepto

de equipos. Para otros laboratorios se considerara una ganancia por uso de equipos de 10 W/m² (CIBSE, 2007), y para salas de clase y biblioteca 2 W/m² (CIBSE, 2007).

Cargas de ventilación e infiltración:

Las cargas de ventilación natural se apegarán a lo dispuesto en la “Guía Técnica de Apoyo N° 6” Calidad del Aire Interior (CITECUBB, 2012), esta indica que los caudales de ventilación mínimos para los recintos de los edificios públicos, serán de 2,5 l/s x persona para oficinas y 5 l/s x persona para recintos educacionales. Para el cálculo de las infiltraciones del edificio existen diversos métodos, pero que requiere de datos empíricos, como el área efectiva de las infiltraciones o caudales de aire de viento y efecto chimenea. Como no se cuenta con estos valores, y los resultados de las simulaciones no serán utilizados para el dimensionamiento de sistemas de climatización, se considerará una tasa de infiltración de 0,3 renovaciones por hora (Bustamante et al., 2011; Córdova, 2013; Pino et al., 2010), y esta será establecida para las 24 horas del día.

Programa informático

El método de cálculo se formalizará a través del programa informático DesignBuilder, el cual utiliza el motor de cálculo EnergyPlus, además, ambos programas son señalados como referentes para la simulación energética, en la metodología del Standar 90.1 – 2016 (ASHRAE, 2016), Manual del Certificado Edificio Sustentable (IC & IDIEM, 2014), y la Guía de Apoyo Técnica Número 2 (CITECUBB, 2012); además, de numerosos estudios existentes en la literatura (Ascione et al., 2017; Charisi, 2017; Klimczak et al., 2018).

3.7.2. Proposición y evaluación de reformas en la materialidad de la envolvente.

Una vez determinada la demanda energética del edificio se procederá a evaluar distintos escenarios con respecto al modelo inicial, realizando modificaciones a los sistemas constructivos de la envolvente, con lo cual se determinará una nueva demanda energética para cada caso.

Habiendo realizado las simulaciones para cada caso de reformas, se procederá a evaluar la influencia de estos para cada una de las demandas de climatización necesarias para mantener la temperatura de confort en los espacios interiores. De esta manera es posible señalar el potencial de mejora que tendrían las reformas.

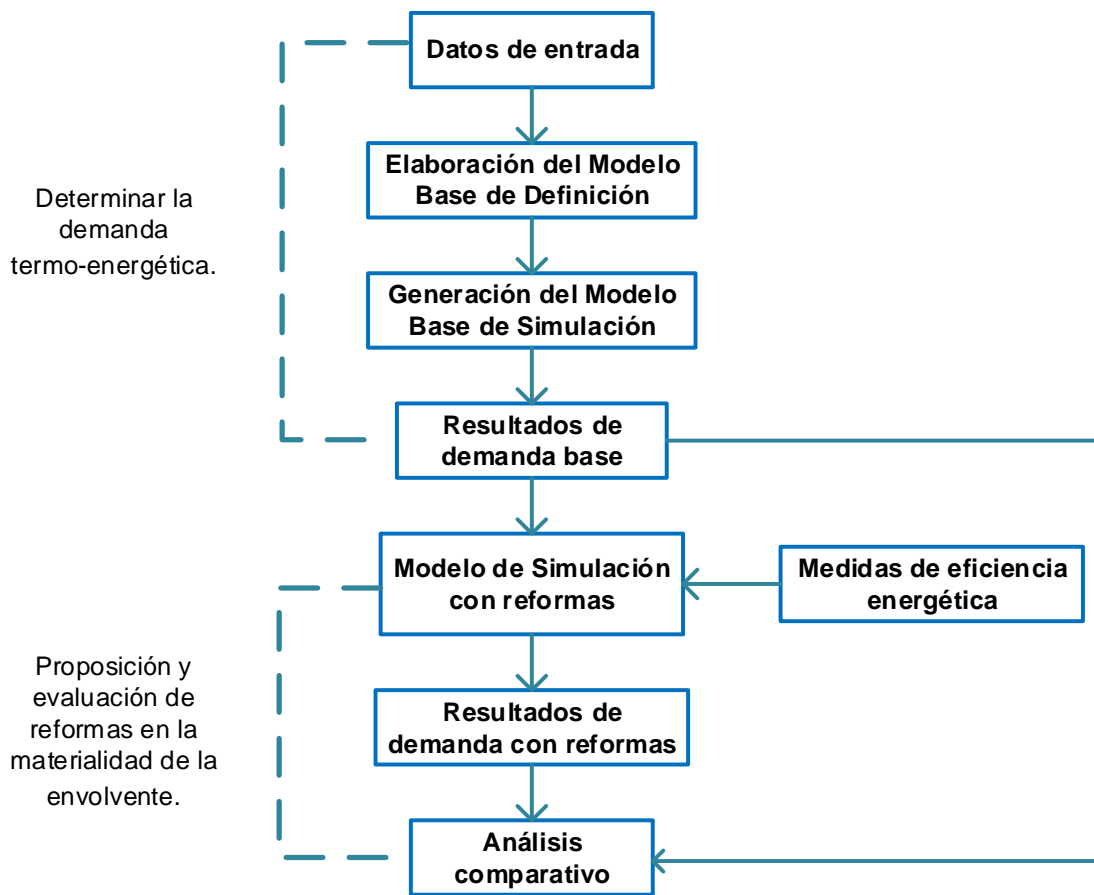


Figura 3.7.3 Flujograma de la metodología.

Fuente: Elaboración propia.

4. Simulación energética

En las páginas que siguen se detalla el proceso que conlleva la simulación energética, para la Facultad de Ingeniería de la Universidad de Valparaíso, ubicado en el sector El Almendral, calle General Cruz 222 de la ciudad de Valparaíso. Esta evaluación será conforme a la metodología de la Guía Técnica de Apoyo N° 2: “Limitación de la Demanda Energética de Edificios” (CITECUBB, 2012).

4.1. Registros Climatológicos

El archivo climático fue obtenido a través del sitio web de DesignBuilder Chile (<https://www.designbuilder.cl/descargas/archivos-climaticos/>), este fue creado con el software Meteonorm, el cual es un programa informático que realiza interpolaciones de datos climáticos para cualquier lugar del mundo a través de las estaciones meteorológicas más cercanas. El archivo contiene datos horarios de un año completo (8670 horas), y a continuación, se muestra un resumen de las temperaturas de bulbo seco del archivo climático utilizado.

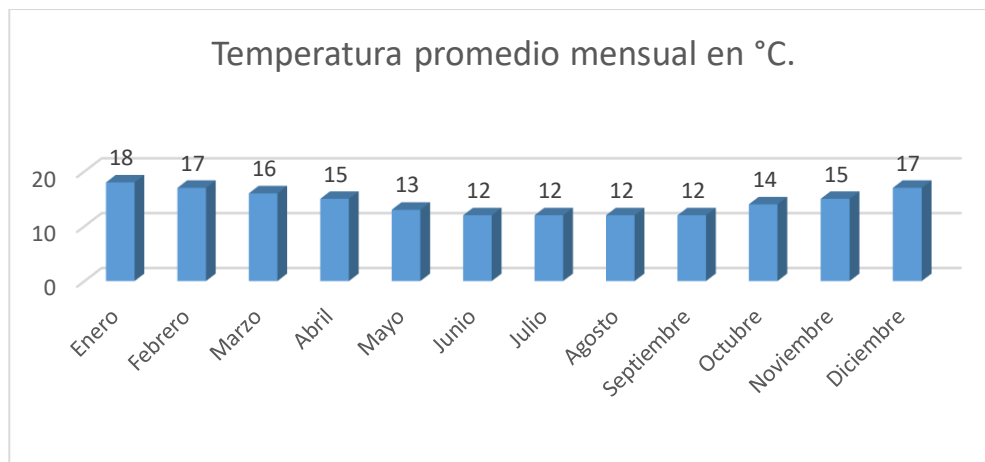


Figura 4.1.1 Temperaturas promedio mensuales de bulbo seco del archivo climático.

Fuente: Elaboración propia, en base al archivo climático utilizado de la región de Valparaíso.

4.2. Definición Geométrica

Emplazamiento

Dentro del modelo se necesita establecer la ubicación geográfica del edificio para el cálculo de demanda. La siguiente figura muestra el emplazamiento de la Facultad de Ingeniería de la Universidad de Valparaíso:

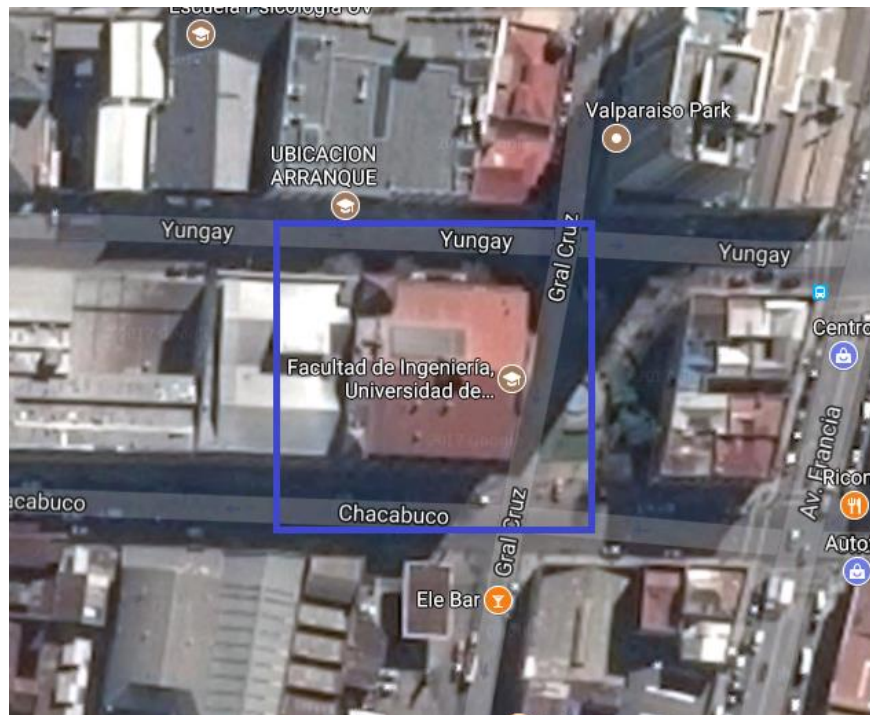


Figura 4.2.1 Emplazamiento de la Facultad de Ingeniería.

Fuente: Google Maps.

Facultad de Ingeniería		
Modelo	Datos del Sitio	Datos de Región
Plantilla de Sitio	Valparaiso	
Plantilla	Valparaiso	
Ubicación	Latitud (°) <input type="text" value="-33,05"/> Longitud (°) <input type="text" value="-71,61"/> Zona climática ASHRAE <input type="text" value="3C"/>	
Detalles del Sitio	>>	
Hora y Horario de Verano	>>	
Datos Climáticos para Simulación	>>	
Datos Climáticos para Diseño de Calefacción	>>	
Datos Climáticos para Diseño de Refrigeración	>>	

Figura 4.2.2 Datos de ubicación en DesignBuilder

Fuente: Elaboración Propia.

La definición geométrica del edificio se realizó de acuerdo a los planos y especificaciones técnicas existentes de la Facultad de Ingeniería, estos fueron ingresados al programa Design Builder, llevando a cabo un levantamiento geométrico de estos para generar un modelo 3D con el cual el software puede calcular la demanda de energía.

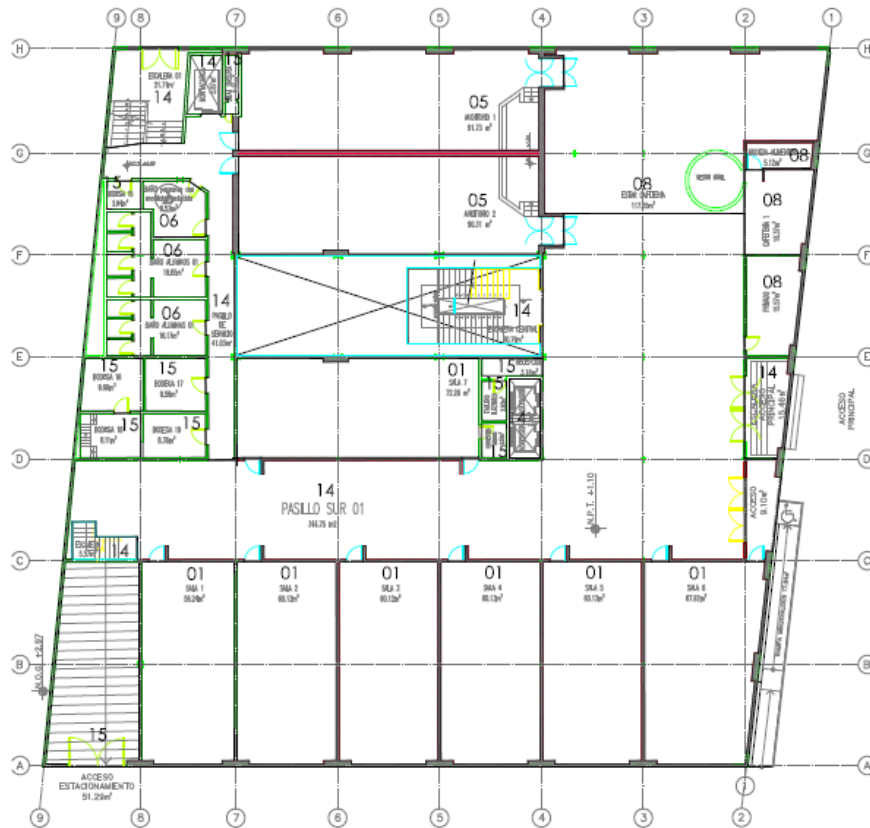


Figura 4.2.3 Plano de la Facultad de Ingeniería de la Universidad de Valparaíso.

Fuente: Unidad de Planta Física y Construcciones Universitarias – Universidad de Valparaíso.

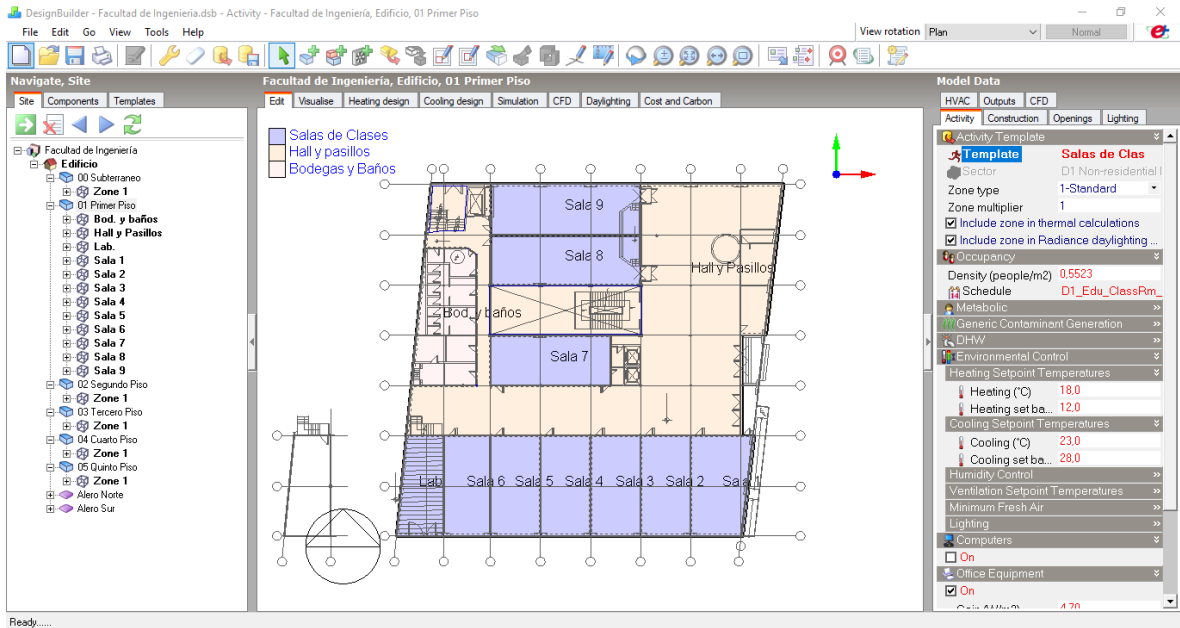


Figura 4.2.4. Plano del primer nivel ingresado en DesignBuilder.

Fuente: Elaboración propia.

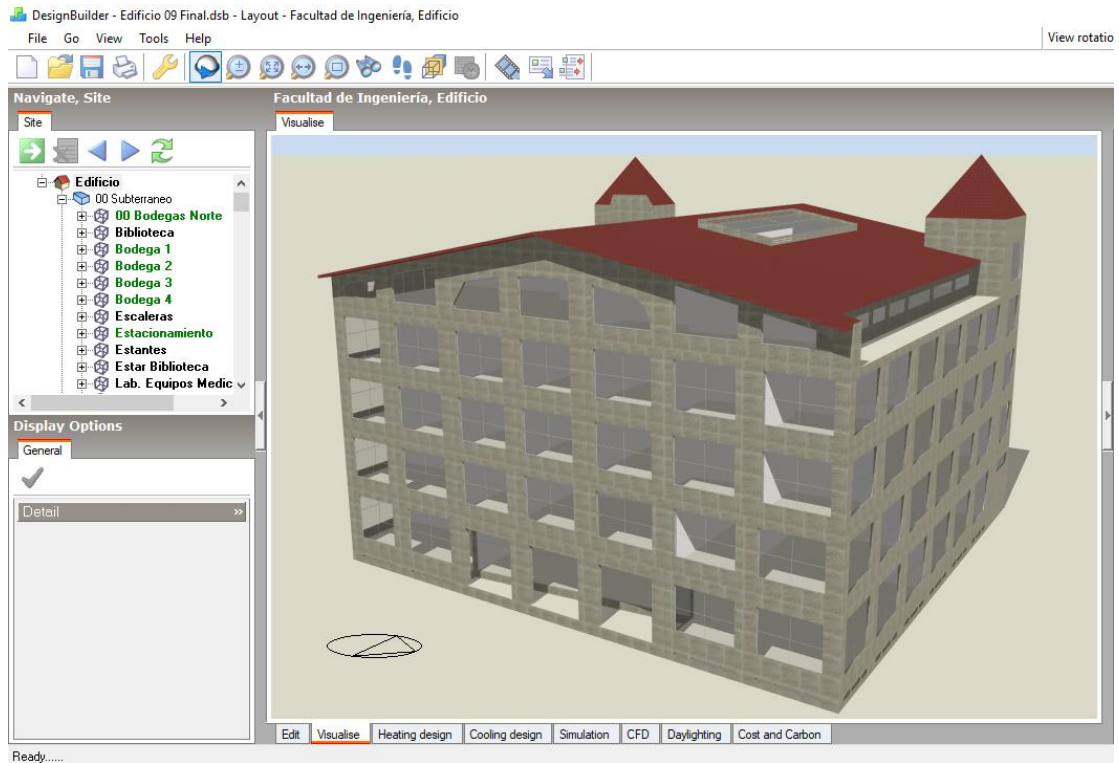


Figura 4.2.5 Modelo geométrico 3D del edificio de la facultad de Ingeniería de la Universidad de Valparaíso.

Fuente: Elaboración propia.

4.3. Definición Material

La definición material de los elementos utilizados en la simulación, son obtenidos mediante la Guía A del CIBSE (CIBSE, 2007), estos serán definidos en el programa DesignBuilder mediante las plantillas designadas para cada tipo de solución constructiva.

Definición Material			
Material	Conductividad (W/m × K)	Densidad (kg/m ³)	Calor específico (J/kg × K)
Albañilería	0,77	1750	1000
Estuco de cemento	1	1800	1000
Acero	50	7800	450
Madera aglomerada	0,12	630	2260
Poliestireno Expandido	0,04	15	1450
Placa de yeso	0,16	800	840
Lana Mineral	0,042	12	1030
Hormigón ligero	0,24	820	840
Vidrio	1,05	2500	840
Hormigón	1,33	2000	1000

Tabla 4.3.1 Definición material.

Fuente: Elaboración propia en base a la Guía A (CIBSE, 2007)

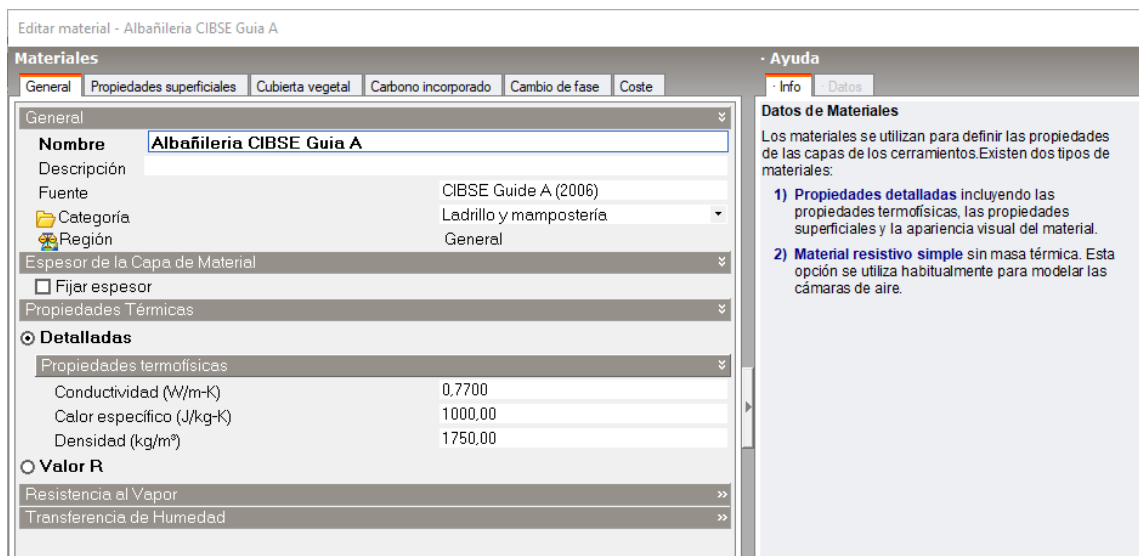


Figura 4.3.1 Definición de materiales en DesignBuilder.

Fuente: Elaboración propia

4.4. Identificación de los puentes térmicos

El edificio en sus muros perimetrales posee una configuración de albañilería confinada por perfiles estructurales en un sistema tipo mecano, que presenta a lo largo de sus fachadas Norte, Este y Sur. Los perfiles que la componen conectan el interior de la estructura, directamente con el exterior de esta. Como se mencionó en la sección 3.1.2 (*Mecanismo de transferencia de calor*) los materiales presentan distintas capacidades para conducir el calor (conductividad térmica), y como se puede apreciar en la tabla 4.3.1 (*Definición material*), el acero posee una elevada conductividad térmica con respecto a la albañilería y estuco. Por esta razón es posible que los perfiles metálicos estén transfiriendo energía de manera más rápida que sus elementos adyacentes, para alcanzar el equilibrio térmico entre el ambiente interior y exterior.

