

**EVALUACIÓN ENERGÉTICA, PROPUESTA DE SOLUCIÓN PASIVA MURO TROMBE Y CÁLCULO DE HUELLA DE CARBONO, EN ESCUELA ALMIRANTE PATRICIO LYNCH E-596, LIRQUÉN**

*Guillermo Meriño T.<sup>1</sup>, María Elisa Neubauer R.<sup>2</sup> y Felipe González M.<sup>3</sup>*

**RESUMEN:**

El Calentamiento Global causado por el aumento de las emisiones de los gases de efecto invernadero (GEI) es producido en gran parte por el sector de la construcción (40 % al año 2017), y es necesario realizar estudios y medidas que permitan mitigar el daño producido por estas emisiones generadas por la actividad antrópica.

En Chile, la emisión de CO<sub>2</sub> ha disminuido levemente debido a la paulatina ausencia del carbón como materia de combustión para la producción eléctrica, sin embargo tiene una tendencia creciente a lo largo de los años (aumento de 6 % en 2021), donde la industria de la construcción a lo largo de todo su proceso aporta un 15 %.

Para disminuir las emisiones mencionadas anteriormente es necesario buscar e implementar diversos métodos de construcción que favorezcan un menor consumo energético en las edificaciones. Una de estas opciones es la aplicación de soluciones pasivas a través de la captación solar, que promueve la búsqueda del confort térmico a través del uso del entorno y los recursos medioambientales, facilitando la calefacción y enfriamiento del entorno interior de las edificaciones sin necesidad de utilizar energía eléctrica.

La solución pasiva estudiada en el establecimiento educacional es el muro Trombe ventilado, cuyo funcionamiento se basa en el uso de la energía solar para calefaccionar ambientes interiores de la edificación mediante el concepto de construcción sustentable debido a la disminución en el uso de sistemas eléctricos o similares en la constante búsqueda del confort térmico, disminuyendo el promedio de la demanda de potencia de calefacción anual en un 3,4 %.

**PALABRAS CLAVES:** Evolvente térmica, Construcción sustentable, Solución pasiva.

**ABSTRACT:**

Global Warming caused by the increase in greenhouse gas (GHG) emissions is produced largely by the construction sector (40% in 2017), and it is necessary to carry out studies and measures to mitigate the damage produced by these emissions generated by anthropic activity.

In Chile, the emission of CO<sub>2</sub> has decreased slightly due to the gradual absence of coal as combustion material for electricity production, however it has a growing trend over the years (increase of 6% in 2021), where the industry of the construction throughout its entire process contributes 15 %.

To reduce the emissions mentioned above, it is necessary to seek and implement various construction methods that favor lower energy consumption in buildings. One of these options is the application of passive solutions through solar capture, which promotes the search for thermal comfort using the environment and environmental resources, facilitating the heating and cooling of the interior environment of buildings without the need to use electric power.

The passive solution studied in the educational establishment is the ventilated Trombe wall, whose operation is based on the use of solar energy to heat interior environments of the building through the concept of sustainable construction due to the decrease in the use of electrical systems or similar, in the constant search for thermal comfort, reducing the average annual heating power demand by 5,16 %.

**KEYWORDS:** Thermal envelope, Sustainable construction, Passive solution.

---

<sup>1</sup>Estudiante, Carrera de Ingeniería Civil, Universidad Católica de la Santísima Concepción, CHILE, [gmerino@ing.ucsc.cl](mailto:gmerino@ing.ucsc.cl)

<sup>2</sup>Profesor Guía, Departamento de Ingeniería Civil, Universidad Católica de la Santísima Concepción, CHILE, [maria.neubauer@ucsc.cl](mailto:maria.neubauer@ucsc.cl)

<sup>3</sup>Profesor Asistente, Departamento de Ingeniería Civil, Universidad Católica de la Santísima Concepción, CHILE, [fagonzalez@ing.ucsc.cl](mailto:fagonzalez@ing.ucsc.cl)

## 1 INTRODUCCIÓN

A lo largo de los años el cambio climático ha tomado mayor relevancia debido a los efectos negativos que se producen debido al calentamiento global generado, que se debe principalmente al aumento en las emisiones de CO<sub>2</sub> de origen antrópico. Estos gases emitidos se acumulan en la atmósfera terrestre y son capaces de absorber la radiación solar, provocando un aumento en la atmósfera terrestre. Al crecer la retención de esta energía generada por el exceso de gases de efecto invernadero (GEI), por lo que esa energía se redistribuye entre las masas de aire, el mar, y la superficie terrestre, produciendo un cambio climático a nivel planetario (Velayos, 2008), además de diversos fenómenos como el deshielo de glaciares, incremento en el nivel de océanos, aumento de precipitaciones, deterioro de los suelos producto de las sequías, y el crecimiento de ciertas infecciones epidémicas (Bustamante, 2009).

Acuña, Easton, Ramos y Torres (2019) indican que los sectores de mayor contribución a las emisiones de CO<sub>2</sub> al año 2016 están asociadas a la generación de electricidad y calor (cerca de 43%) y el transporte (cerca del 21%). Además, según la agencia internacional Global Alliance for Buildings and Construction (2018), al año 2017 el sector Construcción acumulaba cerca de 40% del total de las emisiones de CO<sub>2</sub> a nivel global relacionadas a la generación de energía, debido a la combustión de energías fósiles tales como el carbón, el gas, el petróleo y la quema de leña. Por ejemplo, las tres industrias con mayores consumos energéticos a nivel mundial son la industria del acero, del aluminio y el cemento, siendo este último el material responsable, del 7% de las emisiones de CO<sub>2</sub> a la atmósfera anualmente (Cahn, 1997).

En este contexto, a modo de buscar soluciones respecto al impacto producido por la industria de la construcción y el uso de diversas energías, es que nace el concepto de Construcción Sustentable, donde se relacionan aspectos como la eficiencia energética, el agotamiento de recursos naturales y mantención de la calidad del ambiente construido (Kilbert, 2016).

Schallenberg, Piernavieja, Hernández y Unamunzaga (2008) indican que la eficiencia energética busca reducir el consumo de energía mediante acciones concretas sin modificar el nivel de confort de un lugar y afectar la calidad del servicio. Esto es aplicable en la construcción al implementar diversas tecnologías como la que se evaluará en esta investigación, donde se espera mantener o mejorar el rendimiento de la envolvente térmica del establecimiento educacional a través de la radiación solar mediante el funcionamiento de un muro Trombe.

Particularmente, para evaluar la eficiencia energética, se realiza el estudio de cargas térmicas para edificaciones para el ciclo de invierno, lo que permite determinar el calor necesario para satisfacer la demanda de calefacción de una edificación, teniendo como fin mantener una temperatura confortable de los ambientes (19°C). Sin embargo, en esta investigación se realiza la evaluación térmica durante un periodo anual, estimando valores promedios cada tres meses. Luego de obtener la carga térmica, se brinda un confort térmico a partir de la selección del tipo de calefacción, el cual debe ser logrado con el menor uso de energía posible y así denominar la edificación como sustentable (Bustamante, 2009).

Uno de los aspectos más relevantes al momento de calefaccionar una edificación es el gasto energético que se produce en el lugar, y en la mayoría de los casos esto se traduce en la disminución del costo monetario en la búsqueda de conseguir un confort térmico para las personas que hacen uso de los espacios durante el día (Díaz, 2011). Bajo estos términos, se plantea la búsqueda de alternativas que cumplan con el requerimiento energético, específicamente, de un establecimiento educacional.

Para abordar la problemática, se determinará la potencia de calefacción y enfriamiento anual de un establecimiento educacional, realizando una modelación mediante el software Revit 2020, que en conjunto con la obtención del balance térmico, analiza el comportamiento energético respecto al confort térmico de los ocupantes. Además, se evaluará la posibilidad de aplicar tecnologías en base a energía renovable y se propondrá como solución pasiva la aplicación de un muro Trombe en algunas zonas de la edificación, que requiere, inicialmente, menor uso de calefacción en el lugar. Finalmente, a modo de proponer medidas de mitigación para reducir las emisiones de CO<sub>2</sub> al ambiente, se calcula la huella de carbono para los materiales predominantes del establecimiento educacional.

## 2 MARCO TEÓRICO

Para identificar los aspectos que generan mayores emisiones se define el concepto de análisis del ciclo de vida (ACV) de un producto. Según la Sociedad de Toxicología y Química Ambiental el ACV se define como un procedimiento objetivo de evaluación de cargas energéticas y ambientales correspondientes a un proceso o a una actividad, que se efectúa identificando los materiales, la energía utilizada y las emisiones al entorno. Esta evaluación se realiza sobre el ciclo de vida completo del proceso o actividad, incluyendo la extracción y tratamiento de la materia prima, la fabricación, el transporte, la distribución, el uso, el reciclado, la reutilización y la disposición final (Álvarez, 2017).

Para conocer la cantidad de gases de efecto invernadero (GEI) producidos por la actividad humana, se han desarrollado diversas herramientas de cuantificación y metodologías para determinar el nivel de estas emisiones, y una de ellas es la huella de carbono (HdC). Las definiciones respecto a esta herramienta se centran en el CO<sub>2</sub> como eje principal de análisis, diferenciándose en la inclusión de los distintos gases de efecto invernadero, La propiedad a la que frecuentemente se refiere la HdC es el peso en kilogramos o toneladas de emisiones de gases de efecto invernadero emitida por persona o actividad (Wiedmann y Minx, 2007). Esta medición de HdC se realiza a partir del ACV de los productos, y primero se deben identificar las fuentes de emisión directas e indirectas, es decir, aquellas que provienen de fuentes que son propias de la entidad productora, por ejemplo, fuentes de consumo eléctrico, combustibles fósiles, etc., y aquellas que ocurren como consecuencia de las actividades de la entidad, pero que provienen de fuentes excluyentes de la propiedad de ésta, como por ejemplo, el transporte o el reciclaje del producto una vez que está en poder del consumidor (Frohmann & Olmos, 2013).

Uno de los pilares fundamentales de un ACV es su desarrollo metodológico, que consiste en la determinación de cuatro fases según las normas internacionales ISO 14040 e ISO 14044: 1.- Objetivo y alcance, 2.- Análisis del inventario, 3.- Evaluación del impacto ambiental y 4.- Interpretación. En la primera fase se describe el contexto del estudio, haciendo necesario documentar todos los métodos que se utilizarán para la evaluación de impacto, las limitaciones, las hipótesis que se asumirán y los límites del sistema a analizar. En la segunda fase se recopilan todos los datos necesarios teniendo en cuenta el objetivo y el alcance definidos previamente, distinguiendo dos tipos de datos, primarios y secundarios; el primero describe los flujos relacionados directamente con los procesos que se analiza, mientras que el último describe los flujos relacionados indirectamente con los procesos analizados. Como tercera fase se evalúa la importancia de los impactos potenciales en el medio ambiente, distinguiendo cuatro subfases, dos de ellas obligatorias (clasificación y caracterización) y dos opcionales (normalización y ponderación). La cuarta y última fase se basa en interpretar los resultados teniendo en cuenta todo lo anterior, permitiendo generar recomendaciones y áreas de mejoras futuras en el sistema analizado.

La normativa británica PAS 2050 “*Specification for the assesment of the lifecycle greenhouse gas emissions of goods and services*”, la cual se apoya en las normas internacionales ISO 14040 e ISO 14044, es el estándar mayormente utilizado para el cálculo de HdC. En 2015, Badilla expone que la fórmula para calcular la huella de carbono es la siguiente:

$$\text{HdC} = \text{Datos de actividad} \cdot \text{Factor de emisión}$$

Dónde **Datos de actividad** es cualquier dato cuantificable a lo largo del proceso (en kg, Litros, kWh, etc) y **Factor de emisión** es el valor de conversión asociado en términos de kilogramos dióxido de carbono equivalente por unidad de actividad (en kg de CO<sub>2</sub>eq por kg/Litros/kWh, etc).

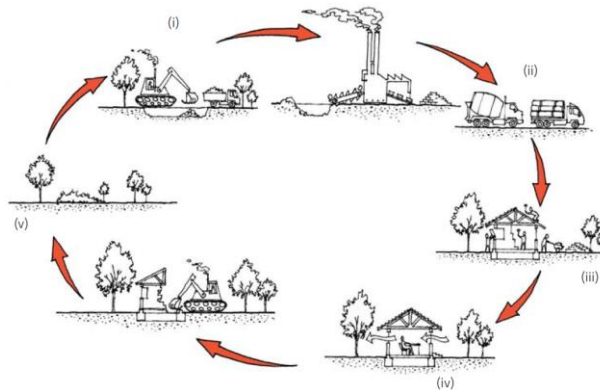
En Chile, según el Sistema Nacional de Inventarios de Gases de Efecto Invernadero (SIN Chile), las emisiones totales de GEI no han detenido su incremento, llegando en 2018 a un total de 112,312,6 (kt CO<sub>2</sub> eq) y del cual aproximadamente un 15% corresponde a la influencia de la industria de la construcción. Si bien en los últimos años se ha visto disminuida la emisión de CO<sub>2</sub> debido a la paulatina ausencia del consumo del carbón para la generación eléctrica, principal fuente de emisión de GEI en el país, la tendencia es que estas emisiones seguirán en crecimiento a lo largo de los años.