Para identificar si estos perfiles están actuando como puentes térmicos de la envolvente, se estudiarán los muros perimetrales, mediante termografías, las que evidenciarían un mayor flujo de calor de acuerdo al color presentado en la imagen. A continuación, se muestran los detalles de esta evaluación:

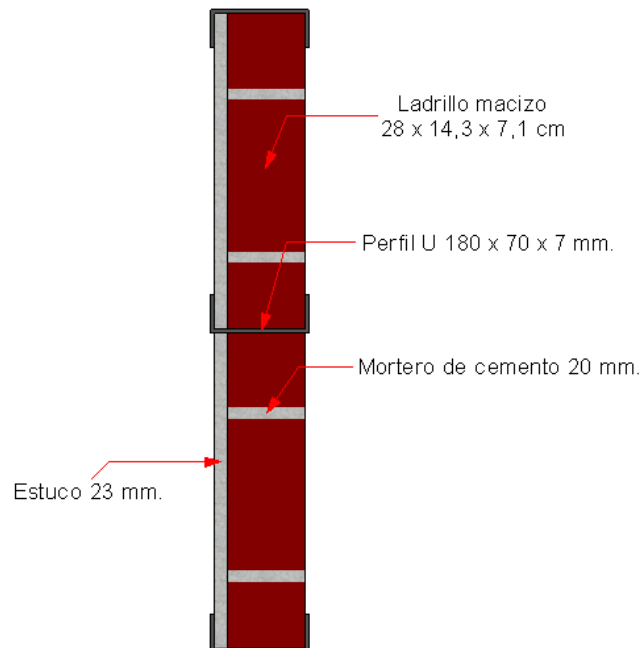


Figura 4.4.1 Configuración de la albañilería confinada por los perfiles metálicos.

Fuente: Elaboración propia.



Figura 4.4.2 Fachada oriente.

Fuente: Elaboración propia.

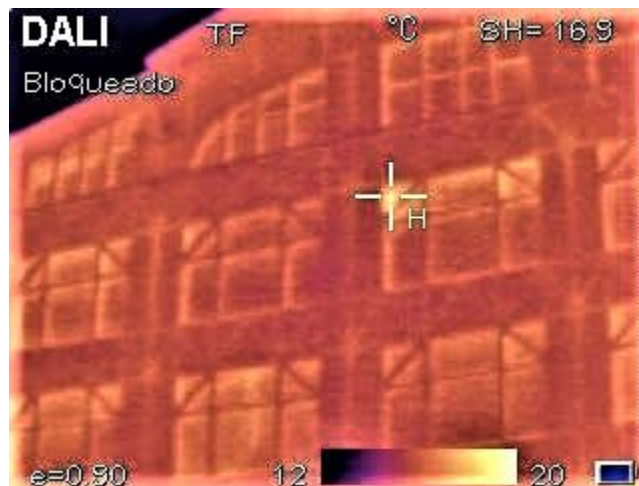


Figura 4.4.3 Termografía fachada oriente.

Fuente: Elaboración propia.

La termografía anterior, pertenece a la fachada oriente del edificio, y evidencia que los perfiles estructurales tienen un notable aumento de temperatura respecto a las superficies sin la presencia de estos, los puentes térmicos se visualizan con tonos amarillos claros, los que reflejan el calor transmitido desde el interior del edificio hacia su exterior (perdida de energía).



Figura 4.4.4 Perfiles estructurales fachada oriente.

Fuente: Elaboración propia.

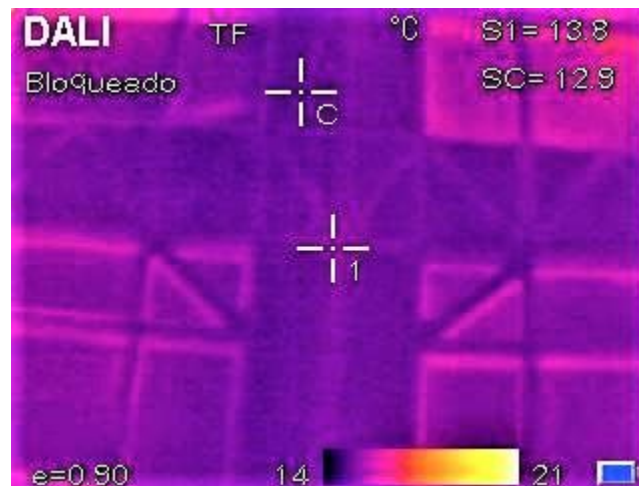


Figura 4.4.5 Puente térmico fachada oriente.

Fuente: Elaboración propia.

La imagen anterior corresponde a un encuentro entre perfiles, en esta se observa a los perfiles metálicos de un color más claro, respecto a la superficie adyacente a estos, el color más claro indica una mayor temperatura, lo que significa que la energía en ese momento estaba proviniendo desde el interior del edificio. En este caso el estuco adyacente a los perfiles presenta una temperatura superficial de 12,9°C (punto C), mientras que el punto 1 correspondiente al encuentro, tiene un aumento de 0.9°C producto de la transferencia de calor.



Figura 4.4.6 Puente térmico al interior del edificio.

Fuente: Elaboración propia.

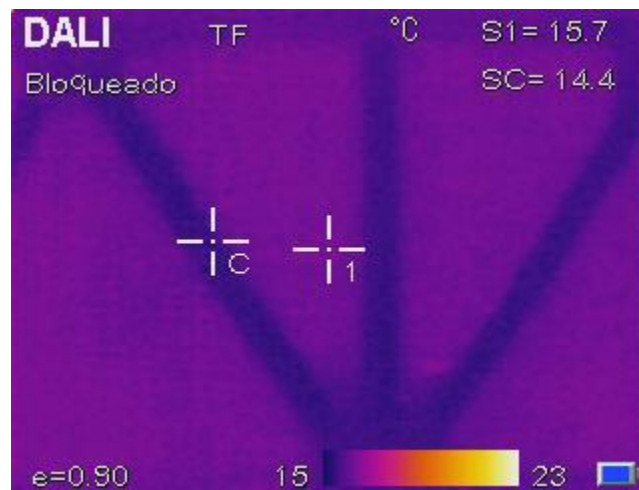


Figura 4.4.7 Puente térmico al interior del edificio perdiendo calor.

Fuente: Elaboración propia.

En la imagen presentada anteriormente se observan los perfiles estructurales desde el interior del edificio, en los cuales se percibe una considerable disminución de la temperatura con respecto a los muros de albañilería. El punto C corresponde al punto más frío en la termografía, el que presenta una temperatura de 14.4°C, en contramedida del punto 1 correspondiente a la albañilería alcanza los 15.7°C. Este escenario se corresponde a los casos anteriores ya que los perfiles metálicos están cediendo el calor del interior del interior del edificio hacia al exterior.

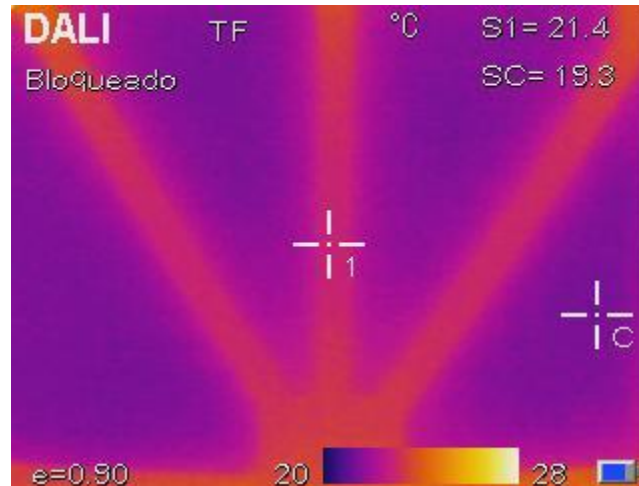


Figura 4.4.8 Puente térmico al interior del edificio ganando calor.

Fuente: Elaboración propia.

La termografía anterior fue realizada sobre la misma zona previamente estudiada, pero con la diferencia, que fue tomada en un día de altas temperaturas exteriores, en este escenario se puede observar como los perfiles estructurales actúan de manera contraria al escenario anterior, transfiriendo el calor desde el exterior hacia el interior del edificio, debido a la mayor conductividad térmica de los perfiles metálicos, respecto de la albañilería. El punto C muestra la zona de menor temperatura en la termografía que llega a 18.3° C., y el punto 1 situado en el perfil metálico alcanza una temperatura de 21.4° C

Por medio del trabajo realizado en la identificación de los puentes térmicos, queda en evidencia que estos aportan en la transferencia de energía, entre el ambiente interior y exterior del edificio, acelerando el equilibrio térmico entre estos. Es por esto, que para cálculo de la demanda termo-energética se tendrá en consideración este aumento en la transferencia de calor. Por lo que en el siguiente punto se simulara el efecto del puente térmico en la envolvente y su aumento de calor en la superficie de los muros perimetrales del edificio.

4.5. Definición de la transmitancia térmica en elementos con puentes térmicos

La transmisión de calor a través de un elemento con puente térmico se comporta de manera bidimensional a través del elemento, es decir es decir el flujo de calor además de viajar de forma perpendicular al eje del elemento también lo hace en forma paralela, de manera sencilla el calor viaja desde el interior al exterior o viceversa, y también se propaga de manera lateral por los elementos, si presentan heterogeneidades. Es por esto que ya no es posible utilizar las ecuaciones de la norma NCh853: Of.2007 (INN, 2007), por lo que deben utilizarse métodos de simulación computacional, para determinar el aumento de calor producido por los elementos que poseen una estructura geométrica compleja, y con un valor de conductividad disímil al común del cerramiento en que se encuentran.

La transmitancia térmica de los cerramientos de albañilería es de 2,64 (W/m²K), en las superficies que no presentan perfiles metálicos (ver tabla 4.5.1), pero como quedo evidenciado a través de las termografías, los perfiles estructurales actúan como puentes térmicos del calor, esto debido a su elevada conductividad (λ acero = 50 (W/m x K)). Para poder cuantificar el aumento de transmitancia de los cerramientos debido a la existencia de los puentes térmicos, es necesario calcular la transmitancia térmica lineal que se produce en una determinada área. Esto se realizara según el método utilizado en el ASHRAE 1365 RP (Lawton et al., 2011); este señala que para encontrar este valor, primero, debe calcularse el calor producido por el puente térmico, y para esto, se realiza una simulación del área con la presencia del puente térmico mediante un software especializado (THERM), obteniendo así el calor que transita por esta sección, luego la misma área se simula sin la presencia del puente térmico, para de esta manera superponer los casos, y así obtener el calor que transita de manera aislada por efecto del puente térmico en el área estudiada (ver ecuación 4.5.1) ; finalmente mediante la ecuación 4.5.3 se obtiene el valor de la transmitancia térmica lineal producida en el área del puente térmico:

Transmitancia térmica en superficies sin puentes térmicos				
Elemento	Espesor (m)	Conductividad	Rt	Unidad
Rse	-	-	0,05	(m ² K/W)
Albañilería	0,143	0,77	0,19	(m ² K/W)
Estuco	0,023	1,000	0,02	(m ² K/W)
Rsi	-	-	0,12	(m ² K/W)
Total			0,38	(m ² K/W)
U=			2,64	(W/m²K)

Tabla 4.5.1 Transmitancia térmica en superficies sin puentes térmicos.

Fuente: Elaboración propia.

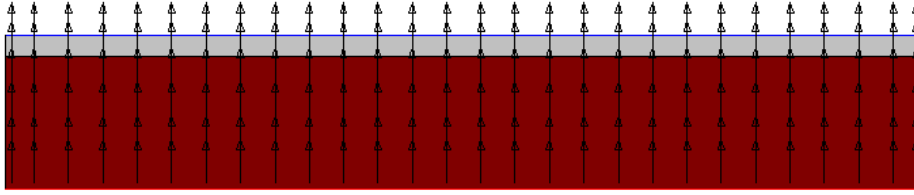


Figura 4.5.1 Simulación del área sin puente térmico en THERM.

Fuente: Elaboración propia.

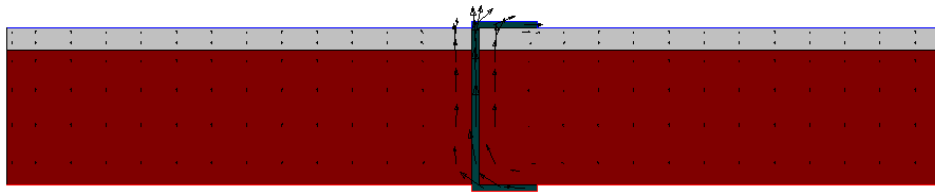


Figura 4.5.2 Simulación del área con puente térmico con THERM.

Fuente: Elaboración propia.

$$Q_{\text{Elemento con puente termico}} - Q_{\text{Elemento sin puente térmico}} = Q_{\text{Puente térmico}}$$

Ecuación 4.5.1 Calor producido por el puente térmico.

Fuente: ASHRAE 1365 RP.

Las imágenes anteriores corresponden a las simulaciones realizadas en THERM, en estas se aprecian como las líneas de flujo se comportan de manera unidireccional (Figura 4.5.1) a bidireccional (Figura 4.5.2), por influjo del puente térmico.

Habiendo realizado las simulaciones, se realizó el cálculo de la transmitancia conforme al procedimiento de la ASHRAE 1365 RP el cual se basa en la ISO 10211: 2007 ver ecuación 4.5.3, calculando la diferencia de calor a través del cerramiento con y sin puente térmico, dividido por la diferencia de temperatura (20°C) por la longitud del puente térmico en el área estudiada (1 m). De manera adicional y a modo de comparación, a continuación, se menciona la fórmula que establece el CTE en el documento de apoyo DA DB-HE/3 Puentes térmicos para este cálculo.

$$\psi = \frac{\Phi_{2D}}{L \times \Delta T} - \sum_n (A_i \times U_i)$$

Ecuación 4.5.2 Transmitancia térmica lineal mediante formula del DA DB-HE/3.

Fuente: DA DB-HE/3 Puentes térmicos, CTE.

$$\Psi = \frac{Q_1 - Q_0}{\Delta T \times L}$$

Ecuación 4.5.3 Transmitancia térmica lineal.

Fuente: ASHRAE 1365 RP

Donde:

Ψ : Transmitancia térmica lineal del puente térmico (W/m x K).

Q_0 : Calor transmitido sin puente térmico (W)

Q_1 : Calor transmitido con puente térmico (W)

ΔT : Diferencia de temperatura. (°C)

L: Longitud que presenta el puente térmico (m).

Con el propósito de incorporar el efecto de los puentes térmicos (transmitancia térmica lineal) a la transmitancia de las superficies libres de estos, se utilizará la ecuación de transmitancia térmica total (ecuación 4.5.4) del ASHRAE Handbook - Fundamentals (ASHRAE, 2017), la cual calcula la transmitancia térmica debido al total de puentes térmicos en un área específica, mediante la transmitancia térmica lineal, y luego esto es sumado a la transmitancia de la superficie donde no existe puente térmico.

$$U_T = \frac{\sum(\Psi \times L)}{A_{Total}} + U_o$$

Ecuación 4.5.4 Transmitancia térmica total considerando puentes térmicos.

Fuente: ASHRAE Handbook - Fundamentals

Donde:

U_T : Transmitancia térmica total (W/m²K)

Ψ : Transmitancia lineal del puente térmico, (W/(m x K))

L: Longitud del puente térmico. (m)

U_o : Transmitancia térmica del cerramiento estudiado sin considerar el flujo de calor por el puente térmico (W/m²K).

A total: área del cerramiento estudiado.

Transmitancia Térmica Lineal		
Q(1) =	58,61	(W)
Q(0) =	52,81	(W)
Δ =	20	(°C)
L =	1	(m)
Ψ =	0,29	(W/m x K)

Tabla 4.5.2 Transmitancia térmica lineal provocada por el puente térmico.

Fuente: Elaboración propia.

La transmitancia térmica lineal producto de la presencia 1 metro lineal de puente térmico, en un metro cuadrado de superficie de los muros de la envolvente es de 0,29 W/m x K (tabla 4.5.4). Entonces la transmitancia térmica total de dicha superficie está dada por la ecuación 4.5.4. La tabla 4.5.5 muestra el cálculo de la transmitancia térmica total para 1 m² de superficie, que presenta 1 m lineal de puente térmico, este cálculo fue corroborado mediante una simulación en THERM (figura 4.5.3).

Transmitancia Térmica Total		
Ψ =	0,29	(W/m x K)
L =	1	(m)
A total =	1	(m ²)
U(0) =	2,64	(W/m ² K)
U total=	2,93	(W/m²K)

Tabla 4.5.3 Transmitancia térmica total para un metro cuadrado de cerramiento con presencia de un puente térmico.

Fuente: Elaboración propia.

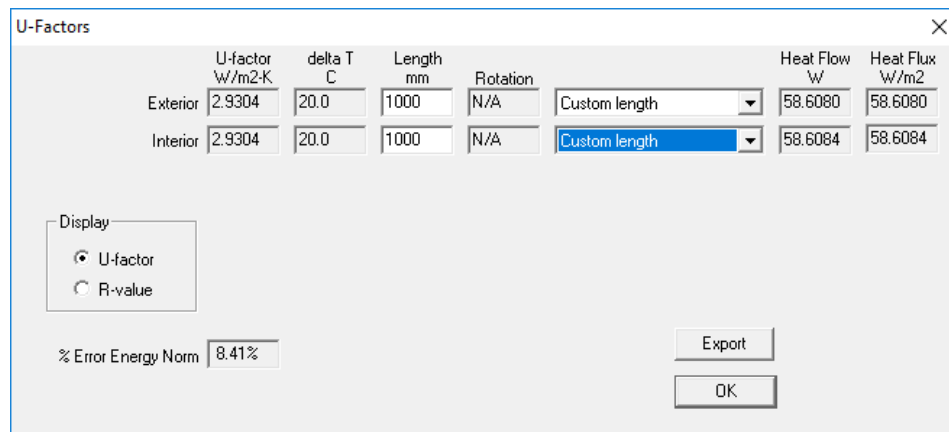


Figura 4.5.3 Transmitancia térmica del cerramiento con el efecto del puente térmico.

Fuente: Elaboración propia.

Como se mencionó en el punto 4.4 *Identificación de los puentes térmicos* la estructura presenta numerosos puentes térmicos, los que se extienden por sus fachadas Norte, Sur y Este. La figura 4.5.4 resalta los puentes térmicos en color rojo, estos fueron medidos a través de las elevaciones proporcionadas por la Unidad de Planta Física y Construcciones Universitarias de la Universidad de Valparaíso.

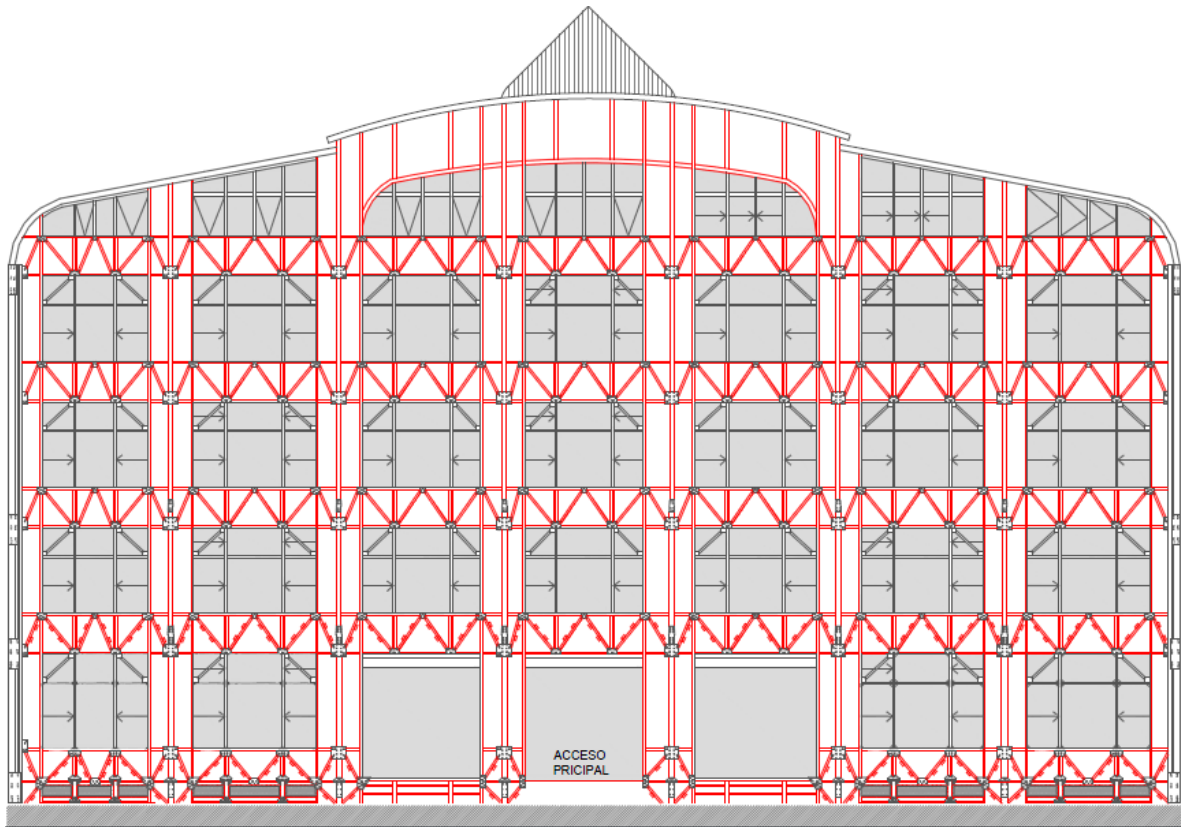


Figura 4.5.4 Fachada oriente de la facultad de ingeniería de la universidad de Valparaíso.

Fuente: Elaboración propia.

Con los datos de longitud de los puentes térmicos de las fachadas Norte, Sur y Este, se procedió a calcular la transmitancia térmica total de estos. La tabla 4.5.6 muestra los valores de este cálculo:

Transmitancia Térmica Total		
$\Psi =$	0,29	(W/m x K)
L =	3292,59	(m)
A total =	1243,28	(m ²)
U(0) =	2,64	(W/m ² K)
U total=	3,41	(W/m²K)

Tabla 4.5.4 Transmitancia térmica total incorporando el aumento por puentes térmicos.

Fuente: Elaboración propia.

Producto de los puentes térmicos la transmitancia térmica de los muros de la envolvente aumentan de 2,64 (W/m²K) (tabla 4.5.1) a 3,41 (W/m²K) (tabla 4.5.6). El programa DesignBuilder, así como también EnergyPlus, no calculan puentes térmicos, es por esto que se reducirán los espesores originales de los materiales, hasta alcanzar la transmitancia de 3,41 (W/m²K). A continuación, se muestran los cálculos de este procedimiento:

Nueva transmitancia: 3,41 (W/m²K)

$$U = \frac{1}{0,05 + Rt + 0,12} \rightarrow Rt + 0,17 = \frac{1}{3,41}$$

Nueva resistencia termica de materiales: $Rt = 0,12$

De la tabla 4.5.1 se desprende: $Rt_{Albañileria} = 0,19$; $Rt_{Estuco} = 0,02$; $Rt = 0,21$

$Rt = 100\% \rightarrow Rt_{Albañileria} = 90,5\%$; $Rt_{Estuco} = 9,5\%$;

Nuevo Rt para albañileria y estuco:

$Rt_{Albañileria} = 0,12 \times 0,905$; $Rt_{Estuco} = 0,12 \times 0,095$

$Rt_{Albañileria} = 0,11$; $Rt_{Estuco} = 0,012$

Nuevos espesores para albañileria y estuco:

$$Rt = \frac{e}{\lambda} \rightarrow e_{Albañileria} = 0,11 \times 0,77$$
; $e_{Estuco} = 0,012 \times 1$

$e_{Albañileria} = 0,086$; $e_{Estuco} = 0,012$

Transmitancia térmica con efecto del puente térmico				
Elemento	Espesor (m)	Conductividad	Rt	Unidad
Rse	-	-	0,05	(m ² K/W)
Albañilería	0,086	0,77	0,11	(m ² K/W)
Estuco	0,012	1,000	0,01	(m ² K/W)
Rsi	-	-	0,12	(m ² K/W)
Total			0,29	(m²K/W)
U=			3,41	(W/m²K)

Tabla 4.5.5 Transmitancia térmica con efecto del puente térmico.