García, Quito y Perdomo (2019) estipulan que en el mundo, el sector de la construcción genera un 40% de las emisiones de CO<sub>2</sub> a través de actividades ligadas directa o indirectamente a la construcción de obras civiles y recursos invertidos en la obtención de materias primas y posterior manufacturación, llegando a una cantidad

de 2 t/m<sup>2</sup> de materia prima de una edificación. Además, el sector de la construcción fue responsable directa e indirectamente del 18% de las emisiones mundiales de GEI el año 2010 (Kibert, 2016), y fue el mayor consumidor de materiales en 2005 con implicaciones en el uso de energía y las emisiones de GEI (EPA, 2018).

Bustamante (2009) indica que, en los últimos años, cerca del 35% de la energía primaria<sup>4</sup> que consume el país provienen del petróleo y un 19% corresponde a hidroelectricidad. Además, la energía restante proviene del gas natural con un 22%, el carbón (16%), la leña y otros (14%), estos últimos factores se utilizan primordialmente para la calefacción, y es aquí donde toma relevancia el término de Envoltente Térmica, cuyo fin primordial es generar un confort térmico para los usuarios, evitando emisiones excesivas al medioambiente.

Para evaluar el consumo de energía de una edificación, uno de los métodos existentes es considerar su ACV, que consiste en 5 fases: (i) extracción y fabricación de materiales y componentes; (ii) transportes de materiales y componentes al sitio de construcción; (iii) proceso de construcción como tal; (iv) fase de operación; (v) demolición y reciclaje al fin del ciclo de vida del edificio. Todas estas fases influyen en el consumo de energía, ya que son relevantes tanto en la toma de decisiones respecto al diseño de la edificación como a la construcción de esta. En la **Figura 1** se muestra el ACV de un edificio con sus respectivas fases (Bustamante, 2009).



**Figura 1:** Procesos involucrados en el ciclo de vida de un edificio.

**Fuente:** Guía de Diseño para la Eficiencia Energética en la Vivienda Social. (Bustamante, W. 2009).

Por lo anterior, se hace necesario encontrar la eficiencia energética de una edificación, que se define como la disminución del consumo energético, manteniendo los mismos niveles de energía, sin reducir el confort y calidad de vida de las personas, cuidando los recursos naturales, garantizando el abastecimiento y fomentando la sostenibilidad en el uso de éstos (Guerrero, 2016).

A partir de la necesidad de desarrollar en mayor medida la eficiencia energética de las edificaciones nace el concepto de Construcción Sustentable. Martínez (2005) la define involucrando los siguientes elementos claves: reducción del uso de fuentes energéticas y del agotamiento de los recursos minerales; conservación de las áreas naturales y de la biodiversidad; mantención de la calidad del ambiente construido y manejo de un ambiente interior saludable.

Una manera de realizar procesos constructivos que conlleven a la sustentabilidad de una edificación es utilizar sistemas de captación solar debido al nulo uso de energía eléctrica para hallar el confort térmico en edificaciones. Duffie y Beckman (2013) definen estos sistemas como aquellos elementos que utilizan energía solar para diferentes fines, entre los cuales se consideran: la calefacción, ventilación o acondicionamiento de los edificios y viviendas. Además, estos sistemas no requieren de energía eléctrica y/o de elementos para el movimiento mecánico de fluidos.

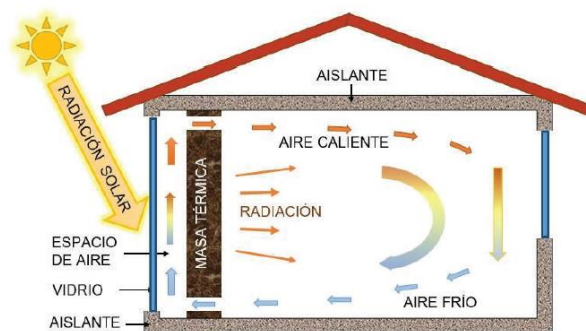
Duffie y Beckman (2013) indican que existen tres tipos de sistemas de captación solar: Sistemas activos, cuyo funcionamiento se define a través de sistemas de captación solar, almacenamiento y distribución según el aporte de energía externa, como por ejemplo, paneles solares para calentamiento de agua requerida por bombas

<sup>4</sup> Se denomina energía primaria a los recursos naturales disponibles en forma directa (como la energía hidráulica, eólica y solar) o indirecta (después de atravesar por un proceso minero, como por ejemplo el petróleo, el gas natural, el carbón mineral, etc.) para su uso energético sin necesidad de someterlos a un proceso de transformación. (www.cne.cl). La energía secundaria es la que se obtiene del proceso de transformación y es utilizada por el usuario final.

para circulación de fluido, sistemas pasivos, los cuales no utilizan energía externa para el movimiento mecánico de fluidos, y efecto de flotación, correspondiente a la circulación o movimiento de fluidos debido a la convección natural, es decir, la transferencia de energía entre superficie y fluido, donde en el caso del aire la tasa de flujo de ventilación de residencias y edificaciones se debe a la diferencia de temperaturas y densidades. Este efecto es utilizado también desde el medio externo generando la ventilación natural para enfriar o calentar el interior de residencias y edificaciones (Lopez de Ponce, 2013).

En esta investigación, se estudia la implementación del muro Trombe, que se basa en los principios de los sistemas de captación solar pasiva y efectos de flotación mencionados anteriormente, caracterizándose por el no uso de energía externa para el movimiento mecánico de fluidos y por el movimiento de fluidos a través de la convección natural que se produzca en la cámara de aire generada en el muro Trombe. Este tipo de muro, se define como un sistema pasivo de calefacción solar de calentamiento indirecto, que prevé un alto rendimiento energético del sistema y los mecanismos de control son simples (Hernández-López, 2016).

El sistema de muro Trombe (**Figura 2**) posee una superficie acristalada por la que atraviesa la radiación solar al colector. Debido a esta radiación solar se genera convección dentro de la cámara de aire, creando un flujo de aire caliente desde la parte inferior hacia la parte superior, generando un aumento de temperatura en la superficie de absorción por efecto convectivo del aire y por la radiación solar. Respecto al espacio habitable, el aire caliente fluye desde la zona superior a la inferior por la diferencia de temperatura, provocando que el aire frío circule hacia el colector (Álvarez, 2015).



**Figura 2:** Descripción del muro Trombe.

**Fuente:** Almacenamiento de energía térmica en muro Trombe. (Hernández-Lopez, I. 2016)

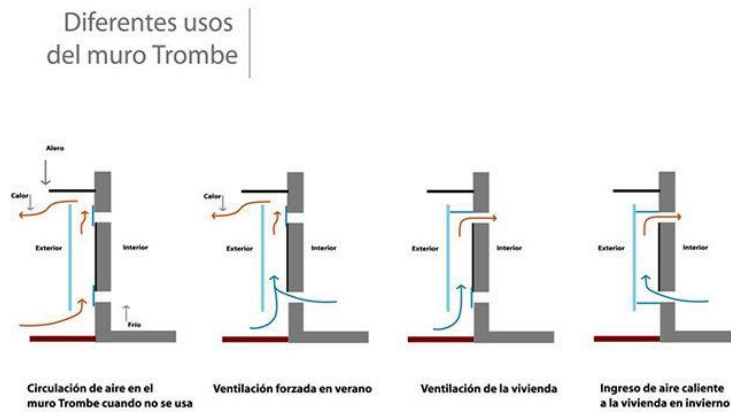
El muro Trombe a implementar en el estudio es de tipo clásico, que se compone por una masa térmica maciza ubicada a una distancia de la superficie acristalada de 5 cm. La pared maciza absorbe parte del calor del aire en el colector y la energía solar que atraviesa el vidrio en forma de radiación. Además, parte del flujo calórico se transfiere al interior por conducción. El aire que se encuentra entre la superficie acristalada y la pared, se calienta debido a la radiación recibida a través del vidrio, iniciando el movimiento del flujo hacia la parte superior para posteriormente ingresar al interior de la habitación por la ventilación superior (Hernández-Lopez, 2016). En la **Figura 3** se muestra la descripción de este sistema.



**Figura 3:** Descripción muro Trombe ventilado.

**Fuente:** Proceso de implementación de calefactores solares. (Allanegui, 2013)

Finalmente, en la **Figura 4** se muestra esquemáticamente el funcionamiento del muro Trombe, según las condiciones de uso que se le otorguen durante el año, ya sea para calefactar o enfriar el interior de una edificación.



**Figura 4:** Funcionamiento muro Trombe ventilado para calentar y enfriar.

**Fuente:** Proceso de implementación de calefactores solares. (Allanegui, 2013).

### 3 OBJETIVOS

#### 3.1 Objetivo general

- Evaluar comportamiento térmico anual de Escuela Almirante Patricio Lynch E-596 para propuesta de solución pasiva muro Trombe y calcular huella de carbono en materiales de construcción de la edificación.

#### 3.2 Objetivos específicos

- Modelar mediante software Revit la envolvente del establecimiento.
- Determinar demanda de calefacción y enfriamiento anual del establecimiento.
- Calcular huella de carbono en materiales del establecimiento.
- Determinar potencia que aporta la solución pasiva muro Trombe a través de la envolvente térmica.
- Obtener potencia de calefacción en el establecimiento al implementar solución pasiva muro Trombe.

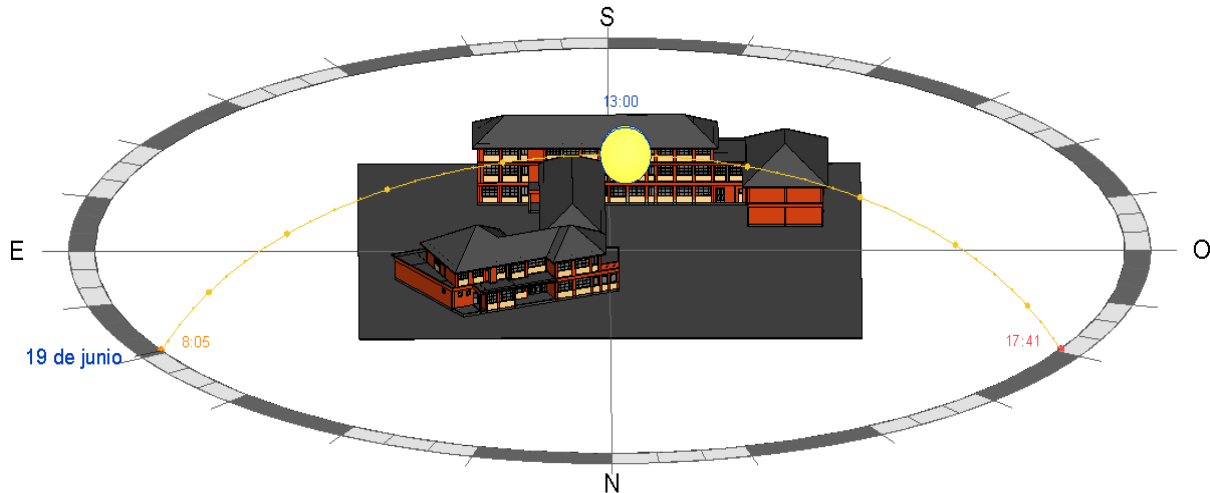
### 4 METODOLOGÍA

Para llevar a cabo la investigación de la edificación se consideran diversos parámetros respecto a la obtención de datos, tales como ubicación geográfica, climatología, ocupantes, artefactos eléctricos y sus respectivos usos diarios, planos arquitectónicos y especificaciones técnicas para conocer materialidad, dimensiones, zonas en las que es factible implementar la solución pasiva, entre otros.

#### 4.1 Área de estudio

El área de estudio corresponde a la Escuela Almirante Patricio Lynch E-596, que imparte clases de educación básica y se ubica en calle Camilo Henríquez #6 en la localidad de Lirquén, Comuna de Penco, Región del Biobío, Chile, cuyas coordenadas geográficas son 36°42'47''S, 72°58'34''W. Este establecimiento consta de tres niveles, los cuáles poseen una superficie de 1.232 m<sup>2</sup> en el primer piso, 1.073 m<sup>2</sup> en el segundo y 310 m<sup>2</sup> en el tercero, dando una superficie total de 2.615 m<sup>2</sup>. Además, la edificación está constituida principalmente por hormigón armado (67%), mientras que el 33% corresponde a zonas de albañilería que se distribuyen principalmente debajo de las ventanas.

Mardones (2020), al realizar la evaluación térmica en los meses de invierno del establecimiento educacional obtuvo lo mostrado en la **Figura 2**, correspondiente a la modelación de la envolvente de la Escuela Almirante Patricio Lynch E-596 realizada en software Revit 2020. Esta envolvente no varía para esta investigación ya que no se han hecho modificaciones constructivas hasta la fecha.