Fuente: Elaboración propia.

A través de estos cálculos pudo establecerse los nuevos espesores de la albañilería y el estuco, producto del efecto de los puentes térmicos, cabe precisar que los espesores se redujeron proporcionalmente a la resistencia térmica que ofrecen. Se puede apreciar que el efecto de los puentes térmicos hizo decaer alrededor de un 50% los espesores originales de los materiales, produciendo un **aumento de un 29% en la transmitancia original de los muros**.

4.6. Clasificación de los recintos

Como que especificado en el punto 3.7.1 la clasificación de los recintos será de acuerdo a la metodología, de la Guía Técnica de Apoyo N°2 “Limitación de la Demanda Energética de Edificios” (CITECUBB, 2012) y está representado en la siguiente tabla:

Clasificación de los espacios	Habitable	No habitable
Sala de Clase	x	
Oficinas	x	
Pasillo	x	
Hall	x	
Auditorios	x	
Sala de reuniones	x	
Biblioteca	x	
Laboratorios/Talleres	x	
Bodegas		x
Archivos		x
Baños		x

Tabla 4.6.1 Clasificación de los espacios.

Fuente: Elaboración Propia.

4.7. Condiciones térmicas internas

Los valores utilizados en la simulación energética fueron detallados en el punto 3.8.1 “Condiciones térmicas internas”. Estos fueron ingresados en plantillas de definición del modelo paramétrico del edificio de la facultad. A modo de resumen, a continuación, se mostrarán los detalles de este procedimiento:

Ganancias internas por ocupación						
Lugar	Densidad (hab./m ²)	Calor por actividad (W)	Ganancia ocup. (W/m ²)	Ganancia por equipos (W/m ²)	Ganancia por iluminación (W/m ²)	Total (W/m ²)
Sala de Clase	0,67	108	72	2	12	86
Oficinas	0,14	130	18,57	15	12	45,57
Sala de reuniones	1,00	99	99	-	12	111
Biblioteca	0,20	108	21,6	2	12	35,6
Laboratorio de computación	0,20	117	23,4	22	12	57,4
Lab./Talleres	0,20	108	21,6	10	12	43,6

Figura 4.7.1 Ganancias internas por ocupación.

Fuente: Elaboración propia.

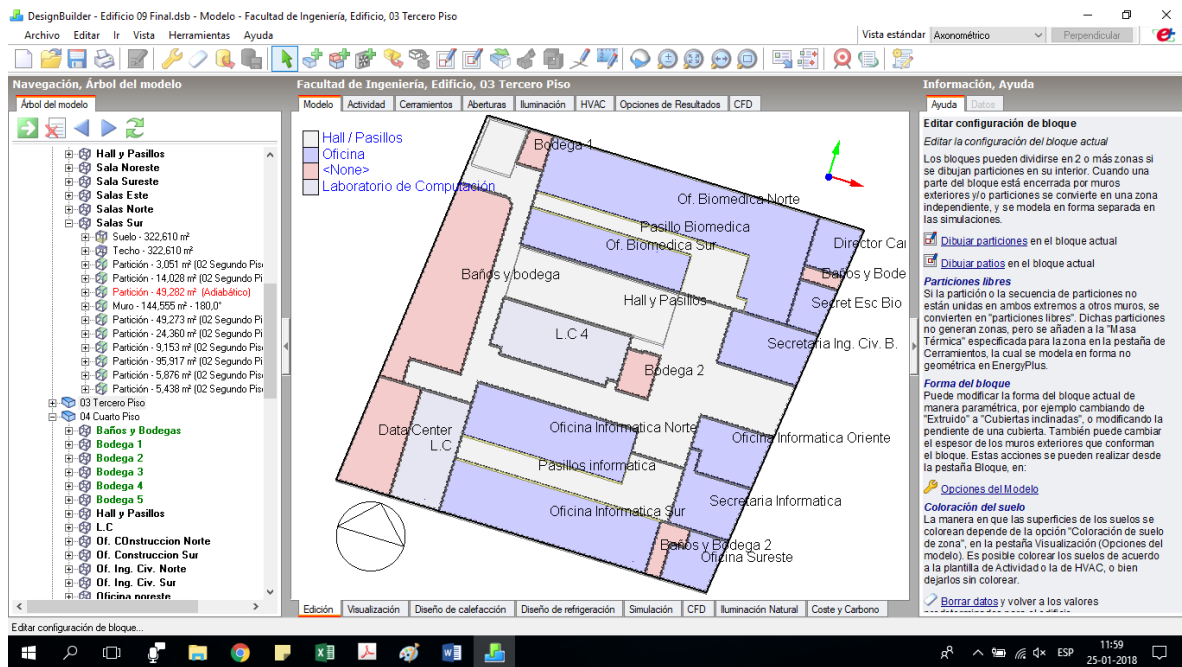


Figura 4.7.2 Distribución de espacios en el modelo del edificio.

Fuente: Elaboración propia.

Facultad de Ingeniería, Edificio, 04 Cuarto Piso, Of. Construcción Sur

Modelo Actividad Cerramientos Aberturas Iluminación HVAC Opciones de Resultados CFD

Plantilla de Actividad

Plantilla **Oficina**

Sector D1 Non-residential Institutions - Education

Tipo de zona 1-Acondicionada

Multiplicador de zona 1

Incluir zona en cálculos térmicos

Incluir zona en cálculos de luz diurna con Radiance

Áreas de Suelo y Volúmenes

Ocupación

Densidad de ocupación (personas/m²) 0,1400

Programación Programacion Facultad Ingeniería

Condiciones Metabólicas

Tasa metabólica Trabajo ligero de oficina

Edición Visualización Diseño de calefacción Diseño de refrigeración Simulación CFD Iluminación Natural Coste y Carbono

Figura 4.7.3 Datos del modelo para oficinas.

Fuente: Elaboración propia.

Editar plantilla de actividad - Sala de clase

Plantillas de actividad

General Todas las ganancias Ocupación Otras ganancias ACS Control ambiental

Densidad de potencia (W/m²) 2,00

Potencia absoluta de zona (W) 0,00

Fracción radiante 1,000

Perfil de día laborable

Inicio 8:00

Final 18:00

0 1 2 3 4 5 6 7 8 9 10 11 12 13 14 15 16 17 18 19 20 21 22 23 24

Datos del modelo

Ayuda

Cancelar

Aceptar

Ayuda

Info Datos

Otras Ganancias

Las ganancias predeterminadas internas por computadoras, equipos de oficina, cocina, procesos y misceláneos para esta actividad.

Los datos de esta pestaña se utilizan cuando las "Ganancias" (Opciones del modelo) se establecen como "Simplificadas".

Figura 4.7.4 Ganancias por equipos para salas de clases.

Fuente: Elaboración propia.

Aire Exterior Mínimo

Aire exterior por persona (l/s-persona) 5,000

Aire exterior por área (l/s-m²) 0,000

Estanqueidad al aire

Modelar infiltración

Tasa (ren/h) 0,300

Programación Infiltraciones

Figura 4.7.5 Aire exterior mínimo para salas de clases e infiltraciones.

Fuente: Elaboración propia.

Programaciones

General

General

Nombre Programacion Facultad Ingeniería

Descripción

Fuente UK NCM

Categoría Educación (No-residencial)

Región General

Tipo de programación 1-Programación 7/12

Días de diseño

Método de definición del día de diseño 1-Usó final predeterminado

Usó final predeterminado 1-General

Perfiles

Mes	Lunes	Martes	Miércoles	Jueves	Viernes	Sábado	Domingo
Ene	8:00 to 18:00	8:00 to 18:00	8:00 to 18:00	8:00 to 18:00	8:00 to 18:00	Off	Off
Feb	Off	Off	Off	Off	Off	Off	Off
Mar	8:00 to 18:00	8:00 to 18:00	8:00 to 18:00	8:00 to 18:00	8:00 to 18:00	Off	Off
Abr	8:00 to 18:00	8:00 to 18:00	8:00 to 18:00	8:00 to 18:00	8:00 to 18:00	Off	Off
May	8:00 to 18:00	8:00 to 18:00	8:00 to 18:00	8:00 to 18:00	8:00 to 18:00	Off	Off
Jun	8:00 to 18:00	8:00 to 18:00	8:00 to 18:00	8:00 to 18:00	8:00 to 18:00	Off	Off
Jul	8:00 to 18:00	8:00 to 18:00	8:00 to 18:00	8:00 to 18:00	8:00 to 18:00	Off	Off
Ago	8:00 to 18:00	8:00 to 18:00	8:00 to 18:00	8:00 to 18:00	8:00 to 18:00	Off	Off
Sep	8:00 to 18:00	8:00 to 18:00	8:00 to 18:00	8:00 to 18:00	8:00 to 18:00	Off	Off
Oct	8:00 to 18:00	8:00 to 18:00	8:00 to 18:00	8:00 to 18:00	8:00 to 18:00	Off	Off
Nov	8:00 to 18:00	8:00 to 18:00	8:00 to 18:00	8:00 to 18:00	8:00 to 18:00	Off	Off
Dic	8:00 to 18:00	8:00 to 18:00	8:00 to 18:00	8:00 to 18:00	8:00 to 18:00	Off	Off

Figura 4.7.6 Perfil de programación del edificio.

Fuente: Elaboración propia.

4.8. Simulación mediante programa informático

Para realizar el cálculo de la demanda de energía requerida para mantener los espacios interiores dentro de la temperatura de confort, el estudio se llevará a cabo mediante la utilización del programa DesignBuilder. Como quedo detallado en los puntos anteriores, primero fue necesario crear un modelo paramétrico del edificio mediante la documentación existente, luego de esto, el programa necesita que se especifique las condiciones interiores de este, junto con la programación de uso de los espacios. Habiendo realizado todo esto, puede realizarse la simulación:



Figura 4.8.1 Opciones de la simulación.

Fuente: Elaboración propia.

La simulación se realizará durante el periodo de un año de manera que los resultados de demanda de calefacción y refrigeración serán entregados en kWh/m² x año, esto con el propósito de compararlos con estudios similares existentes en la bibliografía.

5. Análisis de los resultados

5.1. Determinación de la demanda termo-energética.

Se simuló el escenario actual del edificio de la Facultad de Ingeniería, según los detalles especificados en el punto 4 (*Simulación Energética*), como resultado de este proceso, se obtuvo un valor de demanda de calefacción de 3,45 (kWh/m² x año), y 36,44 (kWh/m² x año) para refrigeración, llegando a un total de 39,89 (kWh/m² x año). Por medio de la revisión bibliográfica, es posible señalar que el resultado de la simulación se encuentra dentro del rango de los resultados de simulaciones realizadas por Bustamante & Encinas (2012), y adoptan un valor similar a los trabajos realizados por Pino et al. (2010); Bustamante et ál. (2011); y Córdova (2013). A continuación, se analizan los resultados obtenidos, en un intervalo mensual, para tener una visión ampliada de la demanda energética de refrigeración y calefacción:

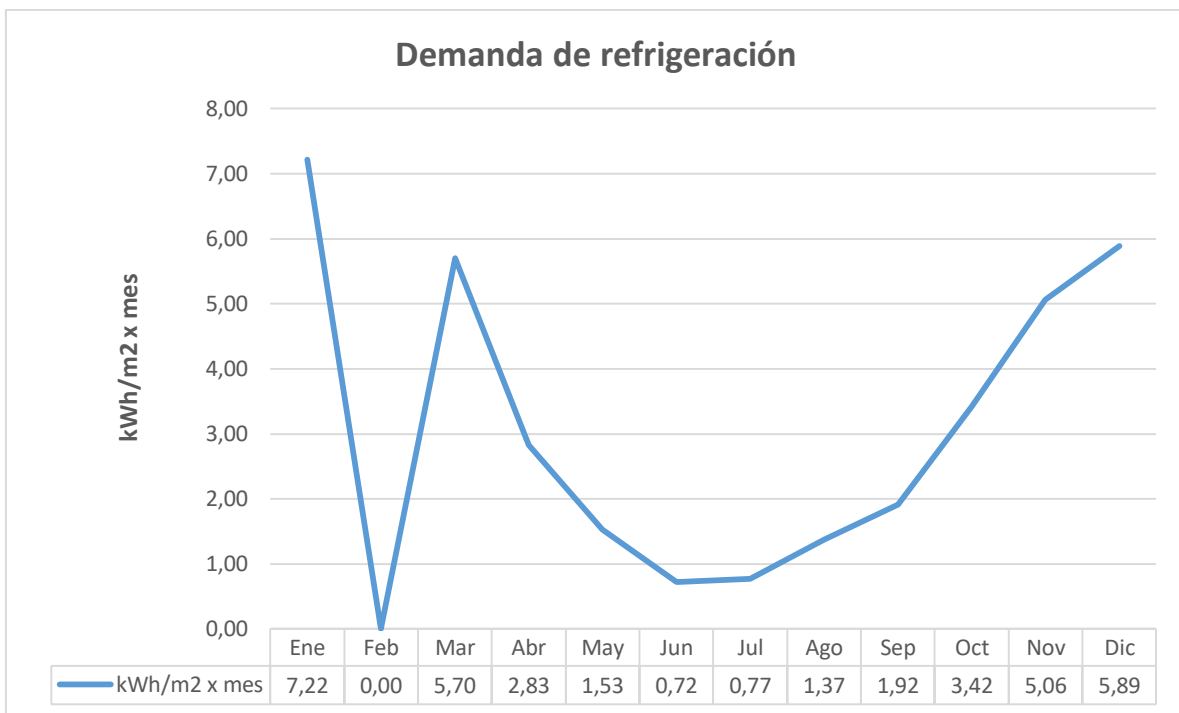


Figura 5.1.1 Demanda de refrigeración

Fuente: Elaboración propia

El gráfico anterior representa la energía necesaria para climatizar (refrigerar) los ambientes interiores habitables de la casa de estudio. Se puede observar que los meses de verano representan el periodo de mayor demanda y en contramedida, durante los meses de invierno la demanda cae abruptamente. La ganancia solar debido a la radiación solar es claramente un factor asociado a los meses de verano (Sepúlveda, 2003), para abordar mejor este tema a continuación se muestran las ganancias internas producidas en el edificio.

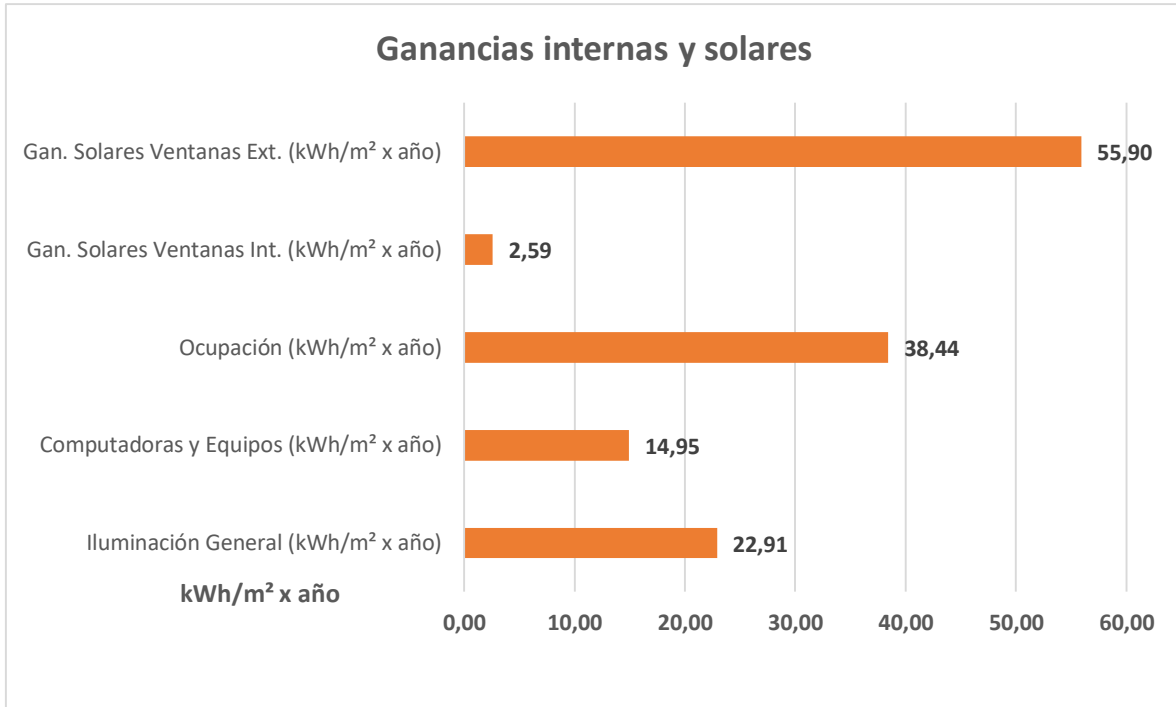


Figura 5.1.2 Ganancias internas

Fuente: Elaboración propia

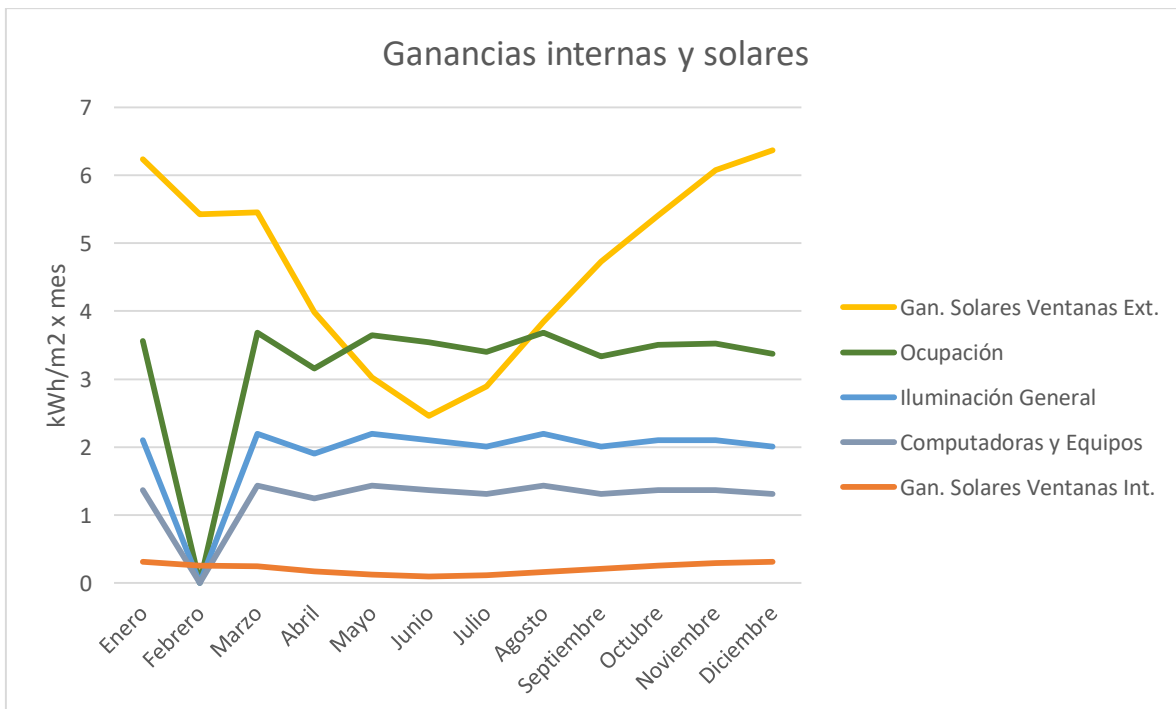


Figura 5.1.3 Ganancias internas y solares mensuales.

Fuente: Elaboración propia

El gráfico de la *figura 5.1.2* muestra las ganancias internas del edificio, en este, se puede observar claramente que las ganancias solares a través de las **ventanas exteriores son la mayor ganancia de calor para el edificio**, posterior a ella, el calor asociado a la ocupación de los espacios, es la mayor fuente de ganancias. Con respecto a la primera variable podemos asociar el alto porcentaje de superficie de ventanas (49%) que presentan las fachadas del edificio, y el lugar donde se encuentra emplazado, el cual presenta altos índices de radiación solar durante los meses de verano; pero no así durante invierno, donde la radiación cae significativamente (Sepúlveda, 2003). Siguiendo esta tendencia, es posible resaltar la curva en forma de u, que adopta la ganancia solar por ventanas exterior en el gráfico de la *figura 5.1.3*, al igual que la demanda de refrigeración en el gráfico 5.1.1. En cuanto a la segunda variable (ocupación) su alto valor se debe a la alta densidad ocupacional (*tabla 3.8.3 Densidad ocupacional*) existente en el recinto, debido a que el edificio en consideración, es de tipo público, orientado a la educación, lo cual significa, un alto número de personas durante largas jornadas de tiempo.

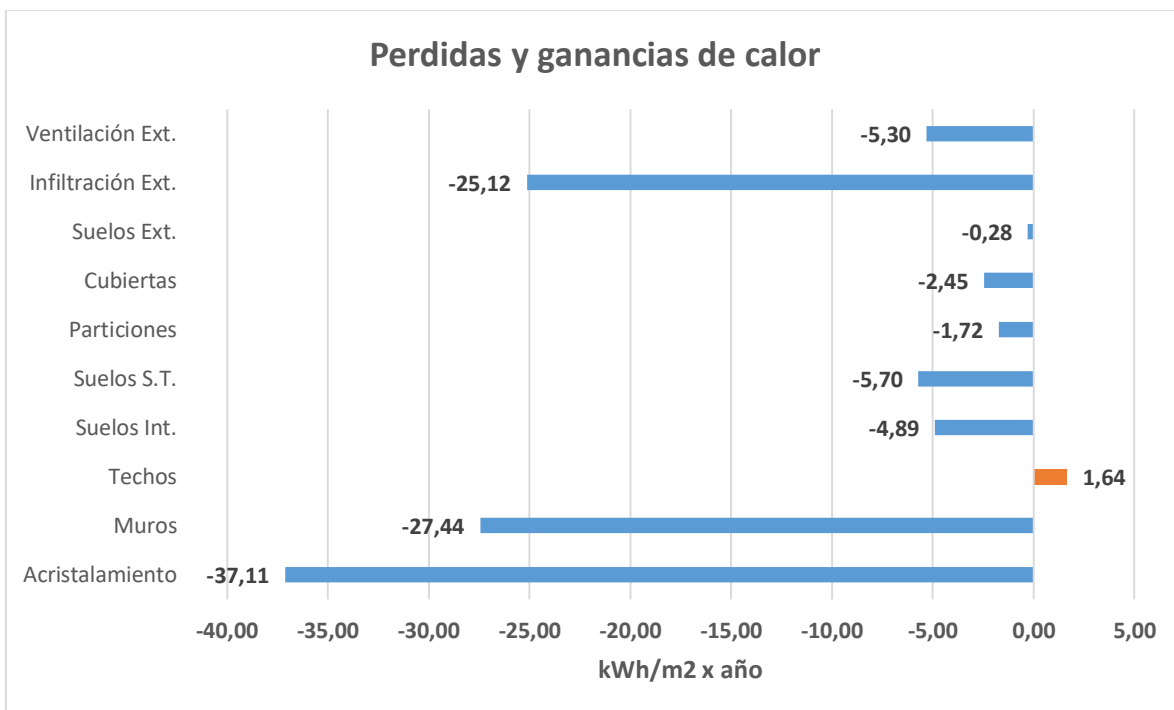


Figura 5.1.4 Pérdidas y ganancias a través de los cerramientos.