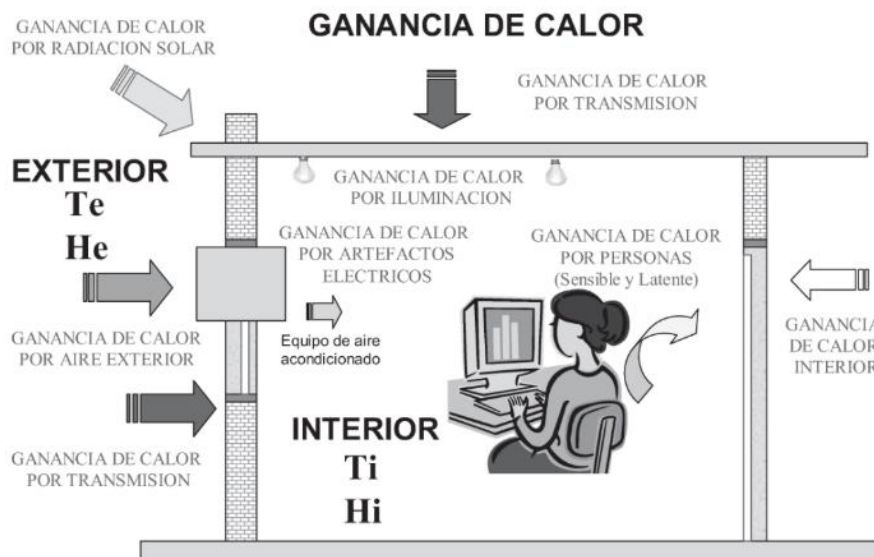


**Figura 2:** Modelo de Escuela Almirante Patricio Lynch E-596.

**Fuente:** Cálculo de potencia de calefacción y huella de carbono de la Escuela Almirante Patricio Lynch E-596 Lirquén, para la evaluación energética y propuesta de soluciones (Mardones, S. 2020).

#### 4.2 Balance térmico

Las condiciones térmicas del establecimiento se determinan a partir del balance térmico, el que se define a partir de un diferencial de temperaturas entre el exterior y el confort térmico dentro del establecimiento. En la **Figura 3** se presentan las pérdidas y ganancias de calor que, en general, se producen en la mayoría de las edificaciones.



**Figura 3:** Transferencia de calor en local acondicionado.

**Fuente:** Acondicionamiento térmico de edificios, (Díaz, S. 2011).

Según Díaz, para acondicionar térmicamente un lugar, se requiere introducir o extraer calor dependiendo de la cantidad de calor que se pierda o gane debido a la diferencia de temperaturas entre el interior y exterior (2011). El cálculo del balance térmico se obtiene a partir de la **Ecuación 1** mostrada a continuación.

$$\dot{Q}_{total} = \dot{Q}_s \pm \dot{Q}_c \pm \dot{Q}_v \pm \dot{Q}_i \quad (1)$$

Donde:

$\dot{Q}_s$ : Balance térmico de cargas solares (kW).

$\dot{Q}_c$ : Balance térmico de los elementos de la envolvente (kW).

$\dot{Q}_v$ : Balance térmico de cargas de ventilación (kW).

$\dot{Q}_i$ : Balance térmico de cargas internas (kW).

El detalle de la metodología para el cálculo del balance térmico de las diversas cargas y la estimación de huella de carbono se encuentra especificado en el **Anexo A**.

### 4.3 Aplicación solución pasiva

Para la implementación del muro Trombe ventilado es necesario considerar que el efecto constructivo que genera este elemento es el de una cámara de aire externa al muro, en este caso, de hormigón. Por lo tanto, se emplean consideraciones relacionadas a la resistencia térmica de una cámara de aire según la NCh853. Of2007 de acondicionamiento térmico, definiendo lo siguiente:

- Los muros, al ser elementos verticales, el grado de ventilación de la cámara se considera como el cociente entre la sección total de orificios o rendijas de ventilación al exterior (**S**) y la longitud de la cámara de aire medida horizontalmente (**I**).
- En el punto **5,3,2,1** se definen los elementos verticales con cámara de aire medianamente ventilada cuando **S/I** se encuentra entre los valores 20 y 500 cm<sup>2</sup>/m (caso **b**), el que es utilizado para calcular la transmitancia térmica a través de la ecuación **7** mostrada en la norma. Esta ecuación considera el cálculo de transmitancia térmica a través de otros dos casos (**a** y **c**), cuyos valores se calculan desde la tabla **2** y se considera un valor de  $\alpha$  de 0,25 según lo expuesto en la Tabla **3** de la norma.

#### 4.3.1 Temperatura aportada por muro Trombe

Para conocer la temperatura que se genera dentro del muro Trombe en relación con la temperatura externa se utiliza la Ley de Fourier expresada en la **Ecuación 2**.

$$Q = \frac{\lambda \cdot A}{e} (T_c - T_f) \quad (2)$$

Donde:

$\lambda$ : Conductividad térmica del material (W/m•K).

$A$ : Superficie en la que se aplica el muro Trombe (m<sup>2</sup>).

$e$ : Espesor del material (m).

$T_c$ : Temperatura foco caliente (°C).

$T_f$ : Temperatura foco frío (°C).

Además, la radiación solar al expresarse en W/m<sup>2</sup>, se define una relación entre el flujo de calor y la superficie en la que incide la radiación solar, obteniendo lo mostrado en la **Ecuación 3**.

$$R = \frac{Q}{A} \quad (3)$$

Donde:

$R$ : Radiación solar directa (W/m<sup>2</sup>).

$Q$ : Flujo de calor que pasa a través del muro Trombe (W).

$A$ : Superficie en la que se aplica el muro Trombe (m<sup>2</sup>).

Finalmente, se obtiene la temperatura del foco caliente en muro Trombe a través de la **Ecuación 4**.

$$T_c = \frac{R \cdot e}{\lambda} + T_f \quad (4)$$

## 5 CONSIDERACIONES PARA CÁLCULO DE BALANCE TÉRMICO ANUAL

### 5.1 Temperatura y humedad

#### 5.1.1 Condiciones al exterior del establecimiento

Debido a que la zona en la que se ubica el establecimiento educacional se encuentra en las cercanías de Concepción, lo que determina con mayor relevancia la incidencia externa referente al sol es la temperatura a un horario determinado, ya sea para definir los días más fríos o calientes a lo largo del año.

Los parámetros de temperatura y humedad referentes al área de estudio se obtienen a partir de la prestación de servicios de una compañía de pronósticos climáticos<sup>5</sup>. Los valores asociados al exterior del establecimiento respecto a la humedad se indican en **Tabla 1**, donde se detalla cada época con sus respectivos valores.

**Tabla 1:** Condiciones de humedad en el establecimiento

Humedad exterior, W ext. [%]			
Ene - Mar	Abr - Jun	Jul - Sep	Oct - Dic
70	79	82	74

#### 5.1.2 Condiciones al interior del establecimiento

En la **Tabla 2** se muestran las condiciones de confort definidas por la Cámara Chilena de la Construcción (CChC) tanto para la humedad como para la temperatura.

**Tabla 2:** Condiciones de confort (CChC, 2015)

Temperatura [°C]	Humedad [%]
19	60

### 5.2 Radiación solar

La información respecto a la radiación solar que se produce en el establecimiento educacional se obtiene mediante un informe proporcionado por la plataforma correspondiente al explorador solar del Ministerio de Energía de Chile<sup>6</sup>, donde se seleccionan los periodos a evaluar según la máxima y mínima temperatura encontrada en cada una de las épocas definidas cada tres meses a lo largo del año, comenzando en el tramo de enero a marzo.

El sol incide directamente sólo durante el día, por lo que en la **Tabla 14** del **Anexo B** se definen los horarios en los que ocurre cuantificando las horas tanto de incidencia como las que no influyen en la edificación para efectos de cálculos respecto a cargas dependientes de la radiación solar.

### 5.3 Cargas de ventilación

#### 5.3.1 Carga latente de ventilación

Para definir las cargas latentes de ventilación, se tienen las siguientes características:

- RAH para caudal de viento con un valor de 0,0022.
- Humedad dentro del establecimiento de un 60%, mientras que en el exterior varía dependiendo de la época del año en estudio, según lo indicado en la **Tabla 1**.

<sup>5</sup> <https://climatologia.meteochile.gob.cl/application/historico/datosHistoricosEma/360019>

<sup>6</sup> <http://solar.minenergia.cl/exploracion>

### 5.3.2 Carga sensible de ventilación

Para los cálculos de cargas de ventilación sensible para puertas y ventanas de la envolvente del establecimiento, se consideran las siguientes características:

- La cantidad de ventanas que se abren en época de invierno corresponden a un 30% de las existentes en el establecimiento, principalmente cuando se realiza aseo.
- Las puertas de acceso se mantienen abiertas durante el ingreso y salida del establecimiento, correspondiente a un 5% del tiempo y cuya área de abertura corresponde a un 100% del área.

Las consideraciones hechas para la obtención de las cargas internas se encuentran en el **Anexo B**.

### 5.4 Coeficiente de ganancia solar

El Coeficiente de Ganancia de Calor Solar 'SHGC' (Solar Heat Gain Coefficient) es un parámetro de medición para evaluar la ganancia de calor solar que admite una ventana, cuyos factores incluyen tanto el calor transmitido como absorbido por el vidrio<sup>7</sup>. En la **Tabla 3** se muestra el valor utilizado para efectos de cálculo.

**Tabla 3:** Coeficiente de ganancia de calor solar ( $\theta$ )

Ventana con vidrio	SHGC
Simple claro	0,86

### 5.5 Absortancia

Este parámetro corresponde a la relación entre el flujo de radiación absorbida por alguna superficie y la radiación total incidente en ella. El valor correspondiente a la absortancia ( $\alpha$ ) se muestra en la **Tabla 4**.

**Tabla 4:** Absortancia en paredes externas del establecimiento [ $\alpha$ ]

Material en superficie externa	Absortancia [%]
Pintura aceite, crema clara	30

### 5.6 Resistencia de película exterior de aire

La resistencia de película exterior de aire ( $R_{so}$ ) es aquella que varía dependiendo de la posición del elemento y el sentido del flujo de calor, esta fina película de aire se produce sobre la superficie de los cerramientos.

Este valor es utilizado para obtener la carga por transmisión y radiación que pasa a través de las paredes y techumbres que limitan con el exterior. En este caso, la resistencia de la película de aire exterior es de **0,055** [ $m^2 \cdot K/W$ ] según lo definido por la NCh853. Of2007 de acondicionamiento térmico.

### 5.7 Muro Trombe ventilado

Algunas consideraciones para el diseño y la definición de parámetros respecto a la solución pasiva se asumen a través de las condiciones en las que se encuentra el establecimiento, estudiando parámetros como la orientación de algunos muros, la cantidad de metros cuadrados que se verían beneficiados con la implementación de esta opción pasiva y las zonas específicas en las que se aplicará el muro Trombe ventilado, entre otras.

El muro Trombe se aplica en muros orientados hacia el norte para conseguir un mayor rendimiento de la solución pasiva debido a que es la orientación en la que el sol incide mayormente en el hemisferio sur del planeta.

El muro Trombe genera variaciones en la carga solar indirecta y en cargas de la envolvente del establecimiento educacional. Esto se debe a que al realizar modificaciones constructivas en los muros exteriores la transmitancia térmica del elemento donde se aplique la solución pasiva cambiará, ya que tanto la radiación

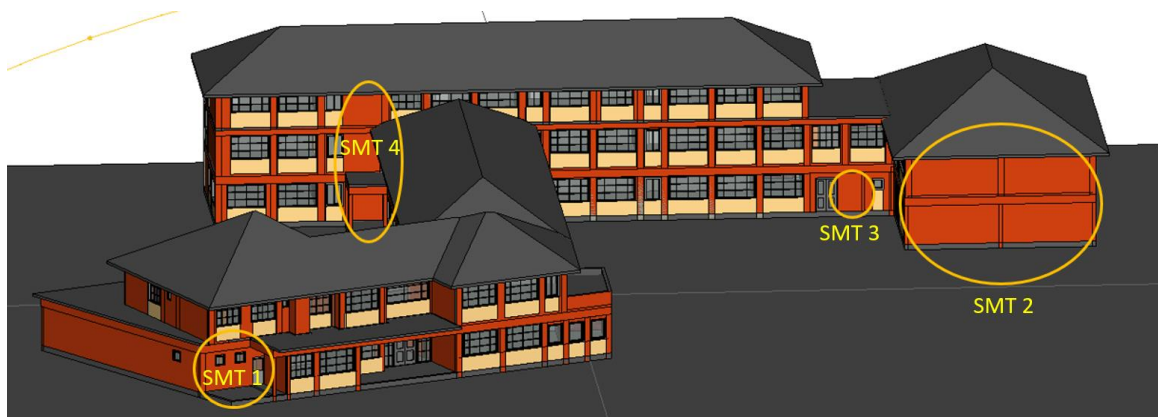
<sup>7</sup> <https://www.fau.ucv.ve/idec/racionalidad/Paginas/Manualventanas.html>

solar como las temperaturas externas incidirán de manera diferente debido a la variación en la materialidad y efectos producidos al interior del muro Trombe.

Según Proyecto RECONSOST (2007) Los orificios del muro se calculan como:  $A1 + A2 = (L \cdot H) / 100$ ; donde H (m) es la altura del muro y L (m) es la longitud, A1 representa los orificios superiores y A2 los inferiores. Además, se sugiere una suma total de perforaciones de 1 dm<sup>2</sup> por cada m<sup>2</sup> de muro, es decir, 100 cm<sup>2</sup> por cada 1 m<sup>2</sup> de muro.

En la **Figura 4** las zonas demarcadas con color amarillo (SMT) indican los muros donde se implementa la solución pasiva para la evaluación térmica de la edificación, los cuales son seleccionados debido a que, además de estar orientados hacia el norte y ser de hormigón (alta inercia térmica<sup>8</sup>), poseen baja superficie de acristalamiento, por lo que se prevé un mejor rendimiento que en aquellas superficies que poseen mayor superficie acristalada o materiales de menor inercia térmica.

Los cálculos se realizan con un total de 36 perforaciones, lo que se traduce a una superficie agujereada de 1,8 m<sup>2</sup>.