Fuente: Elaboración propia.

Las pérdidas y ganancias de calor a través de los cerramientos del edificio, son ilustradas en la *figura 5.1.4*, se puede observar que las mayores pérdidas de calor se dan a través de las superficies acristaladas, muros e infiltraciones. Tomando en cuenta los cálculos de transmitancia térmica (7. Anexos) y específicamente la conductividad térmica (*tabla 4.3.1*) de los acristalamientos y muros exteriores, puede deducirse que, su elevada conductividad genera grandes transferencias

de calor con respecto a los otros elementos. Cabe señalar en este aspecto, que, los elementos en contacto directo con el terreno, tienen una menor transferencia de calor debido a que la tierra posee una temperatura más estable que el aire.

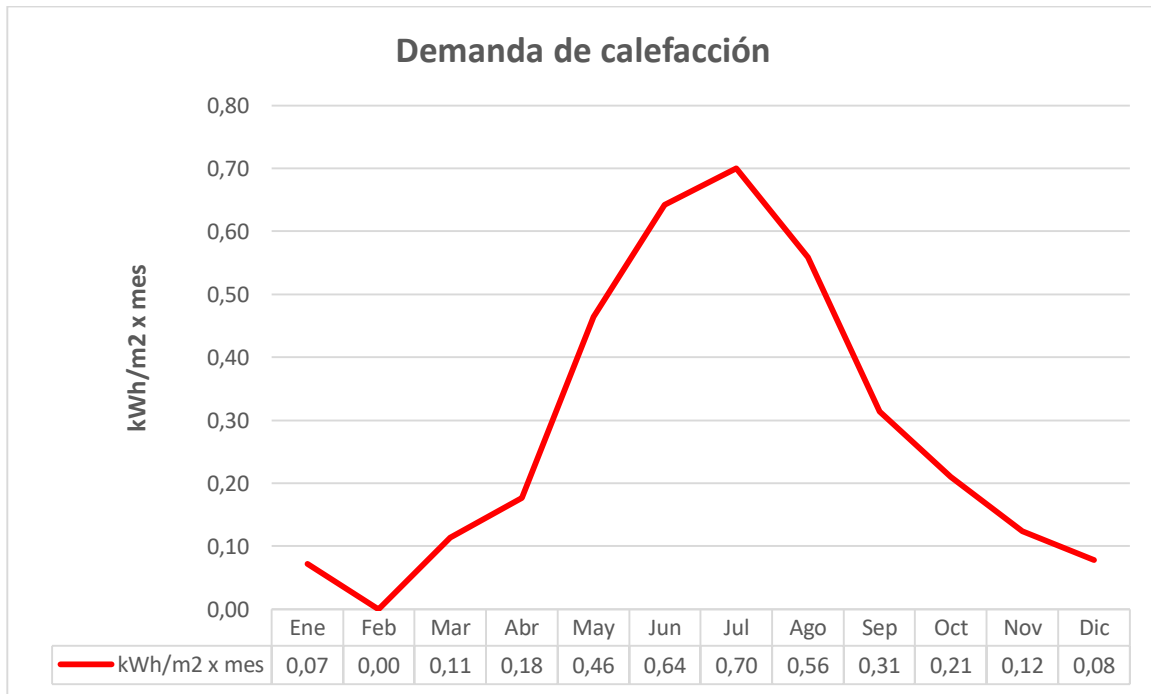


Figura 5.1.5 Demanda de calefacción

Fuente: Elaboración propia

El gráfico anterior representa la energía requerida para calefaccionar los ambientes habitables del edificio en estudio, se puede apreciar un escenario diametralmente opuesto a las necesidades de refrigeración, presentado una tendencia de u invertida o campana (figura 5.1.5), con marcadas diferencias entre los meses de verano e invierno. Es posible destacar que la demanda de calefacción durante el mes de mayor solicitud, Julio (0,7 kWh/m² x mes), llega a ser hasta 10 veces lo demandado durante el mes de Enero (0,07 kWh/m² x mes).

Se puede observar que las necesidades de refrigeración son mucho más elevadas que las de calefacción. En la bibliografía existente es posible encontrar este mismo escenario (Córdova, 2013; Pino et al., 2010). Es probable que esta relación se deba a las condiciones climáticas existentes, ya que la ciudad de Valparaíso presenta un clima templado – cálido según clasificación Köppen, en el cual las temperaturas y la radiación solar durante los meses de verano, se elevan significativamente con respecto a la temporada de invierno (Sepúlveda, 2003), esto sumado a la elevada ocupación debido al uso del recinto como institución educacional, provocarían esta relación asimétrica entre las demandas de refrigeración y calefacción en la facultad de Ingeniería.



Figura 5.1.6 Modelo de la facultad

5.2. Proposición de reformas en la materialidad de la envolvente.

Como se mencionó en el punto 3.2 de este trabajo y bajo el alero de los resultados (ver figura 5.1.3; 5.1.4), entre los principales factores que influyen en el comportamiento térmico de un edificio, se encuentran las condiciones atmosféricas que el lugar presenta y la envolvente de este; siendo esta última, la que actúa como interface entre el clima exterior y el interior del edificio, mitigando los efectos atmosféricos, como; temperatura ambiente, radiación solar, viento, humedad, entre otros. Una característica relevante de la envolvente del edificio en cuestión, es el elevado porcentaje de superficies de ventanas que posee, llegando a cerca del 49% en sus fachadas expuestas al exterior; la alta conductividad de sus muros exteriores (ver tabla 4.3.1). En consideración a esto, la incidencia que tendría el porcentaje de superficies vidriadas de la envolvente en la demanda de refrigeración, es un factor relevante según lo expuesto por (Bustamante et al., 2011; Bustamante & Encinas, 2012; Charisi, 2017; Córdova, 2013). Es por esto que a continuación, se proponen reformas a los acristalamientos del edificio.

Hoy en día, es posible encontrar en el mercado una gran variedad de vidrios, cada uno con diferentes propiedades ópticas y térmicas, las que causan un mejor o peor desempeño energético. En relación a esto, actualmente existe un gran número de empresas dedicadas a la instalación de ventanas en Chile, las que trabaja con diferentes fabricantes de vidrios, entre las que encontramos, la casa manufacturera inglesa, Pilkington, y la compañía francesa Saint-Gobain. Por esto, se utilizarán vidrios pertenecientes a estas compañías, para realizar las simulaciones. Los valores de las características y propiedades de los vidrios sometidos a evaluación, tendrán fuente en el IGDB, las cuales, se detallan a continuación:

Propiedades térmicas y ópticas de los vidrios.									
Tipo de Vidrio	Tsol	Rsol1	Rsol2	Tvis	Rvis1	Rvis2	emis1	emis2	Cond
Vidrio Claro	0,783	0,071	0,071	0,884	0,080	0,080	0,840	0,840	1,000
Vidrio Reflectivo	0,137	0,408	0,114	0,158	0,556	0,208	0,837	0,837	1,000
Vidrio Low - E	0,599	0,236	0,158	0,836	0,048	0,055	0,048	0,837	1,000
Vidrio Reflectivo / Low - E	0,251	0,596	0,469	0,667	0,106	0,108	0,026	0,840	1,000

Tabla 5.2.1 Propiedades térmicas y ópticas de los vidrios.

Fuente: Elaboración propia en base a IGDB.

Donde:

Tsol: Transmitancia solar;

Rsol1: Reflectancia solar exterior;

Rsol2: Reflectancia solar interior;

Tvis: Transmitancia visible;

Rvis1: Reflectancia visible exterior;

Rvis2: Reflectancia visible interior;

emis1: Emisividad infrarroja exterior;

emis2: Emisividad infrarroja interior;

Cond: Conductividad térmica (W/mK)

Vidrio Claro: Pilkington 6mm Optifloat Clear

Vidrio Reflectivo: Pilkington 6mm Refflite Arctic Blue

Vidrio Low-E: Saint-Gobain Glass SGG PLANITHERM TOTAL

Vidrio Reflectivo / Low - E: Saint-Gobain Glass COOL-LITE XTREME 60-28 II 6mm



Figura 5.2.1 Plantilla de datos de vidrios en DesignBuilder.

Fuente: Elaboración propia.

Se han elegido distintos tipos de vidrios, ya que el actual no posee características especiales, que limiten el paso de la energía a través de estos. Siendo capaces de transmitir en gran medida el calor hacia el interior o el exterior (Lirquen, 2014; Molina, 2011).

Una manera de clasificar la ganancia solar a través de las ventanas, es por medio del coeficiente de ganancia de calor solar (SHGC), el cual, indica la fracción de radiación solar admitida a través de una ventana, ya sea transmitida directamente y/o absorbida, y posteriormente liberada como calor dentro de los recintos. Un SHGC bajo, transmite menos calor, por lo cual es útil para reducir las cargas de enfriamiento durante el verano. Por el contrario, un SHGC alto otorga una mayor captación solar durante el invierno (Energy.gov). El SHGC calculado mediante DesignBuilder para cada escenario se muestra en la Tabla 5.2.6 (*Variables de los escenarios*).

Por otra parte, los vidrios con propiedades de control solar reducen la carga térmica y el exceso iluminación debido a la radiación solar entrante, mediante la utilización de tintes en su masa, para que parte de la radiación incidente sea absorbida por el material y parcialmente devuelta al exterior, o bien mediante depósitos químicos superficiales en la superficie de los vidrios para reflejar

directamente al exterior ciertas radiaciones de onda corta (vidrios reflectantes) (Lirquen, 2014; Molina, 2011).

Los vidrios de Low – E, tienen aplicado un revestimiento de baja emisividad en una de sus caras, esta, refleja la mayor parte de la radiación infrarroja de onda larga que producen (entre otras fuentes) los sistemas de calefacción al interior de un edificio (*ver Figura 5.2.2*), y a la vez, son transparentes a la luz diurna, y permiten el ingreso de gran parte de la radiación solar de onda corta. De esta manera, el recubrimiento de baja emisividad evita las pérdidas de calor desde el interior de los recintos (Lirquen, 2014; Molina, 2011). Los valores U calculados mediante DesignBuilder para cada configuración de ventana, se muestran en la tabla *Tabla 5.2.6 Variables de los escenarios*.

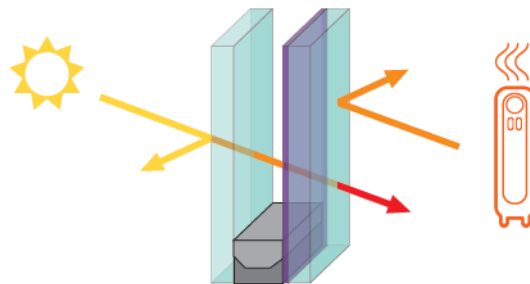


Figura 5.2.2 Funcionamiento de los vidrios Low - E.

Fuente: Guía productos de arquitectura (Lirquen, 2014).

Editar acristalamiento - Vidrios Exterior Hucke

Acrislamiento

Capas | **Valores calculados** | Coste

Valores Calculados	
Transmisión solar total (SHGC)	0,828
Transmisión solar directa	0,789
Transmisión de luz	0,883
Valor-U (ISO 10292/ EN 673) (W/m ² -K)	5,743
Valor U (W/m²-K)	5,804

Ayuda

Info | Datos

Resultados del Cálculo

Este resumen de datos se ha calculado mediante EnergyPlus, y puede ser útil para establecer los datos del acristalamiento cuando se conocen los datos globales del mismo, en vez de la información sobre cada hoja individual de vidrio y sobre los gases de relleno. Estos datos se utilizan en los métodos

Datos del modelo

Ayuda Cancelar Aceptar

Figura 5.2.3 Valor U para ventana con vidrio simple.

Fuente: Elaboración propia.



Figura 5.2.4 Valor U para ventana con DVH con Low - E.

Fuente: Elaboración propia.

Otra reforma que se propone es la aplicación de un mortero de estuco térmico en la cara exterior de los muros de la envolvente del edificio, debido a que este tipo de reformas son recomendadas en la literatura (Bustamante et al., 2011; Charisi, 2017; Rodriguez et al., 2018). Esto, porque a través de los muros, se intercambia una gran cantidad de energía (ver figura 5.1.4) por la elevada conductividad térmica de los materiales utilizados para su construcción (ver figura 4.3.1). En cuanto al material aislante, se propone un mortero de vermiculita, el cual tiene las siguientes características:

Conductividad (W/m × K)	Densidad (kg/m ³)	Calor específico (J/kg × K)
0,20	720	840

Tabla 5.2.2 Propiedades del mortero de vermiculita.

Fuente: Elaboración propia en base a la Guía A (CIBSE, 2007)

Como método experimental se establecerán 2 escenarios con este material, el primero establece una capa de 26 mm lo que conllevaría una transmitancia de 2,39 (W/m²K) (reducción de ≈ 1 (W/m²K)). El segundo escenario, se evaluará con una capa de 84 mm, para obtener una transmitancia de 1,41 (W/m²K) (reducción de ≈ 2 (W/m²K)). Todo esto, para estudiar los efectos de la disminución de la transmitancia de los muros de la envolvente, en la demanda de climatización del edificio. A continuación, se muestran los cálculos realizados con THERM para estos escenarios (ver 4.5 Definición de la transmitancia térmica en elementos con puentes térmicos).

U-Factors X

	U-factor W/m ² -K	delta T C	Length mm	Rotation		Heat Flow W	Heat Flux W/m ²
Interior	1.2944	20.0	1014	N/A	Total Length	26.2494	25.8870
Exterior	1.2943	20.0	1014	N/A	Custom length	26.2490	25.8866

Display

U-factor
 R-value

% Error Energy Norm

Figura 5.2.5 Calculo de transmitancias y calor mediante THERM.

Fuente: Elaboración Propia.

Transmitancia Térmica Lineal			Transmitancia Térmica Total		
Q(1) =	42,53	(W)	Ψ =	0,1609	(W/m x K)
Q(0) =	39,31	(W)	L =	3292,59	(m)
Δ =	20	(°C)	A total =	1243,28	(m ²)
L =	1	(m)	U(0) =	1,97	(W/m ² K)
Ψ =	0,16	(W/m x K)	U total=	2,39	(W/m²K)

Tabla 5.2.3 Calculo de transmitancia para mortero de espesor 26 mm.

Fuente: Elaboración Propia.

Transmitancia Térmica Lineal			Transmitancia Térmica Total		
Q(1) =	26,25	(W)	Ψ =	0,06	(W/m x K)
Q(0) =	25,04	(W)	L =	3292,59	(m)
Δ =	20	(°C)	A total =	1243,28	(m ²)
L =	1	(m)	U(0) =	1,25	(W/m ² K)
Ψ =	0,06	(W/m x K)	U total=	1,41	(W/m²K)

Tabla 5.2.4 Calculo de transmitancia para mortero de espesor 84 mm.

Fuente: Elaboración Propia.

Dentro de las reformas propuestas, se crearon algunas combinaciones de estas, tratando de encontrar las mejores combinaciones posibles para los distintos tipos de vidrios seleccionados, con el objetivo de disminuir la demanda de climatización. Los escenarios 04, 05 y 06, son estudiados debido a que la incorporación de una cámara de aire en los elementos acristalados ha ayudado a reducir las necesidades de calefacción (Bustamante et al., 2011; Bustamante & Encinas, 2012), puesto que la baja conductividad del aire, reduce la transmitancia térmica a través estos.

A continuación, se describen los escenarios propuestos para simulación, y en las páginas siguientes, se da análisis los resultados obtenidos.

Escenario	Descripción
01	Vidrio Reflectivo
02	Vidrio Low - E
03	Vidrio Reflectivo / Low - E
04	Vidrio Reflectivo + 12 mm de cámara de aire + Vidrio claro
05	Vidrio Reflectivo / Low - E + 12 mm de cámara de aire + Vidrio claro
06	Vidrio Reflectivo + 12 mm de cámara de aire + Vidrio Low - E
07	Mortero vermiculita e= 26 mm en la superficie exterior de los muros perimetrales
08	Mortero vermiculita e= 84 mm en la superficie exterior de los muros perimetrales
09	Escenario 08, y Vidrio reflectivo + 12 mm cámara de aire + Vidrio Low – E

Tabla 5.2.5 Escenarios propuestos.

Fuente: Elaboración Propia.

Variables de los escenarios			
Variables	U muros (W/m ² K)	U ventanas (W/m ² K)	SHGC
Sin reforma	3,41	5,8	0,828
Escenario 01	3,41	5,8	0,266
Escenario 02	3,41	3,3	0,656
Escenario 03	3,41	3,2	0,319
Escenario 04	3,41	2,7	0,192
Escenario 05	3,41	1,6	0,283
Escenario 06	3,41	1,9	0,142
Escenario 07	2,39	5,8	0,828
Escenario 08	1,41	5,8	0,828
Escenario 09	1,41	1,9	0,142

Tabla 5.2.6 Variables de los escenarios.

Fuente: Elaboración Propia.

5.3. Evaluación de reformas en la materialidad de la envolvente.

En los siguientes párrafos se analizan los resultados de los escenarios propuestos para simulación, tomando como parámetro global las demandas de calefacción y refrigeración, y comparándolas con las demandas del escenario sin reformas expuestas en el punto 5.1 de este capítulo. Se analizarán estas variaciones mediante los gráficos correspondientes a cada una de las demandas, en la que el escenario con reformas se mostrara de **color naranja**.

Escenario 01: Reforma Vidrio reflectivo.

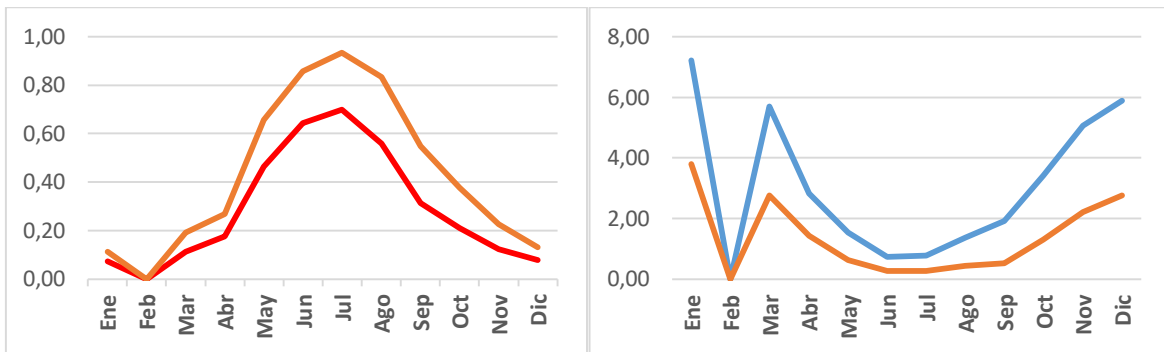


Figura 5.3.1 Demandas de calefacción (izquierda) y refrigeración (derecha) en kWh/m² x mes del Escenario 01.

Fuente: Elaboración Propia.

Demanda	Escenario Base	Reforma	Variación %
Calefacción	3,45	5,14	48,75
Refrigeración	36,44	16,40	-54,99
Total	39,89	21,54	-46,01

Tabla 5.3.1 Resultados del Escenario 01 en kWh/m² x año.

Fuente: Elaboración Propia.

Se puede apreciar que el vidrio reflectivo baja notablemente las necesidades de refrigeración, reduciendo esta, en más de un 50%. Aun considerando que la demanda de calefacción aumenta en casi un 50%, en el escenario global la reducción total llega a un 46,01%. Esto, debido a que la demanda de calefacción al ser de menor magnitud, contribuiría en menor medida a la demanda total.

Escenario 02: Reforma Vidrio Low - E.

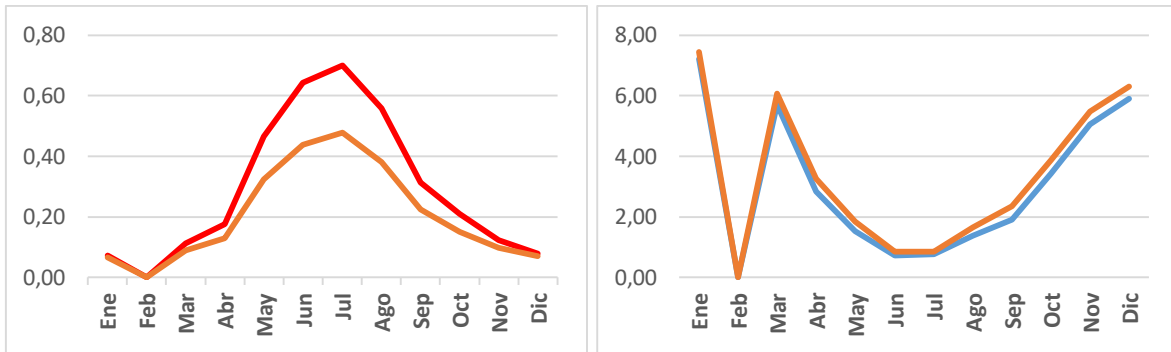


Figura 5.3.2 Demandas de calefacción (izquierda) y refrigeración (derecha) en kWh/m2 x mes del Escenario 02.

Fuente: Elaboración Propia.

Demanda	Escenario Base	Reforma	Variación %
Calefacción	3,45	2,45	-29,02
Refrigeración	36,44	39,99	9,74
Total	39,89	42,44	6,38

Tabla 5.3.2 Resultados del Escenario 02 en kWh/m2 x año.

Fuente: Elaboración Propia.

Se puede observar que los vidrios de baja emisividad (Low - E), efectivamente son una buena alternativa para disminuir la demanda de calefacción, pero, considerar esta reforma conllevaría un alza de 9,74% en las necesidades de refrigeración, llegando hasta 39,99 (kWh/m2 x año), por lo que la implementación unitaria de esta, se traduciría solo en un aumento del 6,38% de la demanda de climatización total.