**Figura 4:** Zonas específicas del establecimiento en las que se aplica solución pasiva.

**Fuente:** Elaboración propia.

Las zonas especificadas en la figura anterior tienen diversas dimensiones tanto de orificios de ventilación como de área afectada por la solución pasiva. Además, la envolvente se ve afectada al cambiar la transmitancia térmica debido a la consideración de la cámara de aire del muro Trombe ventilado. La carga de la envolvente considera los parámetros mostrados en **Anexo C**.

## 6 ANÁLISIS DE RESULTADOS

### 6.1 Huella de carbono

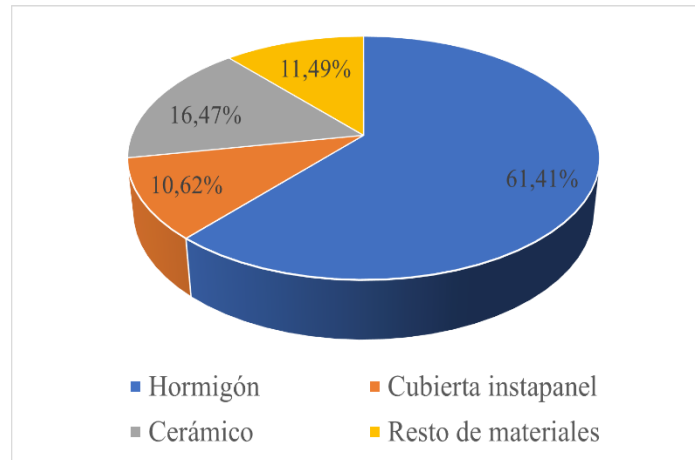
Mardones (2020) indica que el cálculo de huella de carbono en este establecimiento educacional resultó en un total de **368,1 TonCO<sub>2</sub>eq**. Según lo investigado, no se encontró información sobre variaciones en los valores de factor de emisión de CO<sub>2</sub> de los materiales predominantes en la edificación, por lo que la diferencia en el cálculo de huella de carbono está reflejada en la cantidad de material utilizado. Esto se debe a que al evaluar la aplicación del muro Trombe existe un aumento en la cantidad de vidrio total, ya que al implementar la solución pasiva se agrega un total de **87,9 m<sup>2</sup>** de superficie acristalada, cuyo peso para efectos de cálculo de huella de carbono es de **1.318,5 kg** en total según una compañía de fabricación de vidrio de Cataluña, España<sup>9</sup>.

Los resultados del cálculo de huella de carbono se muestran en la **Tabla 20** del **Anexo D**, donde se refleja un aumento respecto a lo calculado en la investigación de Mardones (2020), resultando un total de kilogramos de emisión de CO<sub>2</sub> equivalente de **368.777,54 kgCO<sub>2</sub>eq**.

<sup>8</sup><https://ingenio.frp.utn.edu.ar/index.php/ingenio/article/view/47/58#:~:text=Cuanto%20m%C3%A1s%20alta%20sea%20la,W%2Fm%2F%C2%B0C.>

<sup>9</sup><https://tecnicglass.com/consejos/cuanto-pesa-un-vidrio/>

En la **Figura 5** se muestran los porcentajes de aquellos materiales con mayor huella de carbono en el establecimiento educacional. Estas estimaciones se hacen con la **Ecuación 17** de **Anexo A**.



**Figura 5:** Porcentaje de materiales con mayor huella de carbono.

**Fuente:** Elaboración propia.

## 6.2 Balance térmico sin solución pasiva

Para realizar la evaluación energética actual del establecimiento educacional se consideran todas las cargas correspondientes a este parámetro exployadas en la metodología de este documento.

Cabe destacar que debido a lo extenso de los resultados implicados en este cálculo el balance térmico actual se encuentra en el **Anexo G**, donde se especifican las potencias de calefacción y enfriamiento para los periodos definidos durante el año y cuyos valores serán comparados de manera gráfica con el balance térmico al implementar la solución pasiva.

## 6.3 Balance térmico con solución pasiva

Respecto al balance térmico, se tiene que la demanda actual de calefacción es de **91,7 W/m<sup>2</sup>**, que al aplicar el Muro Trombe disminuye a **88,7 W/m<sup>2</sup>**. En cuanto a la demanda de enfriamiento, sólo se obtiene el cálculo actual del establecimiento educacional cuyo valor es de **38,5 W/m<sup>2</sup>**, esto ya que se realiza la investigación para evaluar específicamente la calefacción necesaria en la edificación.

Si bien se darán a conocer los resultados totales de potencia de calefacción y enfriamiento en la edificación, para conocer cuánto se enfría o ventila la edificación al implementar el muro Trombe se deben obtener datos empíricos de la velocidad del aire que pasa a través de los orificios del muro y la temperatura de este, por lo que sólo se puede elaborar un análisis cuantitativo respecto a la calefacción del establecimiento educacional a través del aumento de potencia que se produce en la envolvente referente a los muros a intervenir en el edificio.

Debido a lo anterior, se realiza el análisis a partir de los días más fríos del año, lo que permite obtener el aporte de potencia que produce la implementación de la solución pasiva en la edificación, ya sea de manera anual en la generalidad del establecimiento, o mediante el análisis cuatrimestral.

## 6.3.1 Potencia de calefacción y enfriamiento entre enero y marzo

**Tabla 5:** Cargas de calefacción y enfriamiento en el día de menor temperatura entre enero y marzo al aplicar solución pasiva

DÍA DE MENOR TEMPERATURA: ENERO - MARZO CON SOLUCIÓN PASIVA										
Hora	Carga solar Directa [W]	Carga Solar Indirecta [W]	Carga Envolverte [W]	Carga Ventilación Sensible [W]	Carga Ventilación Latente [W]	Carga Interna Ocupantes Sensible [W]	Carga Interna Ocupantes Latente [W]	Carga Interna Artefactos + Iluminación [W]	Total Calefacción [kW]	Total Enfriamiento [kW]
0:00	0,00	0,00	-48141,61	-5349,10	0,0002	50,00	40,00	12678,00	-40,72	0,00
1:00	0,00	0,00	-48276,07	-5204,42	0,0002	50,00	40,00	12678,00	-40,71	0,00
2:00	0,00	0,00	-48007,14	-4750,75	0,0002	50,00	40,00	12678,00	-39,99	0,00
3:00	0,00	0,00	-49284,57	-3638,49	0,0001	50,00	40,00	12678,00	-40,16	0,00
4:00	0,00	0,00	-50427,53	-4778,59	0,0002	50,00	40,00	12678,00	-42,44	0,00
5:00	0,00	0,00	-51839,42	-5865,09	0,0002	50,00	40,00	12678,00	-44,94	0,00
6:00	0,00	0,00	-53049,61	-6987,88	0,0002	50,00	40,00	12678,00	-47,27	0,00
7:00	0,00	0,00	-53116,84	-5775,06	0,0002	150,00	120,00	12678,00	-45,94	0,00
8:00	91,09	26,82	-52920,19	-3458,81	0,0001	5400,00	4320,00	12678,00	-33,86	0,00
9:00	218,13	64,22	-49135,65	-1565,93	0,0001	5400,00	4320,00	12678,00	-28,02	0,00
10:00	333,35	98,14	-43745,58	-2790,73	0,0001	5400,00	4320,00	12678,00	-23,71	0,00
11:00	421,48	124,09	-38777,40	-4257,52	0,0003	5400,00	4320,00	12678,00	-20,09	0,00
12:00	723,49	189,61	-34234,81	-3899,22	0,0004	5400,00	4320,00	12678,00	-14,82	0,00
13:00	848,18	221,83	-30749,79	-2644,75	0,0005	5400,00	4320,00	12678,00	-9,93	0,00
14:00	716,77	187,46	-30674,49	-3403,26	0,0006	5400,00	4320,00	12678,00	-10,78	0,00
15:00	626,43	163,83	-35152,54	-4582,78	0,0004	5400,00	4320,00	12678,00	-16,55	0,00
16:00	485,31	126,93	-43284,03	-7252,52	0,0004	5400,00	4320,00	12678,00	-27,53	0,00
17:00	20581,72	4805,31	-36951,69	-7651,68	0,0003	5400,00	4320,00	12678,00	0,00	3,18
18:00	7654,02	1787,02	-55149,29	-9569,93	0,0003	5400,00	4320,00	12678,00	-32,88	0,00
19:00	0,00	0,00	-69790,61	-11574,70	0,0003	150,00	120,00	12678,00	-68,42	0,00
20:00	0,00	0,00	-77522,40	-16112,08	0,0003	50,00	40,00	12678,00	-80,87	0,00
21:00	0,00	0,00	-80077,25	-11620,89	0,0002	50,00	40,00	12678,00	-78,93	0,00
22:00	0,00	0,00	-87203,94	-14212,82	0,0002	50,00	40,00	12678,00	-88,65	0,00
23:00	0,00	0,00	-96213,15	-18203,63	0,0002	50,00	40,00	12678,00	-101,65	0,00

Al comparar el balance térmico actual con la implementación de la solución pasiva las cargas que presentan cambios son la carga solar indirecta y la carga de envolvente. Específicamente se producen aumentos de potencia, como por ejemplo, en la potencia máxima de calefacción que pasa de **-103,06 kW** a **-101,65 kW** entre enero y marzo. Además, el promedio de balance térmico de calefacción actual en el periodo de enero a marzo es de **-42,11 kW**, mientras que el que posee solución pasiva tiene un valor de **-40,79 kW**, notando un aumento promedio de calefacción en este tramo anual de **3,2 %**.

Respecto al enfriamiento del establecimiento educacional, considerando el análisis hecho a los meses más fríos, se tiene que entre enero y marzo sólo se requiere enfriar la edificación con un promedio de **0,13 kW**.

## 6.3.2 Potencia de calefacción y enfriamiento entre abril y junio

**Tabla 6:** Cargas de calefacción y enfriamiento en el día de menor temperatura entre abril y junio al aplicar solución pasiva

DÍA DE MENOR TEMPERATURA: ABRIL - JUNIO CON SOLUCIÓN PASIVA										
Hora	Carga solar Directa [W]	Carga Solar Indirecta [W]	Carga Envoltante [W]	Carga Ventilación Sensible [W]	Carga Ventilación Latente [W]	Carga Interna Ocupantes Sensible [W]	Carga Interna Ocupantes Latente [W]	Carga Interna Artefactos + Iluminación [W]	Total Calefacción [kW]	Total Enfriamiento [kW]
0:00	0,00	0,00	-108113,38	-41893,22	0,0009	150,00	120,00	12678,00	-137,06	0,00
1:00	0,00	0,00	-110937,16	-38529,38	0,0008	150,00	120,00	12678,00	-136,52	0,00
2:00	0,00	0,00	-113088,62	-35600,35	0,0007	150,00	120,00	12678,00	-135,74	0,00
3:00	0,00	0,00	-115979,63	-30996,23	0,0006	150,00	120,00	12678,00	-134,03	0,00
4:00	0,00	0,00	-119946,38	-27967,80	0,0005	150,00	120,00	12678,00	-134,97	0,00
5:00	0,00	0,00	-124047,58	-24413,75	0,0005	150,00	120,00	12678,00	-135,51	0,00
6:00	0,00	0,00	-128350,49	-28664,51	0,0005	150,00	120,00	12678,00	-144,07	0,00
7:00	0,00	0,00	-132720,63	-21166,62	0,0004	450,00	360,00	12678,00	-140,40	0,00
8:00	0,00	0,00	-130165,78	-20257,19	0,0004	16250,00	13000,00	12678,00	-108,49	0,00
9:00	145,75	42,91	-124956,57	-14258,62	0,0003	16250,00	13000,00	12678,00	-97,10	0,00
10:00	263,43	77,56	-117615,07	-23222,26	0,0005	16250,00	13000,00	12678,00	-98,57	0,00
11:00	349,10	137,92	-110362,66	-24212,61	0,0005	16250,00	13000,00	12678,00	-92,16	0,00
12:00	607,02	159,08	-103066,54	-18229,91	0,0004	16250,00	13000,00	12678,00	-78,60	0,00
13:00	631,65	165,54	-97475,11	-11188,94	0,0003	16250,00	13000,00	12678,00	-65,94	0,00
14:00	598,80	156,93	-90968,31	-20867,64	0,0006	16250,00	13000,00	12678,00	-69,15	0,00
15:00	51122,95	13398,11	-63581,31	-31103,57	0,0009	16250,00	13000,00	12678,00	0,00	11,76
16:00	37209,38	5800,31	-73678,02	-27775,38	0,0008	16250,00	13000,00	12678,00	-16,52	0,00
17:00	18350,09	2860,47	-87749,53	-14057,35	0,0004	16250,00	13000,00	12678,00	-38,67	0,00
18:00	0,00	0,00	-101860,72	-9311,28	0,0002	16250,00	13000,00	12678,00	-69,24	0,00
19:00	0,00	0,00	-104213,87	-10512,27	0,0002	450,00	360,00	12678,00	-101,24	0,00
20:00	0,00	0,00	-106768,72	-29728,89	0,0007	150,00	120,00	12678,00	-123,55	0,00
21:00	0,00	0,00	-107508,28	-35396,09	0,0008	150,00	120,00	12678,00	-129,96	0,00
22:00	0,00	0,00	-107709,98	-51394,85	0,0011	150,00	120,00	12678,00	-146,16	0,00
23:00	0,00	0,00	-106029,16	-51902,90	0,0012	150,00	120,00	12678,00	-144,98	0,00

En el periodo de abril a junio la potencia de calefacción máxima actual aumenta de **-147,8 kW** a **-146,16 kW** con la aplicación del muro Trombe. Además, el promedio de balance térmico de calefacción actual en el periodo de abril a junio es de **-106,64 kW**, que aumenta a **-103,28 kW** notando un promedio de aumento del **3,15 %**.