Escenario 03: Reforma Vidrio Reflectivo / Low - E

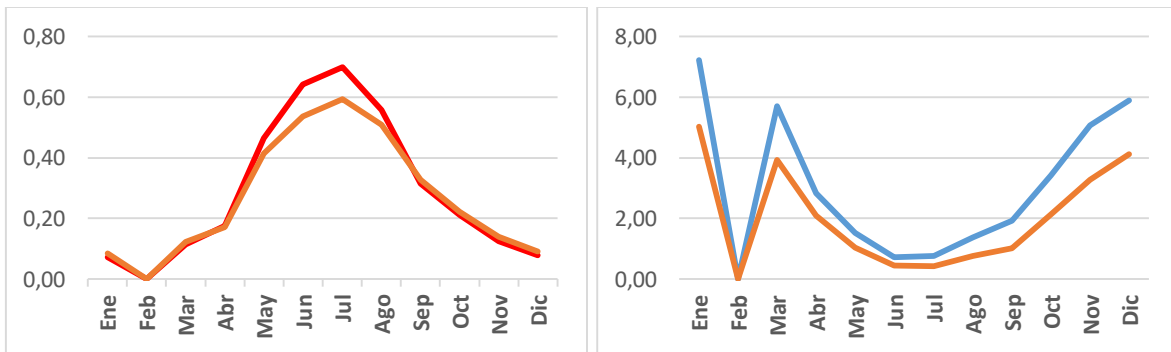


Figura 5.3.3 Demandas de calefacción (izquierda) y refrigeración (derecha) en kWh/m2 x mes del Escenario 03.

Fuente: Elaboración Propia.

Demanda	Escenario Base	Reforma	Variación %
Calefacción	3,45	3,21	-6,97
Refrigeración	36,44	24,26	-33,42
Total	39,89	27,47	-31,13

Tabla 5.3.3 Resultados del Escenario 03 en kWh/m² x año.

Fuente: Elaboración Propia.

El Vidrio Reflectivo / Low – E, es un tipo de vidrio que posee características de control solar, y baja emisividad. Se puede apreciar que esta reforma genera reducciones en ambas demandas, tanto de calefacción como de refrigeración, siendo considerablemente mayor en esta última. Si bien, se puede afirmar que esta reforma genera una reducción total de la demanda menor al Escenario 01, el hecho de que esta reforma puede aportar a la reducción simultanea de ambas demandas, significa que es mucho más completa que la del Escenario 01 o 02, al reducir la ganancia solar, y disminuir las pérdidas de calor a través de las superficies acristaladas.

Escenario 04: Reforma Vidrio Reflectivo + 12 mm de cámara de aire + Vidrio claro

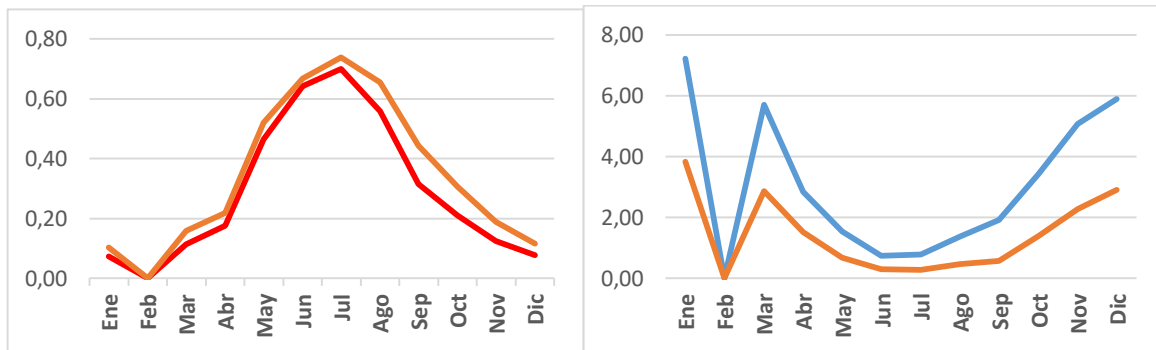


Figura 5.3.4 Demandas de calefacción (izquierda) y refrigeración (derecha) en kWh/m² x mes del Escenario 04.

Fuente: Elaboración Propia.

Demanda	Escenario Base	Reforma	Variación %
Calefacción	3,45	4,11	19,14
Refrigeración	36,44	16,96	-53,46
Total	39,89	21,07	-47,17

Tabla 5.3.4 Resultados del Escenario 04 en kWh/m² x año.

Fuente: Elaboración Propia.

Al evaluar el mismo tipo de vidrio que en el Escenario 01, pero esta vez, en una ventana de tipo doble vidriado hermético (DVH), la demanda de calefacción solo aumenta en un 19,14% (Escenario 01: aumento de 48,75%), lo que significa una menor pérdida de calor, debido a la cámara de aire que disminuye el flujo de calor por los acristalamientos. Pero esto también conlleva una mayor necesidad de refrigeración frente al Escenario 01 (16,40 kWh/m² x año), pero en el resultado total la demanda anota una disminución de 47,17 %, generando mejores resultados que el Escenario 01.

Escenario 05: Reforma Vidrio Reflectivo / Low - E + 12 mm de cámara de aire + Vidrio claro.

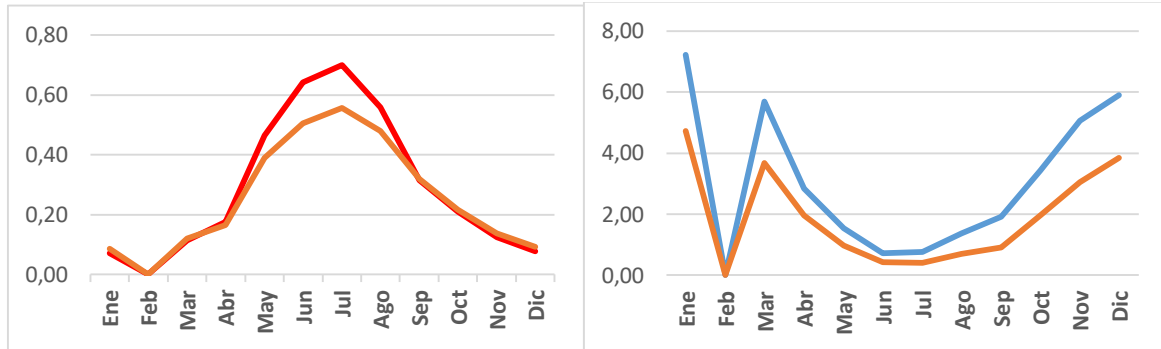


Figura 5.3.5 Demandas de calefacción (izquierda) y refrigeración (derecha) en kWh/m² x mes del Escenario 05.

Fuente: Elaboración Propia.

Demanda	Escenario Base	Reforma	Variación %
Calefacción	3,45	3,07	-11,06
Refrigeración	36,44	22,61	-37,94
Total	39,89	25,69	-35,61

Tabla 5.3.5 Resultados del Escenario 05 en kWh/m² x año.

Fuente: Elaboración Propia.

El escenario de Vidrio Reflectivo / Low - E + 12 mm de cámara de aire + Vidrio claro, genera grandes reducciones, tanto en la demanda de calefacción, como en la de refrigeración, se deduce de esto, que las propiedades low-E del vidrio, junto con el aislamiento proporcionado por la cámara de aire, actúan de manera sinérgica, llegando a una reducción de la demanda de calefacción de un 11,06%. Pero, en relación al caso anterior, la demanda de refrigeración baja solo en un 37,94% (Escenario 04: reducción de 53,46%), y, ya que en este caso la demanda de refrigeración es mucho más significativa en la demanda total, esta reforma que queda por debajo de los resultados obtenidos anteriormente.

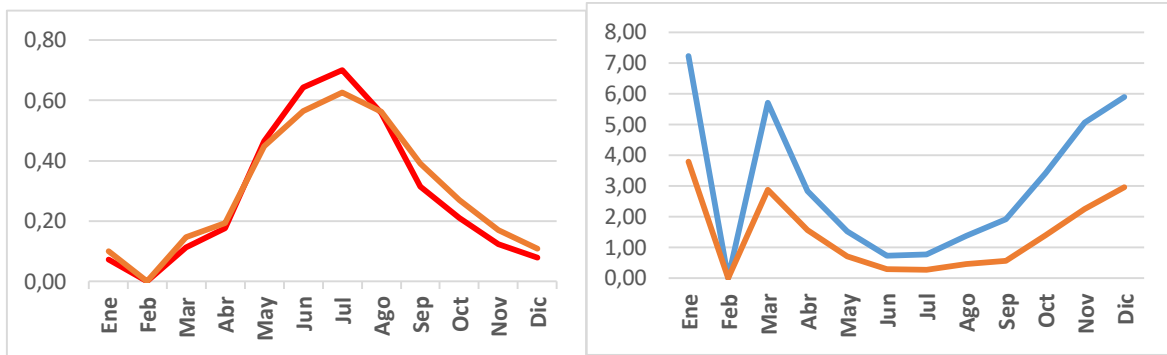
Escenario 06: Reforma Vidrio reflectivo + 12 mm de cámara de aire + Vidrio Low – E

Figura 5.3.6 Demandas de calefacción (izquierda) y refrigeración (derecha) en kWh/m² x mes del Escenario 06.

Fuente: Elaboración Propia.

Demanda	Escenario Base	Reforma	Variación %
Calefacción	3,45	3,58	3,72
Refrigeración	36,44	17,12	-53,01
Total	39,89	20,70	-48,10

Tabla 5.3.6 Resultados del Escenario 06 en kWh/m² x año.

Fuente: Elaboración Propia.

Se puede observar que en el escenario de vidrio reflectivo + 12 mm de cámara de aire + vidrio Low – E, cada uno de los elementos aporta reducciones a cada demanda de climatización. En primer lugar, la demanda de refrigeración se reduce cuantitativamente semejante al Escenario 04 (Escenario 04: reducción de 53,46%), pero, como se vio anteriormente, el doble vidriado hermético aun generaba un aumento considerable en la demanda de calefacción, fue por esto que se propuso la incorporación del vidrio Low – E, que, a través de los resultados, aumenta solo en un 3,72% esta demanda (Escenario 04: aumento de 19,14%). Siendo esta reforma, la que obtiene los mejores resultados en cuanto a configuración de ventana.

Escenario 07: Reforma mortero vermiculita $e= 26$ mm en la superficie exterior de los muros perimetrales

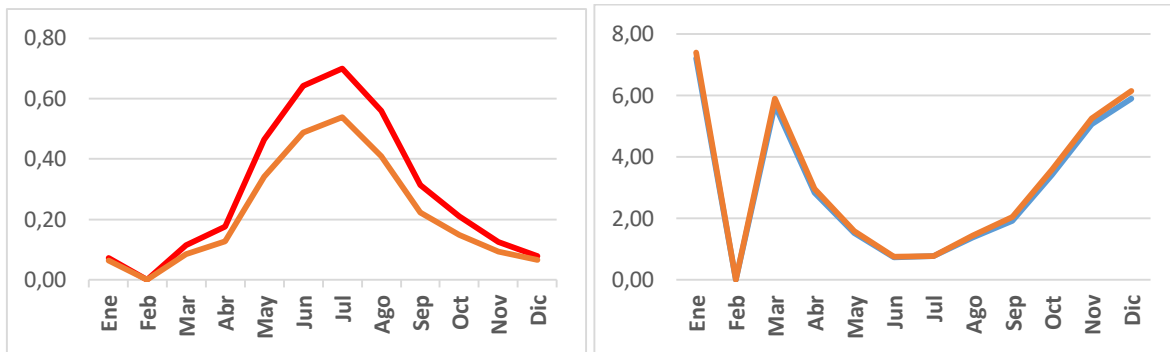


Figura 5.3.7 Demandas de calefacción (izquierda) y refrigeración (derecha) en kWh/m² x mes del Escenario 07.

Fuente: Elaboración Propia.

Demanda	Escenario Base	Reforma	Variación %
Calefacción	3,45	2,58	-25,23
Refrigeración	36,44	37,82	3,79
Total	39,89	40,40	1,28

Tabla 5.3.7 Resultados del Escenario 07 en kWh/m² x año

Fuente: Elaboración Propia.

El mortero de vermiculita de espesor 26 mm en los muros de la envolvente, genera una gran reducción en la demanda de calefacción, llegando a un 25,25% de disminución. El espesor de la capa, se estableció para generar una reducción de ≈ 1 (W/m²K) en la transmitancia original de los muros. Tal como se vio en la figura 5.1.4 (*Pérdidas y ganancias a través de los cerramientos*), los muros de la envolvente son el segundo elemento con mayor transferencia de energía, por lo que, al incorporar el mortero de vermiculita, esta transferencia se ve mermada, disminuyendo las necesidades de calefacción.

Escenario 08: Reforma Mortero vermiculita $e= 84$ mm en la superficie exterior de los muros perimetrales

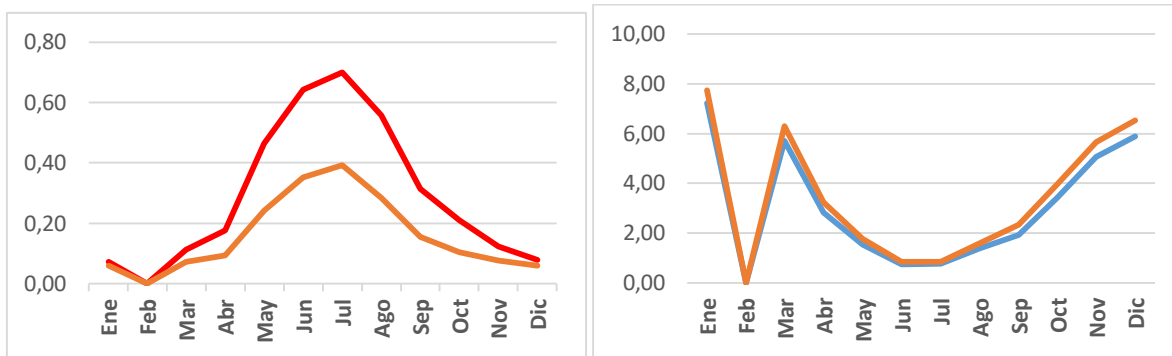


Figura 5.3.8 Demandas de calefacción (izquierda) y refrigeración (derecha) en kWh/m² x mes del Escenario 08.

Fuente: Elaboración Propia.

Demanda	Escenario Base	Reforma	Variación %
Calefacción	3,45	1,90	-45,11
Refrigeración	36,44	40,77	11,88
Total	39,89	42,66	6,95

Tabla 5.3.8 Resultados del Escenario 08 en kWh/m² x año.

Fuente: Elaboración Propia.

El escenario de mortero vermiculita de espesor 84 mm, en la superficie exterior de los muros perimetrales, generan un resultado similar al escenario anterior. En este, la transmitancia de los muros se disminuyó en ≈ 2 (W/m²K), el doble con respecto al escenario anterior, y en relación a este último, la demanda de calefacción se redujo en casi al doble de su magnitud. Básicamente, en este escenario se producen los mismos efectos que en el anterior, pero, con una mayor intensidad, con un mayor aumento de la demanda de refrigeración, y, por esto, al analizar el resultado total, la reforma contribuye a un aumento en la demanda de un 6,95%.

Como bien la lógica lo indicaría, la disminución de la transmitancia térmica de los muros exteriores, a través de la incorporación de un material aislante (baja conductividad), produjo un descenso en la demanda de calefacción. Pero al analizar el escenario global, el alto porcentaje de superficies vidriadas conlleva a una alta ganancia solar, por lo que la adición de aislante en los muros de la envolvente, disminuirán la capacidad de perder calor a través de estos, lo que produciría un sobrecalentamiento de los espacios durante verano, lo que requeriría de una mayor demanda de refrigeración. Por esto, la incorporación del mortero de vermiculita, solo se recomienda si está acompañada de las reformas propuestas a los vidrios de la envolvente.

Escenario 09: Reforma Mortero vermiculita $e= 84$ mm y Vidrio reflectivo + 12 mm de cámara de aire + Vidrio Low – E.

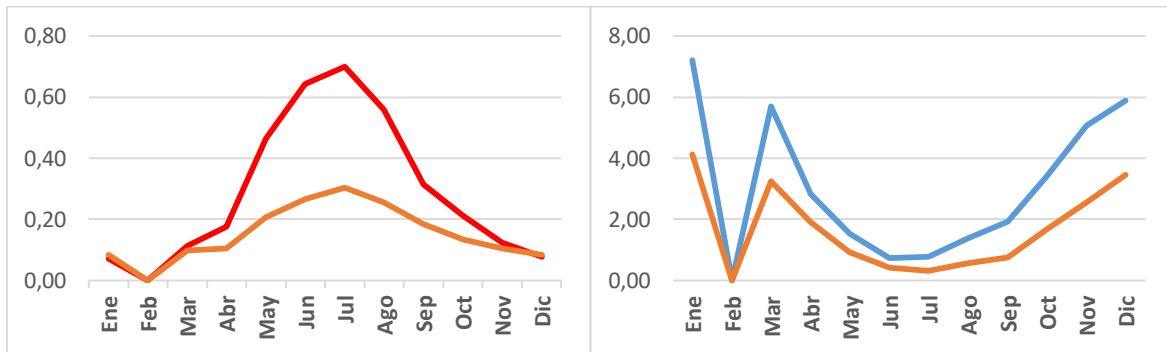


Figura 5.3.9 Demandas de calefacción (izquierda) y refrigeración (derecha) en kWh/m² x mes del Escenario 09.

Fuente: Elaboración Propia.

Demanda	Escenario Base	Reforma	Variación %
Calefacción	3,45	1,82	-47,16
Refrigeración	36,44	19,90	-45,38
Total	39,89	21,73	-45,54

Tabla 5.3.9 Resultados del Escenario 09 en kWh/m² x año.

Fuente: Elaboración Propia.

El Escenario 09 se estableció debido a los buenos resultados del Escenario 06 y 08, en los cuales tanto la demanda de calefacción, como de refrigeración, disminuyó en más de 45% trabajando por separado. En conjunto, ambas reformas trabajan de manera muy similar a cada uno de sus respectivos escenarios, reduciendo ambas demandas simultáneamente, en más de un 45%.

A modo de resumen, y tomando en consideración las variables típicas en el análisis de una simulación energética de estas características, se confecciono la tabla que muestra el resultado de cada escenario junto con sus respectivas variables

Resultado de los escenarios					
Variables	U muros (W/m ² K)	U ventanas (W/m ² K)	SHGC	D. Calef. (kWh/m ² x año)	D. Refrig. (kWh/m ² x año)
Sin reforma	3,41	5,8	0,828	3,45	36,44
Escenario 01	3,41	5,8	0,266	5,14	16,4
Escenario 02	3,41	3,3	0,656	2,45	39,99
Escenario 03	3,41	3,2	0,319	3,21	24,26
Escenario 04	3,41	2,7	0,192	4,11	16,96
Escenario 05	3,41	1,6	0,283	3,07	22,61
Escenario 06	3,41	1,9	0,142	3,58	17,12
Escenario 07	2,39	5,8	0,828	2,58	37,82
Escenario 08	1,41	5,8	0,828	1,9	40,77
Escenario 09	1,41	1,9	0,142	1,82	19,9

Tabla 5.3.10 Resultado de los escenarios.

Fuente: Elaboración Propia.

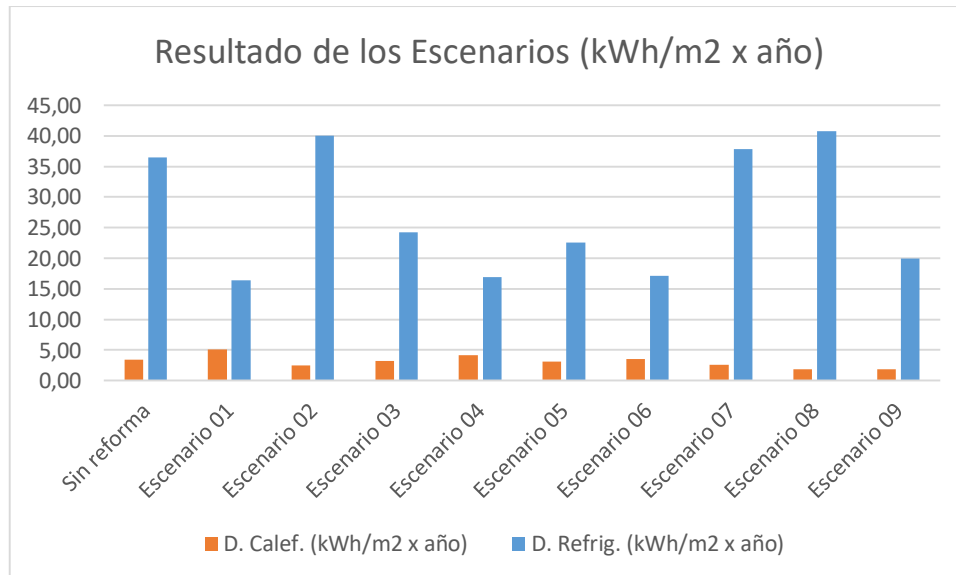


Figura 5.3.10 Resultado de los Escenarios (kWh/m² x año).

Fuente: Elaboración Propia.

Tomando como referencia el Escenario 09, debido que fue el que presento mayores disminuciones en ambas demandas simultáneamente, a continuación, se contrastaran los resultados de este escenario, con el original (sin reformas), para entender cómo afectan las reformas a los flujos de calor que ocurren en la envolvente del edificio.

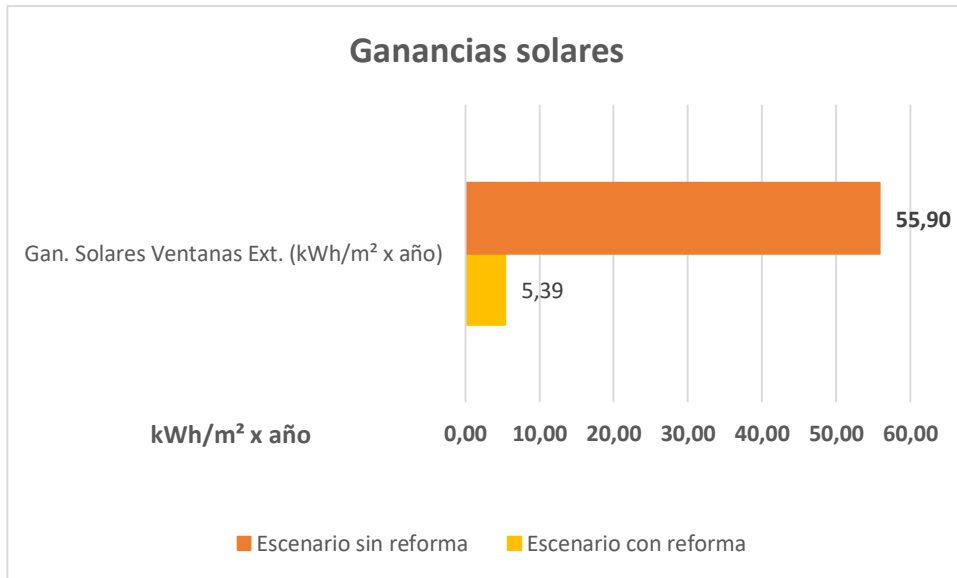


Figura 5.3.11 Comparación de ganancias solares por año.

Fuente: Elaboración Propia.

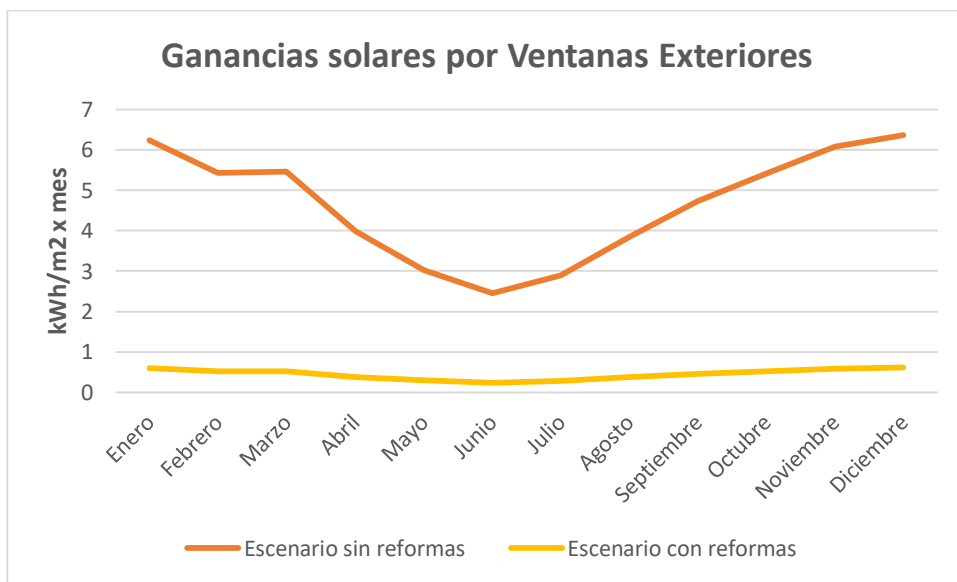


Figura 5.3.12 Comparación de ganancias solares mensuales.

Fuente: Elaboración Propia.

En las figuras anteriores, se muestran los resultados de ganancias solares a través de las ventanas exteriores del edificio. En ellas, se puede observar claramente como las reformas realizadas, disminuyen en gran medida las ganancias de calor, llegando a diezmar las necesidades de climatización en forma anual. Por otra parte, en la figura 5.3.12, se puede apreciar que, en el escenario con reformas, la gráfica de ganancias solares adopta una tendencia casi horizontal, desapareciendo los puntos de inflexión de la época estival e invernal. Lo que significa, que el edificio es menos susceptible a los cambios provocados por la radiación solar, siendo térmicamente más estable frente al escenario sin reformas.

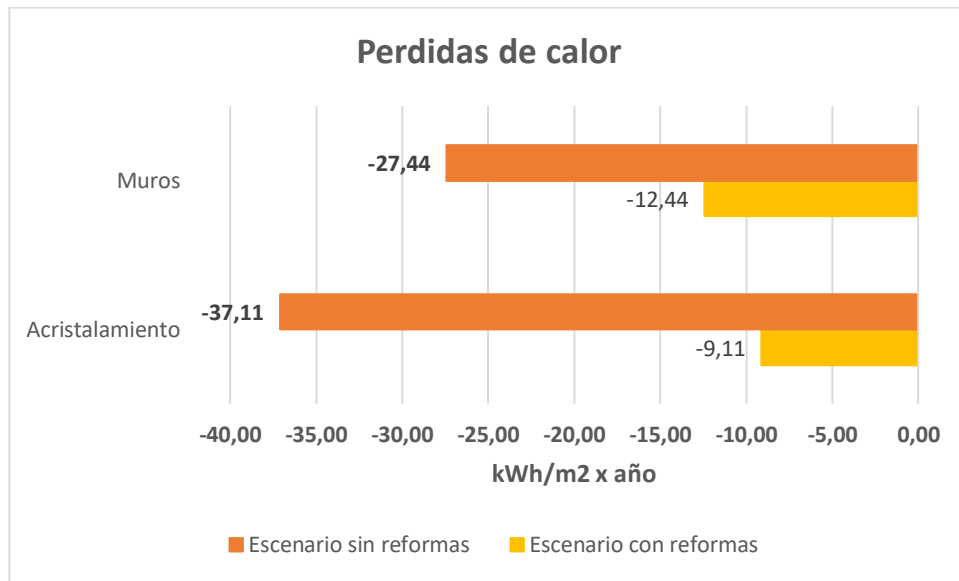


Figura 5.3.13 Comparación de pérdidas de calor a través de la envolvente por año.

Fuente: Elaboración Propia.

En cuanto a la transferencia de calor por los elementos de la envolvente, el cambio realizado por la reforma en los muros exteriores, genero una reducción en las pérdidas de calor de más del 50%, al disminuir en aproximadamente 2 (W/m^2K). su transmitancia térmica.

Por su parte, las ventanas exteriores, son un elemento que permite altas ganancias y pérdidas de calor, en relación a estas últimas, la incorporación de vidrios con características de baja emisividad en la envolvente y la adición de la cámara de aire en un conjunto de doble vidriado hermético, que producen una reducción aproximada de 4 (W/m^2K) (ver *Tabla 5.2.6 Variables de los escenarios*), reducen más del 75% de las pérdidas a través de las ventanas. Por lo que, junto a las características de control solar, son una efectiva medida para contrarrestar las fluctuaciones de energía del ambiente exterior.

6. Conclusiones y recomendaciones

Mantener el confort térmico de un edificio es fundamental para conseguir un ambiente de trabajo favorable, que promueva la atención en el desarrollo de las actividades, de manera eficiente. Pero, para esto se requiere conocer los alcances de cada una de las variables que intervienen en las condiciones ambientales interiores, con el propósito de conducir las hacia valores que promuevan el confort de los espacios.

El desarrollo de la informática, con el objetivo de sistematizar y programar tareas iterativas, ha hecho posible el desarrollo de herramientas computacionales que realicen miles de ecuaciones matemáticas, de manera precisa y veloz, para calcular teóricamente los flujos de calor que producen las condiciones interiores en un edificio, posibilitando establecer su comportamiento en el tiempo, siendo una valiosa herramienta para el desarrollo de edificios energéticamente sustentables.

Este estudio, tuvo como objetivo cuantificar la demanda de energía necesaria para climatizar los ambientes interiores del edificio de la Facultad de Ingeniería de la Universidad de Valparaíso, y estudiar la variación de la demanda, al modificar los materiales que componen la envolvente. Para lograr esto, se estudiaron los principios termodinámicos que influyen en el comportamiento térmico del edificio, ya que estos, son la base de los modelos de cálculo de las necesidades de climatización. En conjunto a esta revisión, se estudiaron los fenómenos o factores del ambiente exterior y la envolvente, ya que esta última, es la encargada de amortiguar los factores exteriores.

Con el propósito de estudiar como distintos actores en el rubro de la construcción abordan las necesidades de eficiencia energética y estimación de las demandas de climatización, se investigaron diferentes sistemas de evaluación de eficiencia energética. En ellos, es posible encontrar, que la simulación energética, es una técnica recomendada para estudiar múltiples parámetros de diseño, y el desempeño energético que tendrá el edificio proyectado, durante su fase de operación. En complemento a esto, se estudiaron los métodos matemáticos utilizados por las herramientas de simulación para realizar los cálculos.

La simulación energética, es una técnica muy recomendada en el estudio de una edificación, pero requiere de la incorporación de muchos datos para poder realizar esta tarea. Existen diferentes organismos dedicados a organizar los procedimientos e información necesaria, para abarcar las necesidades mínimas de un modelo de simulación que pueda garantizar resultados fiables de ser considerados. Y por esta razón, este estudio se apegó a una de las metodologías existentes para llevar a cabo este tipo de procedimiento.

Habiendo realizado la simulación, y obtenidos los resultados, se procedió a dar análisis y establecer conclusiones de estos, los cuales fueron ordenados de acuerdo a los objetivos de esta investigación.

Determinación de la demanda termo-energética.

La determinación de la demanda, se realizó en base a la metodología indicada en la Guía Técnica de Apoyo Número 2 del TDR (CITECUBB, 2012), abarcando todos los datos exigidos por esta. En solo un aspecto la metodología difiere de la guía, debido a la existencia de numerosos puentes térmicos a lo largo de todos los muros exteriores, por lo que fue necesario llevar a cabo el procedimiento establecido en el ASHRAE 1365 RP (Lawton et al., 2011), para determinar el aumento de la transmitancia térmica en los muros debido a los puentes térmicos, valor que aumento en un 29% (ver capítulo 4.5).

Los resultados, muestran una demanda de climatización que llega a un total 39,89 (kWh/m² x año), siendo considerablemente mayor las necesidades de refrigeración (36,44 kWh/m² x año), que las de calefacción (3,45 kWh/m² x año). Estos resultados, son coherentes con los trabajos existentes en la literatura (Bustamante et al., 2011; Pino et al., 2010) para diseños y climas similares al estudio actual.

En cuanto a las ganancias de calor, se observa que las mayores ganancias se deben a la ganancia solar por los acristalamientos exteriores (ver Figura 5.1.2 *Ganancias internas*), se asocia esta elevada ganancia de energía, debido al elevado porcentaje de ventanas (49%); tipo de vidrio (ver Tabla 5.2.1 *Propiedades térmicas y ópticas de los vidrios*); y condiciones climáticas exteriores, como, radiación solar incidente al lugar que se encuentra el edificio (ver Anexo 7.4 (Sepúlveda, 2003)). Todas están variables, trabajan sinérgicamente aportando una significativa ganancia de calor, lo que favorece al clima interior durante invierno, mas no así en verano.

Por otro lado, las pérdidas de calor provienen de diferentes fuentes, las primeras hacen relación con la elevada transmitancia de los acristalamientos y muros (ver Anexo 7.2), por los cuales se perdería la mayor cantidad de calor (ver Figura 5.1.4 *Pérdidas y ganancias a través de los cerramientos*). Esta característica es interesante, ya que, si bien esta pérdida de calor través de los acristalamientos y muros es beneficiosa durante verano debido a la alta ganancia solar, no lo es durante invierno, ya que disminuye la ganancia solar (ver Figura 5.1.3 *Ganancias internas y solares mensuales*) debido a la disminución de la radiación solar (ver Anexo 7.4 (Sepúlveda, 2003)), por lo que se necesita una mayor cantidad de energía para calefacción durante este periodo (ver figura 5.1.5 *Demanda de calefacción*). En este sentido, es relevante tomar en consideración la tercera mayor pérdida de calor: la infiltración; y en menor medida la ventilación exterior (ver Figura 5.1.4), ya que, tal como demostró Bustamante (Bustamante et al., 2011), la ventilación nocturna es una efectiva medida para disminuir la demandas de refrigeración durante el periodo estival, siendo una alternativa a considerar en estudios posteriores, con el fin de alcanzar un edificio de consumo energético casi nulo. Dicho esto, y dado que este trabajo está orientado a ver el potencial de mejora que tendrían las reformas de carácter pasiva en la materialidad de la envolvente, las estrategias a evaluar, fueron: la incorporación de vidrios con características de control solar, con el propósito de disminuir las demandas de refrigeración en la temporada estival; y, la aislación de acristalamientos y muros, para evitar pérdidas durante la temporada invernal. Se menciona esto, porque el hecho de intentar disminuir la demanda de refrigeración manera aislada, puede conllevar al aumento de la demanda de calefacción o viceversa. Por esto, si bien era posible reducir en mayor medida la demanda de refrigeración proponiendo reformas únicamente para esta necesidad, se optó por disminuir ambas, dejando un potencial de mejora a las necesidades de refrigeración mediante otras técnicas.

Proposición y evaluación de reformas en la materialidad de la envolvente.

Se definieron 9 escenarios, modificando en cada uno de ellos, los materiales constructivos de la envolvente, con el fin de evaluar su efecto en la demanda de climatización con respecto al escenario sin reformas. Cada una de las reformas propuestas, fue motivada por los resultados obtenidos en el objetivo específico número uno (*ver capítulo 5.1*) de este trabajo y por estudios similares (*ver capítulo 3.6*), destinados a reducir la demanda de climatización.

A través de los resultados, se aprecia que en el Escenario 09 la demanda de refrigeración cae notablemente al modificar los vidrios de la envolvente. Los vidrios con características de control solar, reducen notablemente las ganancias a través de las ventanas exteriores, dejándolas por debajo del 10% de su valor inicial (*ver figura 5.3.11 Comparación de ganancias solares por año*), siendo una efectiva reforma para disminuir la demanda de refrigeración en más de un 45 % (*ver tabla 5.3.9*).

Por otro lado, la demanda de calefacción se redujo significativamente al enfocarse en los acristalamientos y muros, ya que, como se mencionó anteriormente (*ver capítulo 5.1*) a través de estos, se apreciaban las mayores pérdidas de calor. La incorporación de un mortero de vermiculita de espesor 84 mm, redujo en aproximadamente 2 (W/m²K) la transmitancia térmica de los muros exteriores, lo que significó una disminución en las pérdidas a través de estos, del 55% (*ver figura 5.3.13*). En cuanto a la incorporación de doble vidriado hermetico, junto a las características que poseen los vidrios de baja emisividad (Low-E), para mejorar el aislamiento térmico, el valor U de estos elementos se reduce en casi 4 (W/m²K), lo que conlleva a una baja en las pérdidas de calor a través de los acristalamientos del 75% (*ver figura 5.3.13*). En conjunto, las reformas de aislamiento alcanzan una reducción de la calefacción del 47% (*ver tabla 5.3.9*), en base al escenario sin reformas.

Se hace un punto a parte en relación a lo mencionado, ya que, los vidrios reflectivos, significaron una importante disminución en la demanda de refrigeración, debido, a que estos poseen la capacidad de filtrar y/o reflejar ciertas longitudes de onda del espectro visible, lo que además de disminuir las necesidades de refrigeración, disminuyen el paso de la luz natural proveniente del sol. Por esto, se hace necesario ser cuidadoso al momento realizar este tipo de reformas, porque si bien, un vidrio con estas propiedades, puede proceder a mejorar el desempeño térmico, podría mermar el confort lumínico que debe existir en un edificio, en el que se realizan actividades académicas. Fue por esto, que no se establecieron escenarios en los cuales existiera un doble vidriado reflectivo.

Se concluye del objetivo específico número 2, que, en general, todas las reformas propuestas producen reducciones en las respectivas demandas a las que están dirigidas. Pero, en algunos escenarios, estas reformas conllevan significativas alzas en la demanda complementaria. Por esto, es necesario conocer los alcances de reducción y aumento de cada una de las reformas. Lo que, a través de la simulación, fue posible esclarecer, obteniendo de esta manera un escenario en el que disminuyeron simultáneamente ambas demandas (Escenario 09), entre las múltiples opciones propuestas.

Evaluar la influencia de la materialidad de la envolvente, en la demanda termo-energética de la Facultad de Ingeniería de la Universidad de Valparaíso ubicado en General Cruz 222.

El objetivo general de esta investigación, consistió en evaluar la influencia de la materialidad de la envolvente, en la demanda termo-energética de la Universidad de Valparaíso, para esto, en primera instancia, este trabajo estuvo orientado a conocer los aspectos termodinámicos que modelan la transferencia de calor en el espacio y a través de la materia. Con el objetivo de conocer como las distintas propiedades físicas de los materiales, permiten o bloquean el paso del calor. De esta manera, fue posible comprender las transferencias de energía que se presentan entre el ambiente exterior y los recintos interiores del edificio, ya que entre ellos siempre existirá una tendencia al equilibrio térmico, donde el ambiente con mayor temperatura transmitirá la energía hacia el otro, siendo la envolvente la encargada de impedir dicha transferencia.

A continuación, se estudiaron publicaciones relacionadas con el estudio presente, las cuales dieron luces sobre la influencia de la materialidad en la demanda de climatización necesaria por distintos tipos de edificaciones, orientadas al sector público o habitacional. En ellas se comprobó que en lugares donde existe una elevada radiación solar, y la envolvente del edificio posee un alto porcentaje de superficies vidriadas, se necesitara de una alta demanda de refrigeración, que compense las elevadas ganancias solares. Por ello, los autores recomiendan diversas estrategias para contrarrestar este escenario, de las cuales, se rescató la modificación en el tipo de vidriado para ventanas. En otra arista, y debido a que ciertas zonas geográficas presentan altos niveles de radiación solar durante verano, mas no así en invierno, los autores recomiendan la incorporación de materiales aislante en las superficies opacas de la envolvente, para evitar pérdidas de calor durante la temporada de invernial, la cual también fue considerada.

En relación a las investigaciones señaladas, y a los resultados mencionados en las conclusiones anteriores, se propuso la incorporación de un conjunto de doble vidriado hermético, compuesto en su capa externa por un vidrio de tipo reflectivo, una cámara de aire de espesor 12mm., y un vidrio tipo Low – E en su capa más interna; y, además, la aplicación de un mortero de vermiculita de espesor 84mm en la cara exterior de los muros de la envolvente. Las simulaciones correspondientes al escenario sin reformas y al Escenario 09, que comprende las modificaciones mencionadas, muestran una reducción de la demanda total del 45% a favor del Escenario 09. Por lo cual, se concluye que la materialidad de la envolvente para el caso estudiado, tiene una gran influencia en el total de la demanda de climatización, de lo cual es posible beneficiarse, para mejorar el rendimiento energético del edificio, aumentar el confort de los espacios interiores, y disminuir las emisiones de dióxido de carbono, producto de la energía necesaria para su operación.

Se señala además que el objetivo de este trabajo, no pudo haberse logrado sin la utilización de una simulación energética, ya que como se mencionó anteriormente, es un método más conveniente que una simulación de laboratorio. De esta manera fue posible analizar el escenario actual del edificio, conociendo las pérdidas y ganancias de calor, los elementos por los cuales suceden estas fluctuaciones, y su magnitud, siendo esta última, vital para poder dar propuestas de reforma al edificio. Si bien es cierto que actualmente existe una gran difusión con respecto a los valores límites de transmitancia térmica que exige la reglamentación vigente, también lo es el hecho de que cada edificio es un escenario distinto, lo cual amerita el estudio particular de cada caso, ya que cada variable de materialidad y/o diseño, causara diferentes influencias en la demanda total.

Propuestas de investigaciones futuras

Las transferencias de energía entre un edificio y el ambiente que lo rodea depende de múltiples factores, que, a su vez, afectan a diferentes características del ambiente interior, siendo prácticamente imposible aislar el efecto de cualquier factor contribuyente en solo una característica del ambiente interior. En relación a esto, y en base al trabajo realizado en esta investigación, se propone como tema de investigación futura, encontrar la razón óptima entre ganancia solar y confort lumínico, por el hecho de que determinadas longitudes de onda de la radiación solar aportan calor y luz visible, o solamente calor. Es en este aspecto donde es posible aumentar el beneficio energético del edificio, debido su alto porcentaje de ventanas.

Por otro lado, tomando en cuenta los resultados de la simulación e investigaciones relacionadas, es posible reducir aún más la demanda térmica de refrigeración, aumentando los caudales de aire que se mueven en el edificio. Por esto, se plantea como investigación futura relacionada, la proposición y evaluación de técnicas de ventilación en el edificio, estableciendo caudales y periodos de ejecución, que promuevan esencialmente la disminución de la demanda de refrigeración.

Ciertamente, un edificio continuamente se verá afectado por cambios en clima exterior, debiendo ser capaz de adaptarse rápida y eficazmente. Por esto, con el propósito de asegurar las condiciones de confort dentro del edificio, es necesario utilizar sistemas de climatización que puedan ser capaces de sobrellevar estos cambios, en la medida que el edificio lo requiera. Actualmente existe una fuerte tendencia hacia las energías renovables y construcciones energéticamente autosustentables, por esto, una investigación dirigida a la implementación de sistemas de climatización de tipo activa, que no contribuyan en un aumento neto de energía (produciendo la energía necesaria para su utilización), es de total importancia ante el escenario actual.

7. Anexos

7.1. Definición material

El siguiente anexo recopila la información necesaria para calcular la transmitancia térmica mediante la norma chilena NCh853 Of.2007 (INN, 2007) "Acondicionamiento térmico - Envoltente térmica de edificios - Cálculo de resistencias y transmitancias térmicas".

La conductividad térmica (λ), mide la capacidad de los materiales para conducir calor cuando existe una diferencia de temperatura en sus caras, se mide en ($W / m \times K$) y mientras más bajo sea su valor, el material es más aislante. Estos valores son extraídos del anexo A de la norma anteriormente mencionada.

Material	Conductividad térmica λ [W/(m*K)]
Acero y Fundición	58
Aire quieto a 0°C	0,024
Adobe	0,9
Agua líquida a 0°C	0,59
Aluminio	210
Lana mineral	0,037-0,042
Hormigón celular sin áridos	0,09
Hormigón armado (normal)	1,63
Ladrillo a maquina	0,46-1,0
Mortero de Cemento	1,4
Madera	0,091-0,28
Poliestireno expandido	0,0361-0,043
Poliuretano expandido	0,0250-0,0274
Vidrio	1,2

Tabla 7.1.1 Conductividad térmica de materiales de construcción

Fuente: Anexo A, NCh853: Of.2007

7.2. Definición de la transmitancia térmica

El siguiente anexo, tiene como fin, establecer la transmitancia térmica en los elementos de la envolvente:

Para elementos simples y homogéneos de caras planas y paralelas con un espesor e , la resistencia térmica total se da por medio de la siguiente ecuación:

$$R_T = \frac{1}{U} = R_{si} + \frac{e}{\lambda} + R_{se}$$

Ecuación 7.2.1 Resistencia térmica en elementos simples.

Fuente: NCh853: Of.2007

Donde:

- Rt = resistencia térmica total;
- e/λ = resistencia térmica del material;
- Rsi = resistencia térmica de superficie interior;
- Rse = resistencia térmica de superficie exterior.
- U = Transmitancia térmica.

Para elementos compuestos conformados por varias capas homogéneas de diferentes materiales en contacto entre sí, la resistencia térmica total, queda establecida por la formula siguiente:

$$R_T = \frac{1}{U} = R_{si} + \sum \frac{e}{\lambda} + R_{se}$$

Ecuación 7.2.2 Resistencia térmica total por un elemento conformado por varias capas.

Fuente: NCh853: Of.2007

Donde:

- Rt = resistencia térmica total;
- $\sum e/\lambda$ = Sumatoria de las resistencias térmicas de las capas que conforman el elemento;

- e/λ = resistencia térmica del material;
 R_{si} = resistencia térmica de superficie interior;
 R_{se} = resistencia térmica de superficie exterior.
 U = Transmitancia térmica.

La resistencia térmica de superficie interior (R_{si}), y exterior (R_{se}) se obtienen mediante la tabla 2 de la norma chilena NCh853: Of.2007, considerando el sentido del flujo de calor, la posición del elemento separador y la velocidad del viento.

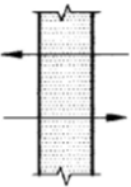
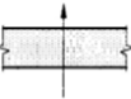

Posición del elemento y sentido del flujo de calor		Situación del elemento					
		De separación con espacio exterior o local abierto			De separación con otro local, desván o cámara de aire		
		R_{si}	R_{se}	$R_{si} + R_{se}$	R_{si}	R_{se}	$R_{si} + R_{se}$
Flujo horizontal en elementos verticales o con pendiente mayor que 60° respecto a la horizontal		0,12	0,05	0,17	0,12	0,12	0,24
Flujo ascendente en elementos horizontales o con pendiente menor o igual que 60° respecto a la horizontal		0,09	0,05	0,14	0,10	0,10	0,20
Flujo descendente en elementos horizontales o con pendiente menor o igual que 60° respecto a la horizontal		0,17	0,05	0,22	0,17	0,17	0,34

Tabla 7.2.1 Resistencias térmicas de superficie en $m^2 \times KW$.