En este caso sólo se necesita enfriar o ventilar el interior del lugar durante 1 hora y sucede al aplicar la solución pasiva, teniendo un valor de **11,76 kW** a las 15:00 hrs.

## 6.3.3 Potencia de calefacción y enfriamiento entre julio y septiembre

**Tabla 7:** Cargas de calefacción y enfriamiento en el día de menor temperatura entre julio y septiembre al aplicar solución pasiva

DÍA DE MENOR TEMPERATURA: JULIO - SEPTIEMBRE CON SOLUCIÓN PASIVA										
Hora	Carga solar Directa [W]	Carga Solar Indirecta [W]	Carga Envoltante [W]	Carga Ventilación Sensible [W]	Carga Ventilación Latente [W]	Carga Interna Ocupantes Sensible [W]	Carga Interna Ocupantes Latente [W]	Carga Interna Artefactos + Iluminación [W]	Total Calefacción [kW]	Total Enfriamiento [kW]
0:00	0,00	0,00	-123576,95	-39293,09	0,0009	150,00	120,00	12678,00	-149,92	0,00
1:00	0,00	0,00	-125123,31	-48203,53	0,0010	150,00	120,00	12678,00	-160,38	0,00
2:00	0,00	0,00	-128014,33	-50395,78	0,0010	150,00	120,00	12678,00	-165,46	0,00
3:00	0,00	0,00	-131241,51	-55051,81	0,0011	150,00	120,00	12678,00	-173,35	0,00
4:00	0,00	0,00	-135073,78	-60439,81	0,0012	150,00	120,00	12678,00	-182,57	0,00
5:00	0,00	0,00	-138233,73	-60873,44	0,0011	150,00	120,00	12678,00	-186,16	0,00
6:00	0,00	0,00	-139780,09	-67016,56	0,0012	150,00	120,00	12678,00	-193,85	0,00
7:00	0,00	0,00	-142536,64	-68859,35	0,0012	450,00	360,00	12678,00	-197,91	0,00
8:00	0,00	0,00	-137695,87	-68400,22	0,0013	13500,00	10800,00	12678,00	-169,12	0,00
9:00	15281,75	4499,13	-116774,33	-62006,91	0,0013	13500,00	10800,00	12678,00	-122,02	0,00
10:00	27297,00	8036,56	-96065,91	-56455,89	0,0013	13500,00	10800,00	12678,00	-80,21	0,00
11:00	36220,05	10663,62	-78140,94	-48219,40	0,0013	13500,00	10800,00	12678,00	-42,50	0,00
12:00	63320,75	16594,87	-63736,96	-39533,14	0,0013	13500,00	10800,00	12678,00	0,00	13,62
13:00	66090,02	17320,63	-54086,01	-29926,52	0,0011	13500,00	10800,00	12678,00	0,00	36,38
14:00	63072,12	16529,71	-48385,33	-25810,03	0,0011	13500,00	10800,00	12678,00	0,00	42,38
15:00	54416,36	14261,24	-46365,98	-19232,62	0,0009	13500,00	10800,00	12678,00	0,00	40,06
16:00	40638,68	6334,88	-55863,64	-17331,93	0,0008	13500,00	10800,00	12678,00	0,00	10,76
17:00	22108,65	3446,37	-69114,58	-14205,92	0,0006	13500,00	10800,00	12678,00	-20,79	0,00
18:00	0,00	0,00	-83640,59	-13279,71	0,0005	13500,00	10800,00	12678,00	-59,94	0,00
19:00	0,00	0,00	-89691,56	-19134,39	0,0006	450,00	360,00	12678,00	-95,34	0,00
20:00	0,00	0,00	-95876,99	-31057,90	0,0009	150,00	120,00	12678,00	-113,99	0,00
21:00	0,00	0,00	-100986,69	-39010,51	0,0011	150,00	120,00	12678,00	-127,05	0,00
22:00	0,00	0,00	-106499,79	-45151,29	0,0012	150,00	120,00	12678,00	-138,70	0,00
23:00	0,00	0,00	-109861,44	-42452,93	0,0011	150,00	120,00	12678,00	-139,37	0,00

Entre julio y septiembre se presenta el mayor balance térmico de todo el periodo anual, cuya máxima potencia de calefacción actual aumenta de **-200,24 kW** a **-197,91 kW** al aplicar la solución pasiva. Además, el promedio de potencia de calefacción posee una variación del **4,69 %** al aplicar el muro Trombe.

La necesidad de enfriamiento al aplicar el muro Trombe tiene un promedio de **5,97 kW**.

## 6.3.4 Potencia de calefacción y enfriamiento entre octubre y diciembre

**Tabla 8:** Cargas de calefacción y enfriamiento en el día de menor temperatura entre octubre y diciembre al aplicar solución pasiva

DÍA DE MENOR TEMPERATURA: OCTUBRE - DICIEMBRE CON SOLUCIÓN PASIVA										
Hora	Carga solar Directa [W]	Carga Solar Indirecta [W]	Carga Envoltante [W]	Carga Ventilación Sensible [W]	Carga Ventilación Latente [W]	Carga Interna Ocupantes Sensible [W]	Carga Interna Ocupantes Latente [W]	Carga Interna Artefactos + Iluminación [W]	Total Calefacción [kW]	Total Enfriamiento [kW]
0:00	0,00	0,00	-102734,75	-17041,80	0,0003	125,00	100,00	12678,00	-106,87	0,00
1:00	0,00	0,00	-107104,89	-17532,03	0,0003	125,00	100,00	12678,00	-111,73	0,00
2:00	0,00	0,00	-111811,19	-14700,71	0,0002	125,00	100,00	12678,00	-113,61	0,00
3:00	0,00	0,00	-115710,70	-12571,17	0,0002	125,00	100,00	12678,00	-115,38	0,00
4:00	0,00	0,00	-119879,14	-15343,94	0,0002	125,00	100,00	12678,00	-122,32	0,00
5:00	0,00	0,00	-122568,46	-10520,73	0,0001	125,00	100,00	12678,00	-120,19	0,00
6:00	0,00	0,00	-125123,31	-5205,98	0,0001	125,00	100,00	12678,00	-117,43	0,00
7:00	2686,47	790,93	-113069,79	-6402,42	0,0001	375,00	300,00	12678,00	-102,64	0,00
8:00	14487,53	4265,30	-91028,48	-3357,46	0,0001	13500,00	10800,00	12678,00	-38,66	0,00
9:00	26867,14	7910,01	-63953,11	-5936,64	0,0001	13500,00	10800,00	12678,00	1,87	0,00
10:00	37577,07	11063,14	-40169,13	-10226,17	0,0003	13500,00	10800,00	12678,00	0,00	35,22
11:00	45473,00	18071,04	-24021,12	-10075,25	0,0005	13500,00	10800,00	12678,00	0,00	66,43
12:00	49871,01	19818,82	-12547,15	-8701,61	0,0006	13500,00	10800,00	12678,00	0,00	85,42
13:00	50392,45	20026,04	-3787,03	-5631,03	0,0006	13500,00	10800,00	12678,00	0,00	97,98
14:00	46984,63	18671,77	-8130,62	-7408,12	0,0007	13500,00	10800,00	12678,00	0,00	87,10
15:00	40012,91	15901,20	-15377,99	-8426,57	0,0007	13500,00	10800,00	12678,00	0,00	69,09
16:00	45541,84	7099,20	-26157,78	-10491,59	0,0007	13500,00	10800,00	12678,00	0,00	52,97
17:00	27382,89	4268,53	-38233,15	-9948,40	0,0005	13500,00	10800,00	12678,00	0,00	20,45
18:00	8993,98	1402,01	-51891,19	-9135,25	0,0004	13500,00	10800,00	12678,00	-13,65	0,00
19:00	0,00	0,00	-61722,66	-6451,60	0,0002	375,00	300,00	12678,00	-54,82	0,00
20:00	0,00	0,00	-66832,36	-6241,09	0,0002	125,00	100,00	12678,00	-60,17	0,00
21:00	0,00	0,00	-71538,67	-5525,52	0,0002	125,00	100,00	12678,00	-64,16	0,00
22:00	0,00	0,00	-76110,51	-6857,78	0,0002	125,00	100,00	12678,00	-70,07	0,00
23:00	0,00	0,00	-80413,41	-10735,79	0,0003	125,00	100,00	12678,00	-78,25	0,00

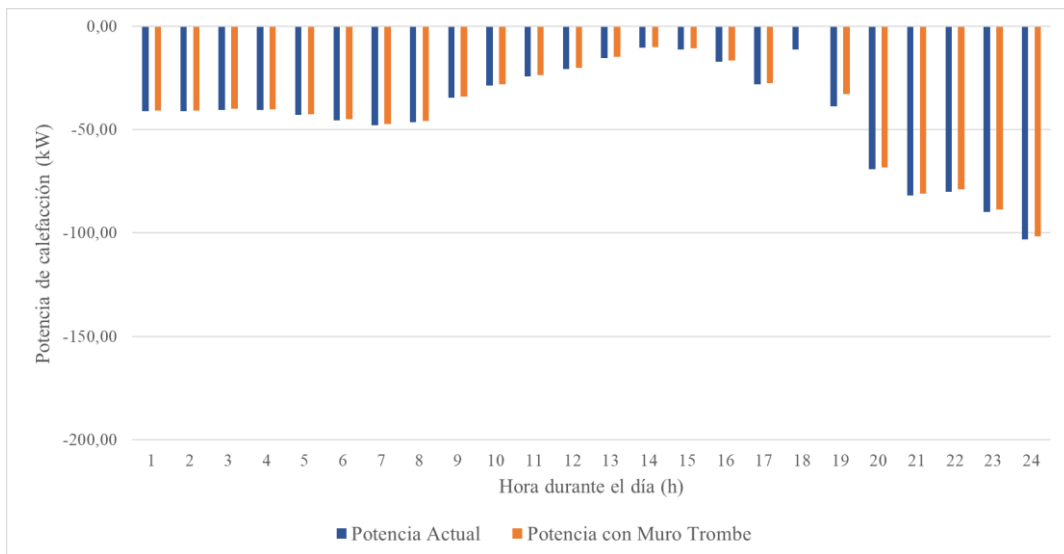
Finalmente, en el periodo de octubre a diciembre se tiene que el promedio de potencias de calefacción y enfriamiento son **-53,67 kW** y **21,44 kW** respectivamente, donde el incremento de potencia de calefacción promedio es de **4,18 %**.

Cabe destacar que las cargas internas sensibles y latentes por ocupantes varían según la época del año que se evalúa, debido que la cantidad de personas que hace uso del establecimiento educacional cambia según los meses en los que se realice la evaluación térmica. Por ejemplo, el flujo de gente entre abril y junio no es el mismo que de enero a marzo, ya que en este último el establecimiento educacional no realiza funciones educativas por periodo de vacaciones de verano. El flujo promedio de personas se detalla según horario y periodo anual en la **Tabla 13 del Anexo A**.

Las cargas de ventilación varían según la velocidad del viento (en m/s) de cada hora evaluada en los tramos anuales definidos.

La evaluación energética realizada en esta investigación abarca la obtención de potencias de calefacción y enfriamiento producidas en el establecimiento educacional actual y al implementar solución pasiva muro Trombe. Sin embargo, para cuantificar el enfriamiento requerido por la edificación al aplicar la solución se necesitan datos empíricos que faciliten el cálculo de cargas de ventilación, específicamente mediciones de velocidad y temperatura en los orificios del muro al presentar aumentos de temperatura debido a la convección producida en la cámara de aire. Por lo tanto, los resultados expuestos reflejan el aporte del muro Trombe a la potencia de calefacción, ya que parámetros como la radiación solar, materialidad, y temperaturas exteriores e interiores variables según la aplicación de la solución pasiva son conocidos y cuantificables a partir de las ecuaciones mostradas en la metodología de este documento.

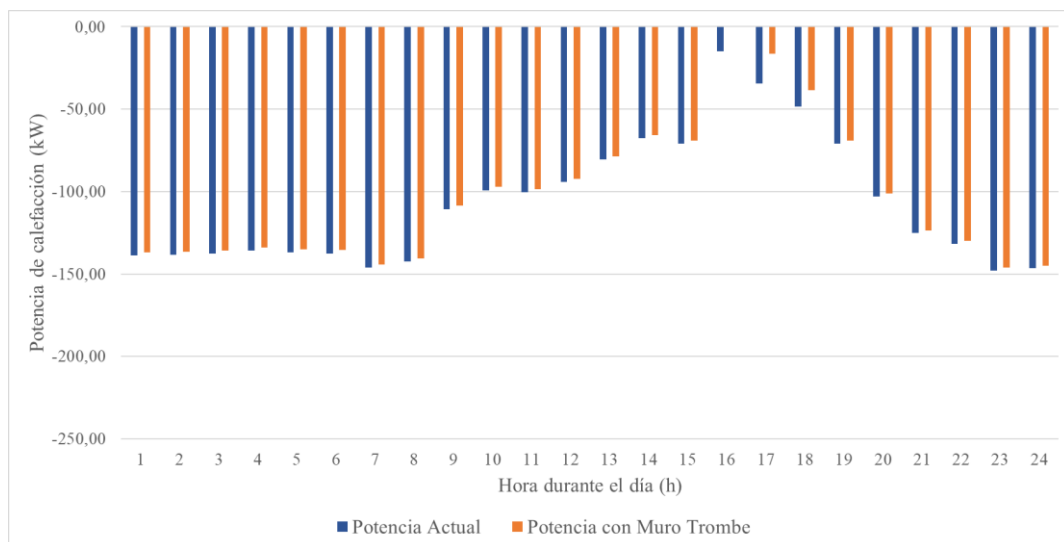
La **Figura 6** muestra lo que ocurre al implementar el muro Trombe en el periodo de enero a marzo, donde la potencia de calefacción promedio aumenta en un **3,14 %**. En otras palabras, en promedio se necesita un **3,14 %** menos de potencia para calefaccionar el establecimiento. Estos valores se obtienen a partir de la comparación entre **Tabla 5** expuesta anteriormente y **Tabla 26** de **Anexo G**.