Fuente: NCh853: Of.2007

En elementos con heterogeneidades la norma NCh853: Of.2007 establece un método de cálculo de la transmitancia térmica media de un elemento con estas características, la ecuación que se presenta a continuación establece el método de cálculo:

$$\bar{U} = \frac{1}{R_T} = \frac{\sum U_i \times A_i}{\sum A_i}$$

Ecuación 7.2.3 Transmitancia térmica media de una superficie compuesta.

Fuente: NCh853: Of.2007

Donde:

- R_t = resistencia térmica total;
- A_i = superficie del elemento que posee una transmitancia térmica U_i;
- U_i = Transmitancia térmica del elemento en la superficie A_i.

Para la determinación de las transmitancias térmicas de los cerramientos exteriores, debido a que estos presentan una configuración heterogénea, el cálculo se realiza en base a la ecuación de la figura 7.2.3. En la figura siguiente se resaltan los cerramientos exteriores del primer piso del edificio.

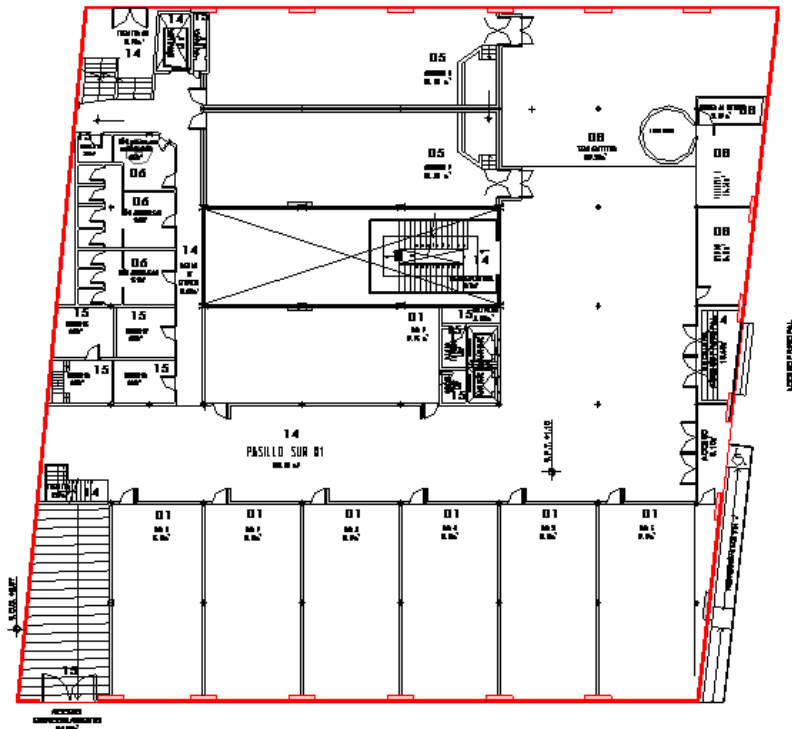


Figura 7.2.1 Plano del primer nivel del edificio en estudio de la Universidad de Valparaíso.

Fuente: Elaboración propia en base a los planos de la UPFYCU.

Estos cerramientos están compuestos de muros de albañilería confinados por vigas de acero metálicas tipo canal en las zonas de albañilería se considera una capa de mortero de cemento como terminación. La configuración de la albañilería existente en los muros perimetrales está compuesta por ladrillos macizos de 28 x 14,3 x 7,1 cm y por uniones de mortero de cemento de aproximadamente 2 cm de espesor, tal como se muestra en las figuras siguientes:

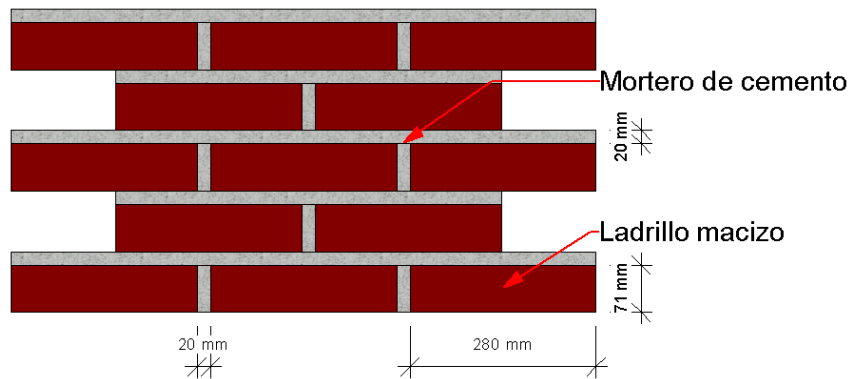


Figura 7.2.2 Configuración de los muros perimetrales de albañilería.

Fuente: Elaboración propia.

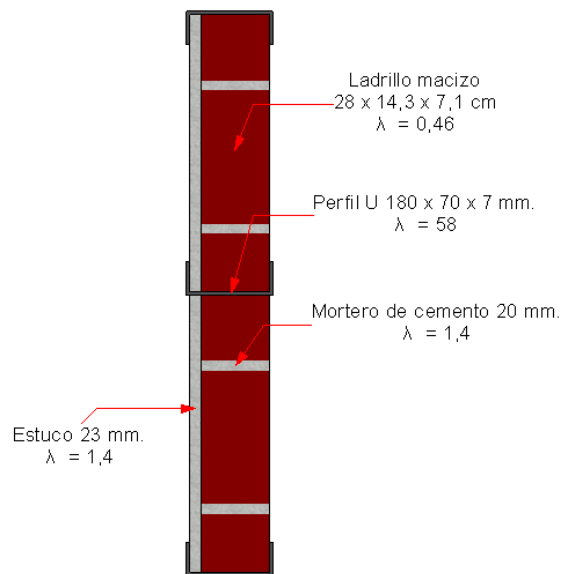


Figura 7.2.3 Configuración de la albañilería con los refuerzos metálicos.

Fuente: Elaboración propia.

La transmitancia térmica media de este elemento se establece por la fórmula especificada en la norma NCh853: Of.2007, el valor de la conductividad térmica del ladrillo que se utilizó para efectos de cálculo es el de 0,46 W/(m x K) correspondiente a un ladrillo macizo hecho a máquina de densidad aparente 1000 Kg/m³, y un valor λ de 1,4 W/(m x K) para mortero de cemento. La albañilería está enmarcada en perfiles de acero de 180x7x7 mm, el espacio restante entre la

albañilería y el perfil, está relleno de estuco. A continuación, se muestra la adaptación de la ecuación 7.2.3, para el cerramiento estudiado.

$$\bar{U} = \frac{U \text{ ladrillo} \times A \text{ ladrillo} + U \text{ mortero} \times A \text{ mortero}}{A \text{ ladrillo} + A \text{ mortero}}$$

Resistencia termica	Valor	Unidad
Rt Ladrillo	0,311	(m ² K/W)
Rt Mortero	0,102	(m ² K/W)
Rt Estuco	0,016	(m ² K/W)
Rt Ladrillo + Estuco	0,327	(m ² K/W)
Rt Mortero + Estuco	0,119	(m ² K/W)
Rsi	0,120	(m ² K/W)
Rse	0,050	(m ² K/W)
Rsi + Rse	0,170	(m ² K/W)

Transmitancia térmica	Valor	Unidad
U Ladrillo + Estuco	2,011	(W/m ² K)
U Mortero + Estuco	3,465	(W/m ² K)
U total ponderado=	2,4062	(W/m²K)

Material	Conductividad termica	Unidad
λ Ladrillo	0,460	[(W/ (mK))]
λ Mortero	1,400	[(W/ (mK))]
λ Estuco	1,400	[(W/ (mK))]

Dimensión	Valor	Unidad
Largo ladrillo	0,28	(m)
Alto ladrillo	0,071	(m)
Espesor mortero	0,02	(m)
Ancho mortero	0,143	(m)
Ancho ladrillo	0,143	(m)
Espesor estuco	0,023	(m)
Área ladrillo	0,020	(m ²)
Área mortero	0,007	(m ²)

Tabla 7.2.2 Transmitancia térmica ponderada de los cerramientos exteriores.

Fuente: Elaboración propia.

Por medio de los cálculos se obtuvo un valor ponderado de 2,4062 (W/m²K) para el conjunto de albañilería más estuco de los cerramientos exteriores. Como método adicional de cálculo se realizó una simulación de la transmitancia térmica del conjunto mediante el software THERM el cual es un software especializado para el cálculo de transmitancia y simulación de puentes térmicos, con el cual se comprobó el resultado.

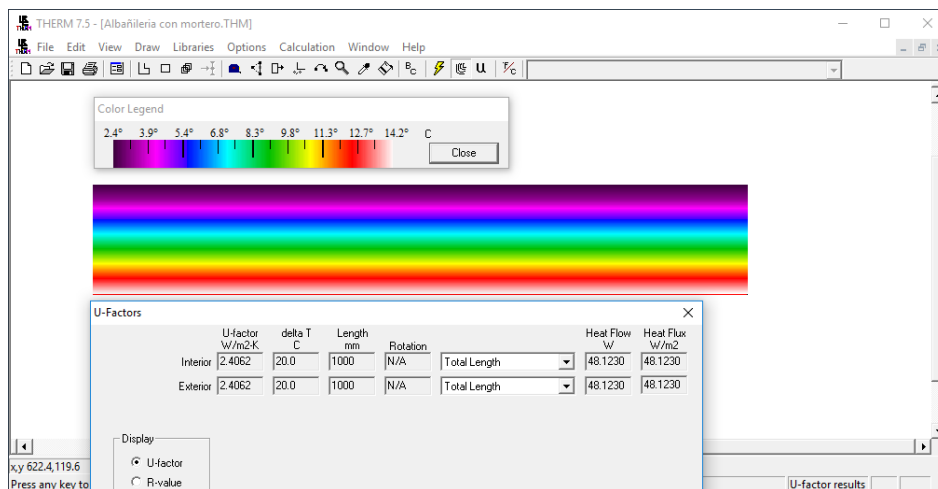


Figura 7.2.4 Cálculo de transmitancia mediante THERM.

Fuente: Elaboración propia.

Como información adicional a los cálculos realizados, por medio de la revisión del Listado Oficial de Soluciones Constructivas para Acondicionamiento Térmico del Ministerio de Vivienda y Urbanismo, se tienen los valores que entrega el organismo citado, como referencia para este tipo de cerramiento (Figura 7.2.3). En este es posible encontrar una solución constructiva de similares características, la cual posee un valor de transmitancia de 2,48 (W/m²K), siendo muy cercano al obtenido por los cálculos. Los valores difieren, ya que en el listado algunas de las dimensiones varían en relación a las que presenta el edificio en estudio.

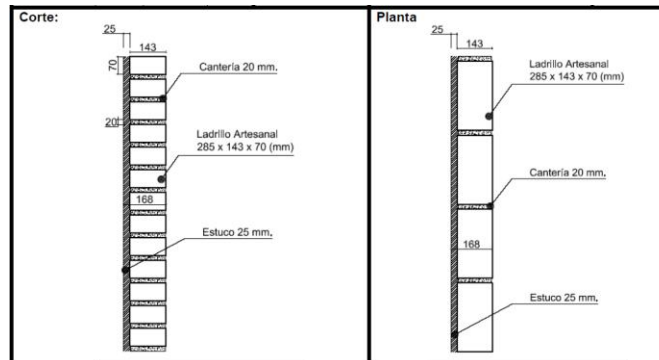


Figura 7.2.5 Solución constructiva en base a ladrillo artesanal y estuco en una cara.

Fuente: Listado Oficial de Soluciones Constructivas para Acondicionamiento Térmico del Ministerio de Vivienda y Urbanismo.

Al igual que en el capítulo 4.5 (*Definición de la transmitancia térmica en elementos con puentes térmicos*), se calculará la transmitancia térmica con el efecto de los puentes térmicos, pero esta vez ocupando los valores indicados en la NCh853: Of.2007 (INN, 2007), para posteriormente compararlos con los valores límites establecidos por la Nch 1079 Of. 2008 y el TDRé (CITECUBB, 2012).

Transmitancia Térmica Lineal	
Q(1) =	54,86 (W)
Q(0) =	48,12 (W)
Δ =	20,00 (°C)
L =	1,00 (m)
Ψ =	0,34 (W/m x K)

Tabla 7.2.3 Transmitancia térmica lineal provocada por el puente térmico.

Fuente: Elaboración propia.

Para un metro cuadrado de cerramiento se tiene que el aumento de transferencia de calor por cada metro es de 0,3370 W/K. Entonces la transmitancia térmica para un elemento de un metro cuadrado donde se presenta un puente térmico de un metro de longitud es de:

Transmitancia Térmica Total		
$\Psi =$	0,34	(W/m x K)
L =	1	(m)
A total =	1,00	(m ²)
U(0) =	2,41	(W/m ² K)
U total=	2,74	(W/m²K)

Tabla 7.2.4 Transmitancia térmica total para un metro cuadrado de cerramiento con presencia de un puente térmico.

Fuente: Elaboración propia.

Este valor se corrobora mediante la simulación realizada:

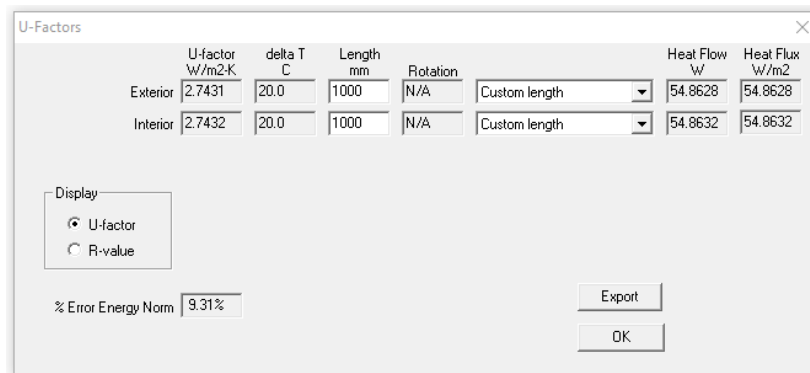


Figura 7.2.6 Transmitancia térmica del cerramiento con el efecto del puente térmico.

Fuente: Elaboración propia.

Transmitancia Térmica Total		
$\Psi =$	0,34	(W/m x K)
L =	3292,59	(m)
A total =	1243,28	(m ²)
U(0) =	2,41	(W/m ² K)
U total=	3,31	(W/m²K)

Tabla 7.2.5 Transmitancia térmica incorporando el aumento por puentes térmicos.

Fuente: Elaboración propia.

Cálculo de transmitancia por las ventanas

$$U_{Ventana} = \frac{U_{vidrio} \times A_{vidrio} + U_{marco} \times A_{marco}}{A_{vidrio} + A_{marco}}$$

Transmitancia a través del vidrio				
	Espesor (m)	Conductividad	Rt	Unidad
Rse	-	-	0,05	(m²K/W)
Vidrio	0,006	1	0,006	(m²K/W)
Rsi	-	-	0,12	(m²K/W)
Total			0,176	(m²K/W)
U			5,682	(W/m²K)

Tabla 7.2.6 Transmitancia a través de los vidrios.

Fuente: Elaboración Propia.

Según lo establecido en el Manual de procedimientos calificación energética de viviendas en Chile (MINVU, 2018) el valor U del marco, corresponde a un marco no macizo, este valor puede ser extraído de la siguiente tabla:

Marco	U (W/m²K)
Metal sin RPT	5,8
Al con RPT	3,3
PVC	2,8
Madera	2,6

Tabla 7.2.7 Valor U para marcos de ventana no macizos.

Fuente: Manual de procedimientos calificación energética de viviendas en Chile (MINVU, 2018).

$$\bar{U} = \frac{5,68 \times 10,70 + 5,8 \times 2,8}{13,5}$$

$$\bar{U} = 5,71 \text{ (W/m}^2\text{K)}$$

El cálculo anterior corresponde a la ventana de mayor dimensión de la fachada oriente, en esta, la transmitancia térmica es de 5,71 (W/m²K). El valor de la conductividad térmica del vidrio corresponde a un vidrio corriente claro de 6 mm, la fuente de este valor es el IGDB.

Cálculo de transmitancia en tabiques interiores



Figura 7.2.7 Corte tabique interior.

Fuente: Unidad de Planta Física y Construcciones Universitarias – Universidad de Valparaíso.

Los tabiques interiores están formados por doble Volcanita de 10 (mm), lana mineral de 50 (mm). y perfiles de Metalcon 40CA085. Por efectos prácticos se desprecia la conductividad térmica de los perfiles de Metalcon dado que tienen un espesor de 0,85 mm separados cada 40 cm. y la norma NCh853: Of.91, señala las láminas delgadas con un espesor inferior a 3 mm ofrecen una resistencia térmica tan pequeña que no deben considerarse en los cálculos prácticos. No obstante, puede aumentarse la resistencia de la cámara de aire confinada por ellos, en este caso para acero galvanizado brillante la resistencia por cámara de aire aumenta al actuar por reflexión por ser una cámara brillante, en este caso se toma el $\epsilon = 0,2$. Por contar con cámara de aire se le debe sumar el factor R_g , correspondiente a la resistencia térmica de una cámara de aire no ventilada. Este valor se establece considerando el espesor de la cámara y le emisividad del elemento que la contiene, y el sentido del flujo térmico, utilizando la siguiente tabla:

Espesor de la cámara, mm	Emisividad total, E			
	0,82	0,20	0,11	0,05
	Resistencia térmica, R_g , $m^2 \times K/W$			
5	0,105	0,17	0,20	0,20
10	0,140	0,28	0,32	0,38
15	0,155	0,35	0,43	0,51
20	0,165	0,37	0,46	0,55
25	0,165	0,37	0,46	0,55
30	0,165	0,37	0,46	0,55
35	0,165	0,37	0,46	0,55
$e \geq 40$	0,165	0,37	0,46	0,55

Tabla 7.2.8 Resistencia térmica producto de la cámara de aire para flujos horizontales.

Fuente: NCh853: Of.2007.

El valor de conductividad de la Volcanita utilizado, es el entregado por el fabricante para Volcanita ST de 10 (mm), y lana mineral (colchoneta libre), densidad aparente 40 kg/m³ (Anexo A, NCh853: Of.2007), espesor cámara de aire = (42 mm), en este caso se consideran 2 cámaras de 21 (mm), con E= 0,2 (según norma), el cálculo queda expresado según la siguiente tabla:

Transmitancia térmica en tabiques interiores				
	Espesor (m)	Conductividad	Rt	Unidad
Rse	-	-	0,12	(m ² K/W)
Volcanita	0,04	0,19	0,21	(m ² K/W)
Lana Mineral	0,05	0,042	1,19	(m ² K/W)
Rg	-	-	0,74	(m ² K/W)
Rsi	-	-	0,12	(m ² K/W)
Total			2,38	(m ² K/W)
U			0,42	(W/m²K)

Tabla 7.2.9. Transmitancia térmica en tabiques interiores.

Fuente: Elaboración Propia.

Es necesario señalar que las particiones interiores que tiene las mismas condiciones interiores pueden ser consideradas como adiabáticas, esto tomando como referencia el Manual CEV y el estudio realizado por Kovac & Kovacova (2015).

Cálculo de transmitancia en la techumbre.

Para el complejo de techumbre se establece una configuración de un panel tipo sándwich con núcleo de 9 cm, forrado con 2 placas de madera aglomerada de 5 mm cada, cámara de aire de 18 cm, y plancha Zinalum 5V de 0,5 mm. La conductividad térmica del poliestireno expandido corresponde a una densidad de 10 kg/m³, para madera aglomerada se considera una densidad de 650 kg/m³, se desprecia la resistencia térmica de la plancha de Zinalum producto de su bajo espesor. La emisividad total de la cámara de aire es de 0,2 según NCh853: Of.2007, el valor de la resistencia térmica producto de la cámara de aire se obtiene de la siguiente tabla:

Espesor de la cámara, mm	Emisividad total, E			
	0,82	0,20	0,11	0,05
Resistencia térmica, R_g , m ² x K/W				
5	0,10	0,16	0,17	0,19
10	0,13	0,23	0,26	0,29
15	0,13	0,25	0,29	0,32
20	0,14	0,25	0,29	0,33
30	0,14	0,26	0,31	0,35
40	0,14	0,27	0,32	0,36
50	0,14	0,28	0,33	0,37
60	0,14	0,28	0,34	0,38
70	0,14	0,29	0,34	0,39
80	0,15	0,30	0,35	0,40
90	0,15	0,30	0,35	0,40
e ≥ 100	0,15	0,30	0,35	0,40

Tabla 7.2.10 Resistencias térmicas para cámaras de aire no ventiladas horizontales con flujo térmico ascendente.

Fuente: NCh853: Of.2007.

Transmitancia térmica de la techumbre				
	Espesor (m)	Conductividad	Rt	Unidad
Rse	-	-	0,12	(m ² K/W)
Rg	-	-	0,3	(m ² K/W)
Madera Aglomerada	0,005	0,106	0,05	(m ² K/W)
Poliestereno Exp.	0,09	0,043	2,09	(m ² K/W)
Madera Aglomerada	0,005	0,106	0,05	(m ² K/W)
Rsi	-	-	0,12	(m ² K/W)
Total			2,73	(m ² K/W)
U			0,37	(W/m²K)

Tabla 7.2.11 Transmitancia térmica de la techumbre.

Fuente: Elaboración Propia.

Cálculo de transmitancia en suelos en contacto con el terreno

El cálculo para la transmitancia térmica de pisos en contacto con el terreno se realizará en base a lo establecido en el CTE DA-DB-HE 1, suelos en contacto con el terreno Caso 2, la conductividad térmica del hormigón utilizada será la correspondiente a un hormigón con áridos ligeros de densidad 1400 kg/m³, el radier existente es de 10 cm de espesor, se deben despreciar las resistencias superficiales según lo indicado en el documento.

Resistencia térmica del suelo				
	Espesor (m)	Conductividad	Rt	Unidad
Radier	0,1	0,55	0,182	(m ² K/W)
Total	0,18			(m²K/W)

Tabla 7.2.12 Resistencia térmica del suelo.

Fuente: Elaboración Propia.

$$B' = \frac{A}{\frac{1}{2}P}$$

Ecuación 7.2.4 Longitud Característica B'

Fuente: Fuente: DA DB-HE / 1, CTE.

Donde:

P = longitud del perímetro expuesto de la solera (m);

A = área de la solera (m²)

Longitud característica		
Área	1555,11	m ²
Perímetro	158,16	m
B'	19,67	-

Tabla 7.2.13 Longitud característica

Fuente: Elaboración Propia.

Ahora con estos valores es posible determinar la transmitancia térmica del suelo enterrado en función de la profundidad (3,72 m.), longitud característica y resistencia térmica del elemento constructivo. Para los valores intermedios el documento especifica que deben interpolarse los valores (ver tabla 7.2.14), por lo cual la transmitancia térmica del suelo en el caso estudiado tiene un valor de **0.158** (W/m²K).