**Figura 6:** Variación de potencia de calefacción al aplicar muro Trombe en periodo enero – marzo.

**Fuente:** Elaboración propia.

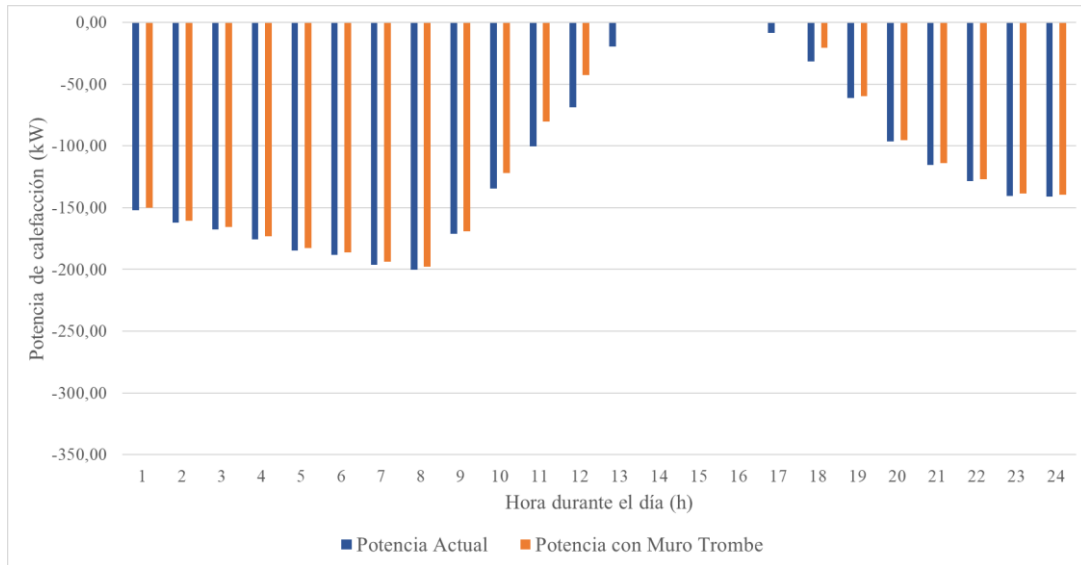
De la misma manera, de los valores expuestos en **Tabla 6** y **Tabla 27** de **Anexo G** se obtiene la **Figura 7**, en la que se refleja un aumento promedio en la potencia de calefacción de un **3,15 %** entre abril y junio.



**Figura 7:** Variación de potencia de calefacción al aplicar muro Trombe en periodo abril – junio.

**Fuente:** Elaboración propia.

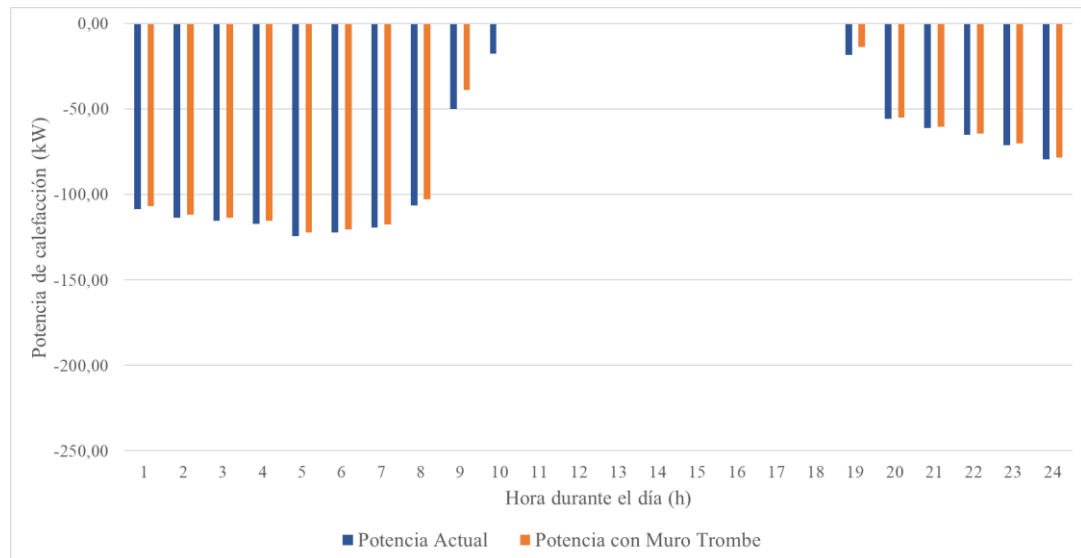
La **Figura 8** muestra la relación entre los valores obtenidos de **Tabla 28 de Anexo G** y **Tabla 7** de resultados, donde el aumento promedio de potencia de calefacción asciende a un **4,69 %** en el periodo entre julio y septiembre.



**Figura 8:** Variación de potencia de calefacción al aplicar muro Trombe en periodo julio – septiembre

**Fuente:** Elaboración propia.

Finalmente, la **Figura 9** muestra la comparación de resultados de la **Tabla 29 de Anexo G** y **Tabla 8** de este apartado, donde el porcentaje de aumento promedio de potencia de calefacción es de un **4,04 %** en el periodo de octubre a diciembre.



**Figura 9:** Variación de potencia de calefacción al aplicar muro Trombe en periodo octubre – diciembre

**Fuente:** Elaboración propia.

Como se observa en la figura anterior, existen horarios en los que la implementación del muro Trombe es suficiente para cubrir la pérdida de energía que se produce (10:00 hrs.), donde el valor de la potencia de calefacción pasa de **-17,61 kW** a **0 kW** aplicando la solución pasiva.

Cabe destacar que las cargas que varían debido a la implementación de la solución pasiva son las cargas solares indirectas y las cargas de envolvente. La carga solar indirecta aumenta en aquellos horarios donde el sol incide por la orientación norte, ya que los muros Trombe se aplican hacia esta dirección, mientras que la variación en

la potencia de envolvente se genera debido a la diferencia de temperaturas exteriores e interiores dependiendo de la materialidad y transmitancia térmica que posea el elemento.

En la **Tabla 9** se muestra variación de la carga solar indirecta a lo largo del año al aplicar la solución pasiva en el establecimiento educacional.

**Tabla 9:** Carga Solar Indirecta actual y al aplicar solución pasiva

CARGA SOLAR INDIRECTA ANUAL								
Hora	Enero - marzo		Abril - junio		Julio - septiembre		Octubre - diciembre	
	Carga Actual (kW)	Carga con Muro Trombe (kW)	Carga Actual (kW)	Carga con Muro Trombe (kW)	Carga Actual (kW)	Carga con Muro Trombe (kW)	Carga Actual (kW)	Carga con Muro Trombe (kW)
0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
0,03	0,03	0,00	0,00	0,00	0,00	4,27	4,27	0,03
0,06	0,06	0,04	0,04	4,50	4,50	7,91	7,91	0,06
0,10	0,10	0,08	0,08	8,04	8,04	11,06	11,06	0,10
0,12	0,12	0,10	0,14	10,66	10,66	14,58	18,07	0,12
0,15	0,19	0,13	0,16	13,39	16,59	15,99	19,82	0,15
0,18	0,22	0,13	0,17	13,98	17,32	16,16	20,03	0,18
0,15	0,19	0,13	0,16	13,34	16,53	15,07	18,67	0,15
0,13	0,16	10,81	13,40	11,51	14,26	12,83	15,90	0,13
0,10	0,13	5,80	5,80	6,33	6,33	7,10	7,10	0,10
4,81	4,81	2,86	2,86	3,45	3,45	4,27	4,27	4,81
1,79	1,79	0,00	0,00	0,00	0,00	1,40	1,40	1,79
0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00

Como se observa en la Tabla anterior, hay tramos en los que no existe variación de cargas solares indirectas. Esto se debe a que el funcionamiento del muro Trombe es más eficiente si se orienta hacia el norte, por lo que sólo en algunas horas del día se considera el aporte realizado por la solución pasiva.

En general, según lo mostrado el rango horario donde la incidencia solar en la orientación norte se considera nula es de 00:00 a 10:00 horas y de 17:00 a 23:00 horas, lo que, en promedio, permite el funcionamiento óptimo de la solución pasiva durante 7 horas. Además, la variación promedio en las cargas solares indirectas producidas durante el año con la implementación del muro Trombe aumenta en un **10,17 %**.

En la **Tabla 10** se muestran los promedios de las cargas solares indirectas durante el año con y sin solución pasiva, notando que el mayor aumento se produce en el tramo de octubre a diciembre con un **13,81 %**.

**Tabla 10:** Promedios de Cargas Solares Indirectas durante el año

Época del año	Carga Solar Indirecta Actual (kW)	Carga Solar Indirecta con Muro Trombe (kW)	Aumento Carga Solar Indirecta (%)
Enero - marzo	0,32	0,32	2,19
Abril - junio	0,84	0,95	11,91
Julio - septiembre	3,55	4,07	12,79
Octubre - diciembre	4,64	5,39	13,81

Para cuantificar la pérdida de energía para elementos de envolvente en los que no se aplica solución pasiva se utiliza la **Ecuación 4** del **Anexo A**. Por otro lado, para obtener la potencia que aporta el muro Trombe a la

envolvente de la edificación se realiza el proceso mostrado en el apartado **4.2** de esta investigación, cuyas temperaturas utilizadas para el cálculo en los periodos definidos se muestran en el **Anexo E**.

Al evaluar la forma de calefaccionar el establecimiento educacional, la carga de envolvente es la más relevante debido a que es donde se producen las mayores pérdidas de potencia.

La **Tabla 11** muestra la diferencia en las cargas de envolvente producidas durante el día en los diferentes tramos del año al implementar la solución pasiva muro Trombe.

**Tabla 11:** Carga de Envolvente actual y al aplicar solución pasiva

CARGA ENVOLVENTE ANUAL								
Hora	Enero - marzo		Abril - junio		Julio - septiembre		Octubre - diciembre	
	Carga Actual (kW)	Carga con Muro Trombe (kW)	Carga Actual (kW)	Carga con Muro Trombe (kW)	Carga Actual (kW)	Carga con Muro Trombe (kW)	Carga Actual (kW)	Carga con Muro Trombe (kW)
0:00	-48,59	-48,14	-109,76	-108,11	-125,53	-123,58	-104,27	-102,73
1:00	-48,73	-48,28	-112,64	-110,94	-127,11	-125,12	-108,73	-107,10
2:00	-48,46	-48,01	-114,83	-113,09	-130,06	-128,01	-113,53	-111,81
3:00	-49,76	-49,28	-117,78	-115,98	-133,35	-131,24	-117,51	-115,71
4:00	-50,92	-50,43	-121,83	-119,95	-137,26	-135,07	-121,76	-119,88
5:00	-52,36	-51,84	-126,01	-124,05	-140,48	-138,23	-124,50	-122,57
6:00	-53,60	-53,05	-130,40	-128,35	-142,06	-139,78	-127,11	-125,12
7:00	-53,67	-53,12	-134,86	-132,72	-144,87	-142,54	-116,69	-113,07
8:00	-53,53	-52,92	-132,25	-130,17	-139,93	-137,70	-102,42	-91,03
9:00	-49,76	-49,14	-127,04	-124,96	-129,24	-116,77	-83,43	-63,95
10:00	-44,34	-43,75	-119,64	-117,62	-116,48	-96,07	-66,63	-40,17
11:00	-39,34	-38,78	-112,30	-110,36	-104,41	-78,14	-55,66	-24,02
12:00	-34,74	-34,23	-104,89	-103,07	-93,58	-63,74	-47,02	-12,55
13:00	-31,24	-30,75	-99,20	-97,48	-85,01	-54,09	-38,44	-3,79
14:00	-31,11	-30,67	-92,55	-90,97	-77,81	-48,39	-40,50	-8,13
15:00	-35,63	-35,15	-87,82	-63,58	-71,77	-46,37	-43,04	-15,38
16:00	-43,86	-43,28	-91,73	-73,68	-75,13	-55,86	-47,08	-26,16
17:00	-51,34	-36,95	-97,42	-87,75	-80,14	-69,11	-51,06	-38,23
18:00	-61,00	-55,15	-103,38	-101,86	-84,80	-83,64	-56,55	-51,89
19:00	-70,67	-69,79	-105,78	-104,21	-90,97	-89,69	-62,45	-61,72
20:00	-78,56	-77,52	-108,39	-106,77	-97,28	-95,88	-67,66	-66,83
21:00	-81,17	-80,08	-109,14	-107,51	-102,49	-100,99	-72,46	-71,54
22:00	-88,43	-87,20	-109,35	-107,71	-108,11	-106,50	-77,12	-76,11
23:00	-97,62	-96,21	-107,63	-106,03	-111,54	-109,86	-81,51	-80,41

Para conocer el aporte del muro Trombe se tiene la **Tabla 12**, donde se muestran los promedios de carga de envolvente actual y al aplicar la solución pasiva en los distintos tramos del año.

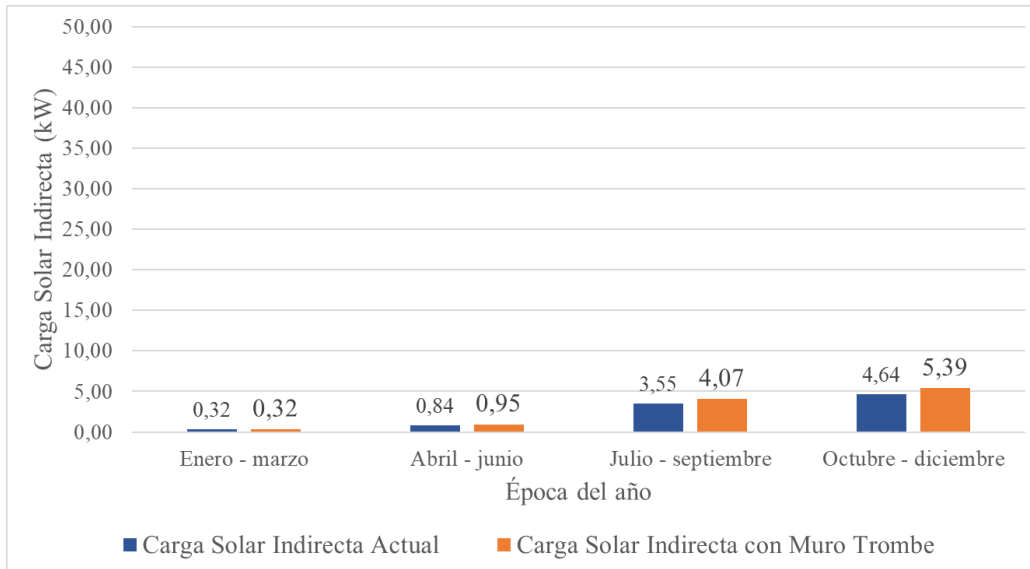
El mayor aumento de potencia se produce entre octubre y diciembre con un **14,38 %**, disminuyendo la demanda de potencia de calefacción en **11,55 kW**.

**Tabla 12:** Promedio de Cargas de Envolvente durante el año

Época del año	Carga Envolvente Actual (kW)	Carga Envolvente con Muro Trombe (kW)	Aumento Carga Envolvente (%)
Enero - marzo	-54,10	-52,66	2,67
Abril - junio	-111,53	-107,79	3,35
Julio - septiembre	-110,39	-100,68	8,80
Octubre - diciembre	-80,30	-68,75	14,38
<b>Aporte promedio del muro Trombe durante el año</b>			<b>7,30</b>

Finalmente, se tiene que el aporte promedio de potencia de calefacción anual del muro Trombe al establecimiento es de un **3,79 %**, es decir, se necesitaría un **3,79 %** menos de potencia para calefaccionar el lugar en favor de encontrar el confort térmico.

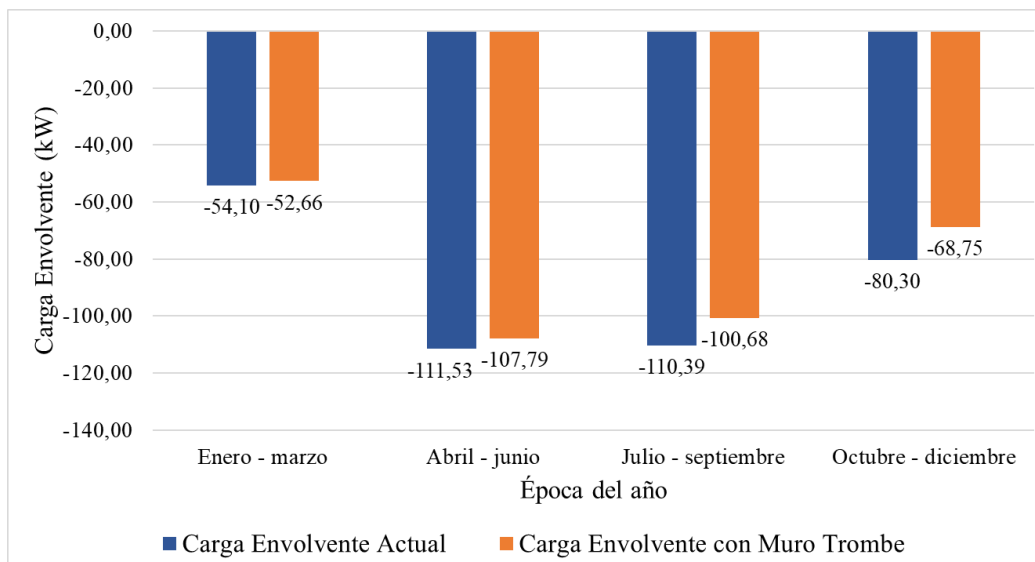
En la **Figura 10** se muestra de manera gráfica la diferencia entre los promedios de cargas solares indirectas durante los periodos definidos durante el año, notando un máximo de **2,17 kW** producido entre octubre y diciembre.



**Figura 10:** Diferencia en Carga Solar Indirecta durante el año al implementar muro Trombe.

**Fuente:** Elaboración propia.

De la misma manera se define el promedio de carga de envoltorio para cada tramo durante el año en la **Figura 11**, mostrando que la solución pasiva es útil para disminuir la demanda de potencia de calefacción debido a que reduce las pérdidas de energía en cantidades considerables asumiendo que la superficie intervenida del establecimiento educacional es baja (**18,7%** de la superficie orientada al norte).



**Figura 11:** Diferencia en Carga Envoltorio durante el año al implementar muro Trombe.

**Fuente:** Elaboración propia.

Finalmente, en **Tabla 25** del **Anexo F** se tiene el Análisis de Precio Unitario de la solución pasiva muro Trombe, cuyo costo por metro cuadrado es de **\$50.509**, por lo que intervenir los muros analizados con una superficie total de **89,7 m<sup>2</sup>** tiene un costo total de **\$4.528.929**.

## 7 DISCUSIÓN

Al comparar el establecimiento educacional cuando se encuentra sin intervenciones y al implementar el muro Trombe, se tiene un crecimiento anual en la potencia de calefacción de un **3,79 %**. En otras palabras, se necesita un **3,79 %** menos de potencia para calefaccionar el lugar, por lo que considerando que la solución pasiva sólo se aplica en **87,9 m<sup>2</sup>** de la superficie total orientada al norte que consta de aproximadamente 470 m<sup>2</sup> en su totalidad, es un cambio significativo debido a que sólo se debe intervenir constructivamente un **18,7%** de la envolvente.

Por otro lado, el muro Trombe genera aumento de temperatura dentro de la cámara de aire entre el exterior del muro y el vidrio que se ubica a 6 cm hacia el exterior de la envolvente, efecto producido sólo en presencia de radiación solar incidente. Esta temperatura es mayor que la temperatura exterior, mostrando un aumento de hasta 4 °C aproximadamente en algunos casos. Los valores de las temperaturas obtenidas en el muro Trombe respecto a la exterior se exponen en la **Tabla 21 del Anexo E**.

De **Tabla 26 y Tabla 5** se muestra un aumento en la potencia de calefacción de un **3,14 %** entre enero y marzo de 2022. Esta disminución en el requerimiento energético para calefaccionar el lugar se ve reflejado en la **Figura D1**, donde aquellos horarios que no poseen cargas descritas reflejan que no existe la necesidad de calefaccionar sino que se necesita enfriar o ventilar el lugar debido a que no se pierde energía y las ganancias son superiores por lo que se definen como potencia de enfriamiento, parámetro que no es evaluado cuantitativamente en esta investigación.

Al comparar los resultados de **Tabla 29 y Tabla 8** se tiene lo mostrado en la **Figura 9**, donde se evalúan los meses de octubre a diciembre, época del año en la que la necesidad de calefaccionar es menor, y durante 8 horas este parámetro no se evalúa debido a que no existen pérdidas de potencia. Además, el porcentaje de aumento en la potencia de calefacción durante estos meses, en promedio, es de **4,04 %**.

Cabe destacar que sólo las cargas solares indirectas y de envolvente se ven modificadas al aplicar la solución pasiva, por lo que el resto de los resultados se mantienen constantes entre tramos mensuales definidos.

Según la **Tabla 26 del Anexo G**, la potencia de calefacción presente entre enero y marzo es la menor que se da durante el año en estudio, lo que se debe a las altas temperaturas debido a la cercanía con la estación de verano donde el calor es predominante la mayor parte del tiempo. La mayor pérdida de potencia tiene un valor de **103,06 kW**, que se da a las 23:00 horas del periodo evaluado, la cual disminuye a **101,65 kW** al implementar la solución pasiva. Además, el único horario en el que existe una demanda de enfriamiento es a las 17:00 hrs., llegando a un valor de **3,18 kW**.

En el caso del tramo entre abril y junio mostrado en **Tabla 27 del Anexo G**, se observa un aumento en la potencia de calefacción y una disminución en la necesidad de enfriar el lugar respecto al tramo de enero a marzo. La única potencia de enfriamiento se da a las 15:00 hrs., que tiene un valor de **11,76 kW**, mientras que la potencia de calefacción aumenta, en promedio, de **-106,64 kW a -103,28 kW**. Además, durante el tramo de abril a junio, en la situación actual del establecimiento educacional evaluando el día más frío, no existe demanda de enfriamiento, por lo que durante todo el día (las 24 horas) sólo se demanda calefacción en la edificación, motivo por el cual se analiza a través de la calefacción ya que es el parámetro de mayor relevancia.

En los tramos de julio a septiembre y de octubre a diciembre, debido a que las temperaturas aumentan, disminuye la cantidad de horas en las que es necesario calefaccionar el establecimiento educacional actualmente, obteniendo valores de enfriamiento de **0,37 kW y 11,49 kW**, respectivamente. Además, la potencia de calefacción promedio actual en el tercer y cuarto cuatrimestre es de **-115,92 kW y -56,01 kW**, respectivamente, mientras que al implementar la solución pasiva aumentan a **-104,94 kW y -53,75 kW**.

Finalmente, la demanda actual de calefacción y enfriamiento resultan en **91,7 W/m<sup>2</sup>** y **38,5 W/m<sup>2</sup>** respectivamente, que al implementar la solución pasiva Muro Trombe disminuye la demanda de calefacción a **-88,6 W/m<sup>2</sup>**.

Por otro lado, según el cálculo de la HdeC del establecimiento educacional, se tiene que el material con mayor emisión de GEI es el hormigón con **226.468,2 kgCO<sub>2</sub>eq**, seguido por el cerámico y la cubierta instapanel que poseen **60.745,84 y 39.170,43 kgCO<sub>2</sub>eq**, respectivamente. Además, la diferencia de emisiones de GEI al implementar la solución pasiva es baja, ya que sin intervenciones a la edificación, la HdeC resulta en **368,1 TonCO<sub>2</sub>eq**, mientras que al aplicar el muro Trombe se aumenta sólo en un **0,16%** este indicador.

## 8 CONCLUSIONES

El concepto de solución pasiva invita a construir de manera sustentable y solucionar problemas de confort térmico a través del uso de energía natural y el aprovechamiento de la radiación solar, generando un menor costo energético y evitando recurrir a recursos no renovables para solventar las necesidades de enfriamiento o calefacción de una edificación debido a las bajas temperaturas que hay durante el año en la Región del Biobío (en promedio de  $7,3^{\circ}\text{C}$  entre abril y septiembre).

Los cálculos se realizaron considerando los días con menor temperatura a lo largo del año, donde se evaluó tanto la necesidad de calefacción como de enfriamiento en la edificación. Según esto, la mayor demanda anual de potencia de calefacción (tramo del año en el que es necesario aumentar la potencia) que actualmente requiere el establecimiento educacional resulta entre julio y septiembre, con un promedio cuatrimestral de **115,92 kW** (Tabla 28 de Anexo G), que disminuye a **104,94 kW** al implementar la solución pasiva. Por otro lado, la menor demanda de potencia de calefacción ocurre entre enero y marzo (Tabla 26 de Anexo G), donde el promedio de calefacción es de **42,11 kW** que baja a **40,79 kW** con el Muro Trombe.

Respecto a la mayor demanda anual de potencia de enfriamiento (tramo del año en el que es necesario reducir la potencia) del establecimiento, se obtiene que los meses entre octubre y diciembre es donde se necesita enfriar mayormente el lugar, con un promedio de **11,49 kW** (Tabla 29 de Anexo G). Por otro lado, de enero a marzo (Tabla 26 de Anexo G), pese a que también es época de verano, la necesidad de enfriamiento es nulo debido a la baja radiación solar y temperatura existente en el día más frío del tramo.

En cuanto a la implementación del muro Trombe, que tiene un costo total de **\\$4.528.929** (considerando **89,7 m<sup>2</sup>**), las cargas que varían son las solares indirectas y las de envolvente, siendo esta última la más relevante debido a que representa en su totalidad la capacidad de disminución de pérdidas de potencia en el establecimiento educacional, por lo que aumentar la potencia de calefacción a través de la intervención en la envolvente térmica es primordial para que el consumo energético sea menor al calefaccionar la edificación durante el año.