Tabla 4 Transmitancia térmica U_s en W/m²K

B'	0,5 m < z ≤ 1,0 m				1,0 m < z ≤ 2,0 m				2,0 m < z ≤ 3,0 m				z > 3,0 m			
	Rf (m ² ·K/W)				Rf (m ² ·K/W)				Rf (m ² ·K/W)				Rf (m ² ·K/W)			
	0,00	0,50	1,00	1,50	0,00	0,50	1,00	1,50	0,00	0,50	1,00	1,50	0,00	0,50	1,00	1,50
1	1,51	1,07	0,84	0,69	1,14	0,88	0,72	0,61	0,78	0,65	0,56	0,49	0,59	0,51	0,46	0,41
2	1,09	0,82	0,67	0,57	0,87	0,70	0,59	0,51	0,63	0,54	0,47	0,42	0,50	0,44	0,40	0,36
3	0,87	0,68	0,57	0,49	0,71	0,59	0,50	0,44	0,53	0,47	0,41	0,37	0,43	0,39	0,35	0,32
4	0,74	0,59	0,49	0,43	0,61	0,51	0,44	0,39	0,47	0,41	0,37	0,34	0,39	0,35	0,32	0,29
5	0,64	0,52	0,44	0,39	0,54	0,45	0,40	0,36	0,42	0,37	0,34	0,31	0,35	0,32	0,29	0,27
6	0,57	0,46	0,40	0,35	0,48	0,41	0,36	0,33	0,38	0,34	0,31	0,28	0,32	0,29	0,27	0,25
7	0,52	0,42	0,37	0,33	0,44	0,38	0,33	0,30	0,35	0,31	0,29	0,26	0,30	0,27	0,25	0,24
8	0,47	0,39	0,34	0,30	0,40	0,35	0,31	0,28	0,33	0,29	0,27	0,25	0,28	0,26	0,24	0,22
9	0,43	0,36	0,32	0,28	0,37	0,32	0,29	0,26	0,30	0,27	0,25	0,23	0,26	0,24	0,22	0,21
10	0,40	0,34	0,30	0,27	0,35	0,30	0,27	0,25	0,29	0,26	0,24	0,22	0,25	0,23	0,21	0,20
12	0,36	0,30	0,27	0,24	0,31	0,27	0,24	0,22	0,26	0,23	0,21	0,20	0,22	0,21	0,19	0,18
14	0,32	0,27	0,24	0,22	0,28	0,25	0,22	0,20	0,23	0,21	0,20	0,18	0,20	0,19	0,18	0,17
16	0,29	0,25	0,22	0,20	0,25	0,23	0,20	0,19	0,21	0,20	0,18	0,17	0,19	0,17	0,16	0,16
18	0,26	0,23	0,20	0,19	0,23	0,21	0,19	0,18	0,20	0,18	0,17	0,16	0,17	0,16	0,15	0,15
≥20	0,24	0,21	0,19	0,17	0,22	0,19	0,18	0,16	0,18	0,17	0,16	0,15	0,16	0,15	0,14	0,14

Tabla 7.2.14 Transmitancia térmica para suelos enterrados.

Fuente: DA DB-HE / 1, CTE.

Cálculo de transmitancia en losas de entre piso

Las losas de entre piso están configuradas en albañilería cubierta con mortero de cemento la cual tiene un espesor de 50 cm. La conductividad térmica de la albañilería se calculó mediante la fórmula de la transmitancia térmica media de la figura 3.3.2, despejando la conductividad para esta solución constructiva, mediante la fórmula de resistencia térmica.

Transmitancia térmica en losa de entrepiso				
	Espesor (m)	Conductividad	Rt	Unidad
Rsi	-	-	0,1	(m ² K/W)
Mortero	0,35	1,4	0,25	(m ² K/W)
Albañilería	0,15	0,953	0,16	(m ² K/W)
Rsi	-	-	0,1	(m ² K/W)
Total			0,61	(m ² K/W)
U			1,65 (W/m²K)	

Tabla 7.2.15 Transmitancia térmica en losas de entrepiso.

Fuente: Elaboración Propia.

7.3. Análisis de los valores de transmitancia térmica

Los valores de transmitancia térmica (U) permiten determinar los flujos de calor asociados a una solución constructiva, mientras más bajo sea este valor, mayor aislación existirá entre los ambientes que separe. Es posible señalar que varias soluciones poseen bajos valores U, sin embargo, su influencia en la demanda total de energía, dependerá de la geometría, extensión, actividad que se desarrolle en la zona, etc. Por esto se hace necesario incorporar todos estos datos a un programa que permita evaluaciones globales de desempeño, que contenga todas las variables recopiladas, siendo el valor U de una determinada solución constructiva solo una más de ellas (Bobadilla et al., 2012).

De acuerdo a los valores obtenidos mediante los cálculos se procederá a verificar si estos están dentro de los límites recomendados por la NCh 1079 Of. 2008 (INN, 2008) y el TDRé (CITECUBB, 2012). Los valores límite serán los asociados a la ubicación del edificio estudiado (Valparaíso), perteneciente a la zona climática 4CL (Central litoral) según se muestra en la figura siguiente:

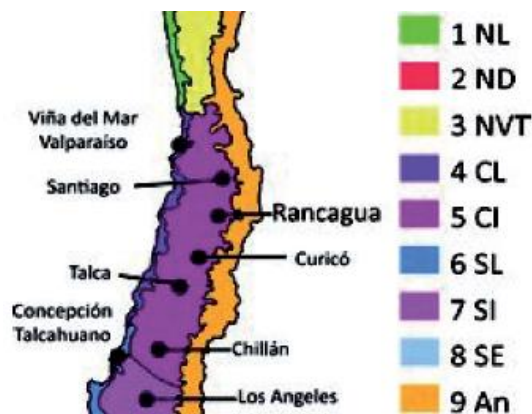


Figura 7.3.1 Zonificación Climática.

Fuente: TDRé (CITECUBB, 2012)

TRANSMITANCIA TERMICA (U) EN ELEMENTOS DE LA ENVOLVENTE			
Fuente	NCh 1079	TDRé	Calculado
Transmitancia Muros	0,8	2	3,31
Transmitancia Cubierta	0,6	0,8	0,37
Transmitancia Pisos en contacto con el terreno	-	2	0,16
Transmitancia elementos verticales vidriados	3	4,5	5,71

Tabla 7.3.1 Análisis de las transmitancias térmicas de los elementos de la envolvente.

Fuente: Elaboración propia.

De la tabla se concluye que los muros y los elementos vidriados de la envolvente son 2 parámetros que están fuera de los rangos de las referencias señaladas, es por esto que la opción de mejorar estos elementos mediante la propuesta de reformas, podría además de mejorar las condiciones térmicas, lograr que el edificio adquiriera estándares de eficiencia energética.

7.4. Sectorización climático-habitacional de la region de Valparaíso (Sepúlveda, 2003)

En el estudio realizado por Sepúlveda (2003), se desarrolla una sectorización climático-habitacional de la Región de Valparaíso, delimitando 7 sectores climáticos de esta región, para luego definir las variables climáticas que afectan en mayor medida a la calidad ambiental de las viviendas. A continuación, se muestra una tabla resumen de las variables climáticas y sus respectivos valores, para la ciudad de Valparaíso:

VARIABLES	UNIDAD	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC	ANUAL
T máx med	°C	23,5	22,9	21,4	19,3	17,3	15,8	15,2	15,3	16,6	18,7	21,0	22,8	19,2
T mín med	°C	12,9	12,6	11,6	10,4	9,1	8,2	7,9	7,8	8,5	9,7	11,2	12,4	10,2
Osc Térm	°C	10,6	10,3	9,8	8,9	8,2	7,6	7,3	7,5	8,1	9,0	9,8	10,4	9,2
T media	°C	17,4	17,0	15,8	14,2	12,6	11,5	11,0	11,0	12,0	13,6	15,4	16,8	14,0
Hrs. Frío	horas	0,0	0,0	0,0	1,0	11,0	33,0	45,0	48,0	24,0	4,0	0,0	0,0	166,0
R solar	Ly/día	529,0	505,0	438,0	347,0	257,0	190,0	166,0	190,0	257,0	348,0	438,0	505,0	348,0
Hum Relat	%	80,0	81,0	83,0	85,0	88,0	89,0	90,0	89,0	87,0	84,0	82,0	81,0	85,0
Precipitac.	Mm	5,0	5,3	8,1	19,1	65,8	78,2	65,4	54,8	23,7	14,1	8,5	6,0	354,0
Nº heladas	unidad	0,0	0,0	0,0	0,0	0,02	0,1	0,15	0,17	0,07	0,0	0,0	0,0	0,51

Figura 7.4.1 Valor promedio mensual y anual de las variables climáticas para la ciudad de Valparaíso.

Fuente: Sectorización climático-habitacional de las regiones de Valparaíso y Metropolitana (Sepúlveda, 2003)

Donde:

T máx med = promedio de temperaturas diarias máximas de cada mes;

T mín med = promedio de temperaturas diarias mínimas de cada Mes;

Osc Térm = oscilación térmica: diferencia entre T máx med y la T mín med;

Hrs. Frío = Horas de frío acumuladas con; base 7°C, es decir igual o menor a 7°C;

R solar = radiación solar expresada en unidades diarias de medición, denominadas langley.

H Relat = humedad relativa

Precip = precipitaciones

Nº heladas = número de heladas.

8. Bibliografía

- ARESFORMACIÓ. (2010). ¿Qué es la HUMEDAD RELATIVA?, ¿cómo varía con la temperatura del aire? Retrieved from <http://meteoares.blogspot.com/2010/09/que-es-la-humedad-relativa-como-varia.html>
- Ascione, F., Bianco, N., De Masi, R. F., Mauro, G. M., & Vanoli, G. P. (2017). Energy retrofit of educational buildings: Transient energy simulations, model calibration and multi-objective optimization towards nearly zero-energy performance. *Energy and Buildings*, 144, 303-319. doi:<https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2017.03.056>
- ASHRAE. (2016). Energy Standard for Buildings Except Low-Rise Residential Buildings. In *ANSI/ASHRAE/IESNA Standar 90.1*.
- ASHRAE. (2017). ASHRAE Handbook-Fundamentals. In.
- Baixas, J. (2012). ENVOLVENTES: LA PIEL DE LOS EDIFICIOS. *ARQ (Santiago)*, 98-101.
- Balter, J., Ganem, C., & Discoli, C. (2016). Ahorros en los consumos para enfriamiento de espacios interiores mediante la evaluación de sistemas de protección solar en edificios residenciales en altura. El caso de la "ciudad-oasis" de Mendoza, Argentina. 2016, 12.
- Bobadilla, A., Figueroa, R., Trebilcock, M., Diaz, M., Muñoz, C., Besser, D., . . . Sánchez, R. (2012). *Manual de Diseño Pasivo y Eficiencia Energética de Edificios Públicos*.
- Bustamante, W., De Herde, A., & Encinas, F. (2011). Análisis de comportamiento térmico de edificios de oficinas en comunas de la Región Metropolitana, Chile. *Revista de la construcción*, 10, 64-77.
- Bustamante, W., & Encinas, F. (2012). PARÁMETROS DE DISEÑO Y DESEMPEÑO ENERGÉTICO EN EDIFICIOS DE CLIMA MEDITERRÁNEO. *ARQ (Santiago)*, 116-119.
- Campusano, R. (2012). Síndrome del Edificio Enfermo. In (Sustentabit 12 ed., Vol. Marzo): Sustentabit.
- CChRYC. (2007). Reglamento de Instalaciones Térmicas en los Edificios en Chile, RITCh. In.
- CDT. (2016). Manual de (Re) Acondicionamiento Térmico. Concepción, Chile.
- Celis Damico, F., Garcia Alvarado, R., Trebilcock Kelly, M., Escorcía Oyola, O., Miotto Bruscato, U., & Diaz, M. (2012). Análisis energético de las viviendas del centro-sur de Chile. *Arquitecturarevista*, 8(1).
- Charisi, S. (2017). The Role of the Building Envelope in Achieving Nearly-zero Energy Buildings (nZEBs). *Procedia Environmental Sciences*, 38, 115-120. doi:<http://dx.doi.org/10.1016/j.proenv.2017.03.092>
- ChileGBC. (2012). Energía y Atmósfera. In *Documento de Análisis LEED* (Primera Edición ed.). Santiago de Chile: Chile Green Building Council.
- Cho, J., Yoo, C., & Kim, Y. (2014). Viability of exterior shading devices for high-rise residential buildings: Case study for cooling energy saving and economic feasibility analysis. *Energy and Buildings*, 82, 771-785. doi:<http://doi.org/10.1016/j.enbuild.2014.07.092>
- CIBSE. (2007). Guide A: Environmental Design. In C. I. o. B. Services & Engineers (Eds.), (7th ed.). London.
- CITECUBB, D. (2012). TDRé 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 Tipologías de Edificaciones*, 10.
- Crawley, D. B., Hand, J. W., Kummert, M., & Griffith, B. T. (2008). Contrasting the capabilities of building energy performance simulation programs. *Building and Environment*, 43(4), 661-673. doi:<https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2006.10.027>

- Cremers, J. (2005). *Sistemas aislantes al vacío Aplicaciones e indicaciones para su puesta en obra* Vacuum Insulation Systems – Possible Applications and Design Considerations [spanish].
- Córdova, J. J. (2013). Protecciones solares y su implicancia en la demanda energética: caso edificio público en Concepción, Chile. *HS*, 3(1), 47-61.
- Dirks, J. A., Gorrissen, W. J., Hathaway, J. H., Skorski, D. C., Scott, M. J., Pulsipher, T. C., . . . Rice, J. S. (2015). Impacts of climate change on energy consumption and peak demand in buildings: A detailed regional approach. *Energy*, 79, 20-32. doi:<https://doi.org/10.1016/j.energy.2014.08.081>
- Energy.gov. Energy Performance Ratings for Windows, Doors, and Skylights. Retrieved from <https://www.energy.gov/energysaver/design/windows-doors-and-s Skylights/energy-performance-ratings-windows-doors-and>
- FENERCOM. (2011). Guía del estándar Passivhaus. *Edificios de consumo energético casi nulo*.
- Fernández, F. (2016). Energy Plus 2. Simulación térmica en edificios. Conceptos básicos. *Energy Plus*. Retrieved from <http://www.simulaciontermica.com/8-energy-plus/16-simulacion-termica-en-edificios-conceptos-basicos>
- Fernández-Membrive, V. J., Lastra-Bravo, X. B., & Tolón-Becerra, A. (2015). Cost-benefit analysis of changes in energy in building technology in Southeast Spain. *Energy and Buildings*, 103, 29-37. doi:<http://dx.doi.org/10.1016/j.enbuild.2015.06.026>
- González Moreno-Navarro, J. L., Dotor Navarro, A., Morros Cardona, J., Olona Casas, J., & Onecha Pérez, B. (2013). 20. El difícil equilibrio entre eficiencia energética y conservación de los valores patrimoniales en edificios históricos. *revista ph; Revista ph 84 (octubre 2013)*.
- Hatt, T., Saelzer, G., Hempel, R., & Gerber, A. (2012). Alto confort interior con mínimo consumo energético a partir de la implementación del estándar "Passivhaus" en Chile. *Revista de la construcción*, 11, 123-134.
- Hawken, P., Lovins, A., & Lovins, H. (1999). *Natural Capitalism* (B. C. Little Ed.).
- Hernández, H., & Meza, L. (2011). Propuesta de una metodología de certificación de eficiencia energética para viviendas en Chile. *Revista de la construcción*, 10, 53-63.
- HKIA. (2012). Calculation and Application of OTTV and U-value. In: Hong Kong: Hong Kong Institute of Architects.
- IC, & IDIEM. (2014). Manual Evaluación y Calificación. In *Sistema Nacional de Certificación de Calidad Ambiental y Eficiencia Energética para Edificios de Uso Público*. Santiago de Chile.
- INN. (2007). Acondicionamiento Térmico - Envoltente térmica de edificios - Calculo de resistencias y transmitancias térmicas. In *NORMA CHILENA OFICIAL NCh853.Of2007*.
- INN. (2008). Arquitectura y construcción - Zonificación climático habitacional para Chile y recomendaciones para el diseño arquitectónico. In.
- Klimczak, M., Bojarski, J., Ziembicki, P., & Kęskiewicz, P. (2018). Analysis of the impact of simulation model simplifications on the quality of low-energy buildings simulation results. *Energy and Buildings*, 169, 141-147. doi:<https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2018.03.046>
- Kovac M. & Kovacova K. (2015)., "Simulation of Energy Demand in a Shopping Centre – Case Study," in 2nd International Congress on Energy Efficiency and Energy Related Materials (ENEFM2014), pp. 555.
- Lawton, M., Roppel, P., & Marif, W. (2011). Thermal Performance of buildings Envelope Details for Mid and High-Rise buildings. In *ASHRAE Research Project Report RP-1365*. Atlanta, Georgia.
- Lirquen. (2014). Guía productos de arquitectura. In V. L. S.A. (Ed.).

- Martínez-Molina, A., Tort-Ausina, I., Cho, S., & Vivancos, J.-L. (2016). Energy efficiency and thermal comfort in historic buildings: A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 61, 70-85. doi:<https://doi.org/10.1016/j.rser.2016.03.018>
- MINETUR, I. (2008). *Guía técnica: Procedimientos y aspectos de la simulación de instalaciones térmicas en edificios*. Madrid: Ministerio de Industria Turismo y Comercio.
- Ministerio de Fomento (2013). DA DB-HE / 1: Cálculo de parámetros característicos de la envolvente. Código Técnico de la Edificación.
- Ministerio de Fomento (2014). DA DB-HE / 3: Puentes térmicos. Código Técnico de la Edificación.
- MINVU – DITEC. (2014). Listado Oficial de Soluciones Constructivas para Acondicionamiento Térmico del Ministerio de Vivienda y Urbanismo. (11° ed.)
- MINVU. (2016). Manual de Procedimientos para Viviendas Nuevas del Sistema de Calificación Energética de Viviendas en Chile.
- MINVU. (2018). *MANUAL DE PROCEDIMIENTOS CALIFICACIÓN ENERGÉTICA DE VIVIENDAS EN CHILE*. In ESTÁNDARES TÉCNICOS PARA EDIFICACIONES RESIDENCIALES, Vol. 2. M. División Técnica de Estudio y Fomento Habitacional – Ditec (Ed.).
- Molina, C. G. (2011). Alternativas para la mejora de la eficiencia energética de los acristalamientos: los vidrios dinámicos. *Universidad Politécnica de Madrid, Madrid*, 387.
- Natephra, W., Yabuki, N., & Fukuda, T. (2018). Optimizing the evaluation of building envelope design for thermal performance using a BIM-based overall thermal transfer value calculation. *Building and Environment*, 136, 128-145. doi:<https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2018.03.032>
- Olivares Tapia, M. (2017). EVALUACIÓN DE CALIDAD DE AIRE. In *INFORME TECNICO*. Valparaíso: ACHS.
- Ordoñez, A. (2017). Manual de ayuda DesignBuilder en español. In: Sol-Arq.
- Ossio, F., De Herde, A., & Veas, L. (2012). Exigencias europeas para infiltraciones de aire: Lecciones para Chile. *Revista de la construcción*, 11, 54-63.
- Palme, M., Carrasco Aldunate, C., & Galvez Huerta, M. A. (2016). Estimación del riesgo de sobrecalentamiento y del potencial de refrigeración por ventilación natural de viviendas unifamiliares en ciudades costeras de Chile. *Hábitat Sustentable*, 52-61.
- Pino, A., Bustamante, W., & Escobar, R. (2010). *Análisis de Comportamiento Térmico de Edificios de Oficina en Comunas de la Región Metropolitana de Chile*.
- Ribero, Ó., Garzón, D., Alvarado, Y., & Gasch, I. (2016). Beneficios económicos de la certificación LEED. Edificio centro Ático: caso de estudio. *Revista ingeniería de construcción*, 31, 139-146.
- Rodríguez-Muñoz, N., Nájera-Trejo, M., & Martín-Domínguez, I. (2018). *Análisis del desempeño térmico de los sistemas constructivos de un edificio de oficinas mediante simulaciones dinámicas* (Vol. 19).
- Ruiz, M. C., & Romero, E. (2011). Energy saving in the conventional design of a Spanish house using thermal simulation. *Energy and Buildings*, 43(11), 3226-3235. doi:<http://dx.doi.org/10.1016/j.enbuild.2011.08.022>
- Saheb, Y., Saussay, A., Johnson, C., Blyth, A., Mishra, A., & Gueret, T. (2013). Modernising Building Energy Codes.
- Sears, F., Zemansky, M., Young, H. D., & Freedman, R. A. (2013). *Física universitaria* (Décimo tercera ed. Vol. 1). México: PEARSON.
- Sepúlveda Mellado, O. (2003). Sectorización climático-habitacional de las regiones de Valparaíso y Metropolitana. *Revista INVI*, 18(46).

- Serra Florensa, R., & Coch Roura, H. (2000). *Arquitectura y energía natural*: Universitat Politècnica de Catalunya. Iniciativa Digital Politècnica.
- Serway, R. A., & Jewett Jr., J. W. (2008). *FÍSICA para ciencias e ingeniería* (Séptima ed.). México, D.F.: Cengage Learning Editores.
- Sánchez, A., & Jiménez, C. (2011). Valparaíso: la ciudad-puerto más importante de Chile y la vulnerabilidad de su patrimonio arquitectónico a los riesgos sísmicos. *Estudios Geográficos*, 72(271), 559-589.
- Trebilcock Kelly, M., Soto Muñoz, J., Figueroa San Martin, R., & Piderit-Moreno, B. (2016). Metodología para el diseño de edificios educacionales confortables y resilientes. *Revista AUS*(20).
- Trebilcock, M. (2011). Percepción de barreras a la incorporación de criterios de eficiencia energética en las edificaciones. *Revista de la construcción*, 10, 4-14.
- UJAEN. Posición del Sol. In *posi_sol.gif* (Ed.). CURSOLAR - RADIACIÓN SOLAR [https://www.ujaen.es/investiga/solar/07cursosolar/home_main_frame/02_radiacion/01_basico/2_radiacion_07.htm].
- Whitman, C. J., Gabriela, A., & Roberto, C. (2011). Post-occupancy evaluation of state schools in 5 climatic zones of Chile. *Gazi University Journal of Science*, 24(2), 365-374.
- Çengel, Y. A., & Boles, M. A. (2012). *TERMODINÁMICA* (Séptima ed.). México, D.F.: MCGRAW-HILL/INTERAMERICANA EDITORES, S.A.
- Çengel, Y. A., & Ghajar, A. J. (2011). *TRANSFERENCIA DE CALOR Y MASA. Fundamentos y aplicaciones*. (Cuarta ed.). México, D.F.: MCGRAW-HILL/INTERAMERICANA EDITORES, S.A.
- <https://energyplus.net/>
- <http://diario.elmercurio.com/detalle/index.asp?id={cd4d720d-3aa3-4f7f-8a6e-283fd9fb880b}>
- <http://www.chilegbc.cl/web2017/index.php?sec=proyectos-leed>
- <https://windows.lbl.gov/software/igdb>
- <http://diario.elmercurio.com/detalle/index.asp?id={cd4d720d-3aa3-4f7f-8a6e-283fd9fb880b}>
- <http://mapa.valpo.net/content/fabrica-hucke>