Cabe destacar que el aporte del muro Trombe se evalúa a través de la envolvente del edificio, donde, en promedio, la solución pasiva produce un aumento de potencia de calefacción anual del **7,3 %**, es decir, existe un **7,3 %** de disminución de pérdida de potencia por envolvente. Además, entre octubre y diciembre es donde se genera un mayor aumento de potencia de calefacción con un **14,38 %**, mientras que el menor aumento ocurre entre enero y marzo con un **2,67 %**. Por otro lado, el muro Trombe evaluado teóricamente se compara con valores empíricos obtenidos de la Universidad del Biobío respecto a la temperatura, donde se determina que en 3 días distintos, en promedio, el muro Trombe genera un aumento en la temperatura interior de **2,7°C** respecto a la exterior, mientras que según lo calculado en esta investigación, la diferencia de temperatura entre interior y exterior es de **2,5°C** en los mismos días evaluados (15, 22 y 29 de abril), por lo tanto se tiene una diferencia del **8%** entre valores teóricos y experimentales, notando que pese a la baja cantidad de valores comparados, los resultados se acercan a un muro Trombe ya construido en la misma zona de estudio (Provincia de Concepción, Región del Biobío).

En base a los resultados obtenidos, y tomando en cuenta que la superficie a intervenir sólo cubre un **18,7%** de la envolvente orientada al norte del edificio, y un **8,81 %** de la superficie total de muros externos, la solución pasiva muro Trombe es viable para calefaccionar el lugar debido a que la demanda de calefacción necesaria actual es de **93,7 W/m<sup>2</sup>**, que disminuye a **88,7 W/m<sup>2</sup>** al implementar la solución Muro Trombe, generando un aporte del **5,3 %** en la generalidad de la edificación. Respecto a la demanda de enfriamiento, se obtiene un valor de **37,4 W/m<sup>2</sup>**.

Finalmente, se realiza el cálculo de HdeC de la edificación al implementar la propuesta de solución pasiva muro Trombe, el que arroja un total de emisiones en el establecimiento de **368.777,54 kgCO<sub>2</sub>eq**, donde el material con mayor emisión de GEI en su ciclo de vida es el hormigón con un **61,41%**, seguido por el cerámico con un **16,47%** y la cubierta instapanel con un **10,62%** de las emisiones de CO<sub>2</sub>.

Según lo anterior, la diferencia de emisiones de GEI al implementar la solución pasiva es acotado, ya que, sin intervenciones en la edificación, la HdeC resulta en **368,1 TonCO<sub>2</sub>eq**, mientras que al aplicar el muro Trombe se aumenta en **0,16%** este indicador. Por lo tanto, debido a que durante el funcionamiento del muro no se emiten GEI y sólo existe un aumento de **677,54 kgCO<sub>2</sub>eq** durante la producción de esta solución, la propuesta es viable como alternativa constructiva en la búsqueda de tecnologías que emitan menor cantidad de GEI.

## 9 REFERENCIAS

### 9.1 Bibliografía

**Acuña H., Easton P., Ramos C. y Torres, C.** (2019). El Sector de la Construcción ante el Desafío Climático Global. Serie Fundamenta. Cámara Chilena de la Construcción A.G.

**Álvarez Gallego, S.** (2017). La huella de carbono y el análisis de ciclo de vida. AENOR - Asociación Española de Normalización y Certificación. Vol,5, N°1, p,p, 10-11.

**Álvarez Medina, D.** (2015). Estudio de muros Trombe del tipo simple de circulación delantera y su influencia en el confort térmico. Ambato, Tungurahua, Universidad técnica de Ambato.

**Bustamante W.** (2009). Guía de Diseño para la Eficiencia Energética de la Vivienda Social, Ministerio de Vivienda y Urbanismo. División Técnica de Estudio y Fomento Habitacional (MINVU) y Programa de Eficiencia Energética (CNE).

**Cahn D.** (1997). Atmospheric CO<sub>2</sub> and the U.S, Cements Industry, World Cements. Vol,28, N°8, p,p, 64-68.

**Duffie J, y Beckman, W.** (2013). Solar Engineering of Thermal Processes, 4ta, Ed., Madison: John Wiley & Sons, Inc, p, 910.

**EPA.** Inventory of U.S, greenhouse gas emissions and sinks: 1990–2016, EPA 430-P-18-001; 2018.

**Frohmann, A. y Olmos X.** (2013). Huella de carbono, exportaciones y estrategias empresariales frente al cambio climático. Naciones Unidas, CEPAL.

**García Ochoa, J. A., Quito Rodriguez, J. C., & Perdomo Moreno, J. A.** (2019). Análisis de la huella de carbono en la construcción y su impacto sobre el ambiente. Villavicencio: Universidad Cooperativa de Colombia.

**Guerrero Pérez, R.** (2016). Edificación y eficiencia energética en los edificios (UF0569). IC Editorial.

**Hernández-López, I. Xamán, J. Chávez, I.** (2016). Almacenamiento y pérdidas de energía térmica en un sistema de pared de muro Trombe ubicado en México. Energy, vol 109, pp, 512-524.

**Kibert CJ.** (2016). Sustainable construction: green building design and deliver. 4th edition New Jersey: John Wiley & Sons.

**Lopez de Ponce, A.** (2013). Necesidades energéticas y propuestas de instalaciones solares. Antequera: IC Editorial, p.395.

**Mardones, S.** (2020). Cálculo de potencia de calefacción y huella de carbono de la Escuela Almirante Patricio Lynch E-596 Lirquén, para la evaluación energética y propuesta de soluciones. Departamento de Ingeniería Civil, Universidad Católica de la Santísima Concepción, Chile.

**Santiago Díaz, V.** (2011). Acondicionamiento térmico de edificios: eficiencia y uso racional de la energía (2a, ed.), Editorial Nobuko.

**Schallenberg J., Piernavieja G., Hernández C., Unamunzaga P.** (2008). Energías renovables y eficiencia energética, 1ra Ed., Instituto Tecnológico de Canarias, S.A.

**Velayos Castelo, C.** (2008). Ética y cambio climático. Editorial Desclée de Brouwer, Vol.1, p.p. 22.

**Wiedmann, T., y Jan Minx** (2007). A Definition of 'Carbon Footprint'. ISA Reino Unido Research Report, 07- 01. ISA Reino Unido Research & Consulting.

**Proyecto RECONSOST.** 2007. AICIA 'Asociación de Investigación y Cooperación Industrial de Andalucía'.

### 9.2 Linkografía

- [https://repositorio.cepal.org/bitstream/handle/11362/5686/S1100969\\_es.pdf?sequen](https://repositorio.cepal.org/bitstream/handle/11362/5686/S1100969_es.pdf?sequen)
- <https://bibdigital.epn.edu.ec/handle/15000/17509>
- <https://extension.cchc.cl/datafiles/21539-2.pdf>
- <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0360544216305424?via%3Dihub>
- [https://cchc.cl/uploads/archivos/archivos/Fundamenta\\_45.pdf](https://cchc.cl/uploads/archivos/archivos/Fundamenta_45.pdf)

**ANEXOS****10 ANEXO A****10.1 Balance térmico de Cargas Solares, Q<sub>s</sub>**

Díaz (2011), indica que cuando los rayos del sol repercuten de forma perpendicular en una superficie opaca tienen menos posibilidad de ser reflejados que si toman una orientación con ángulo diferente. Esta energía aumenta la temperatura superficial, lo que a su vez provoca una mayor transmisión de calor al interior del edificio.

Las ganancias de calor se pueden dar de forma directa e indirecta, es decir, a través de superficies opacas o transparentes, respectivamente.

**10.1.1 Carga solar directa, Q<sub>sr</sub>,**

La componente de carga solar directa origina ganancia de calor sólo cuando las ventanas son atravesadas por los rayos solares, incidiendo en el interior de la edificación, generando un aumento en la temperatura del lugar. En la **Ecuación 5** se expresa la obtención de este parámetro.

$$\dot{Q}_{sr} = S * R * \theta \quad (5)$$

Donde:

S: Superficie de cristal expuesta a la radiación (m<sup>2</sup>).

R: Radiación solar que atraviesa la superficie de cristal (W/m<sup>2</sup>).

$\theta$ : Coeficiente de ganancia solar que depende del tipo de vidrio.

**10.1.2 Carga solar indirecta, Q<sub>srt</sub>**

La carga solar indirecta es causada por la radiación solar absorbida por las superficies exteriores opacas (muros y techos), y por un diferencial de temperaturas entre el aire exterior e interior. En la **Ecuación 6** se expresa la obtención del parámetro descrito.

$$\dot{Q}_{srt} = U * S * (R * \alpha * R_{so}) \quad (6)$$

Donde:

U: Transmitancia térmica del elemento (W/m<sup>2</sup>K).

S: Superficie exterior opaca expuesta a la diferencia de temperatura (K).

R: Radiación solar total de incidencia (W/m<sup>2</sup>).

$\alpha$ : Absortancia de la superficie [0-1].

R<sub>so</sub>: Resistencia de la película exterior de aire.

**10.2 Balance térmico de Cargas de la Envolvente, Q<sub>c</sub>**

Las cargas de la envolvente térmica se determinan a través de la interacción entre la construcción (generalmente externa) y el ambiente exterior. Este flujo térmico se muestra en la **Figura 4**, relacionando los elementos de la envolvente con el exterior de esta.

En la **Ecuación 7** se muestra la obtención del parámetro descrito anteriormente.

$$Q_c = U * S * (T_{ext}^{\circ} - T_{int}^{\circ}) \quad (7)$$

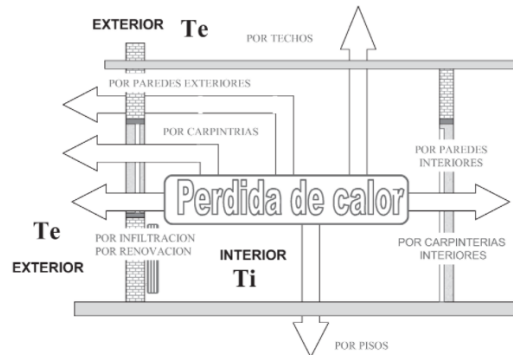
Donde:

U: Transmitancia térmica del elemento ( $W/m^2K$ ).

S: Superficie expuesta al diferencial de temperatura ( $m^2$ ).

$T_{ext}$ : Temperatura de aire exterior (K).

$T_{int}$ : Temperatura de aire interior (K).



**Figura 4:** Esquema pérdida de calor de la envolvente térmica.  
**Fuente:** Acondicionamiento térmico de edificios, (Díaz, S, 2011).

### 10.3 Balance térmico de Cargas Internas, $Q_i$

Las cargas internas provienen de diversas fuentes de calor que se encuentran en una edificación o vivienda. Estas fuentes incluyen tanto a diversos artefactos eléctricos y de iluminación, como a las personas que generan el uso del espacio habitable.

Respecto a las ganancias de calor generadas por estos factores, si bien en invierno favorecen a la calefacción de un lugar acondicionado, en época de verano evitan un confort térmico si no se tienen las consideraciones necesarias respecto a una correcta ventilación.

Las ganancias correspondientes a este parámetro se describen según lo mostrado en la **Ecuación 8**.

$$\dot{Q}_i = Q_{ip} + Q_{ii} + Q_{iid} + Q_{ie} \quad (8)$$

Donde:

$Q_{ip}$ : Carga interna por ocupantes del lugar (W).

$Q_{ii}$ : Carga interna por iluminación incandescente (W).

$Q_{iid}$ : Carga interna por iluminación de descarga (W).

$Q_{ie}$ : Carga interna por artefactos (W).

#### 10.3.1 Carga interna por ocupantes, $Q_{ip}$

Estas cargas corresponden a aquellas que aportan las personas en el interior de las edificaciones, las cuales pueden ser latentes (**Ecuación 9**) o sensibles (**Ecuación 10**), Estas originan las siguientes cargas térmicas:

- Respiración: Se origina calor a través del aire exhalado, el cual se encuentra a mayor temperatura que el inhalado.
- Radiación: Se debe a que, en general, la temperatura media del cuerpo supera a la de los objetos que lo rodean al interior de una edificación habitable.
- Convección: Debido a que la superficie de la piel de una persona se encuentra a mayor temperatura que el aire que la rodea, generando corrientes de aire convectivas que aportan calor.
- Conducción: Se origina a través del contacto del cuerpo con los elementos que se encuentren alrededor.
- Evaporación: Debida a la evaporación cutánea de las personas, la cual toma una mayor relevancia en época de verano.

Los parámetros se expresan de forma gráfica en la **Figura 5**, y según lo mencionado anteriormente se tiene lo siguiente.

$$\dot{Q}_{ipl} = n * C_{latente, persona} \quad (9)$$

Donde:

n: Número de usuarios estimados en el recinto.

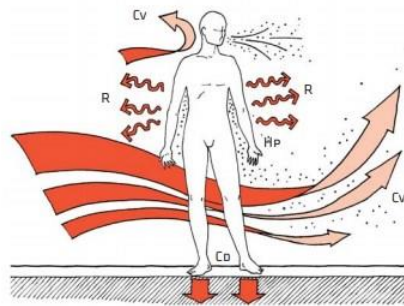
$C_{latente, persona}$ : Calor latente por persona según actividad realizada (W).

$$\dot{Q}_{ips} = n * C_{sensible, persona} \quad (10)$$

Donde:

n: Número de usuarios estimados en el recinto.

$C_{sensible, persona}$ : Calor sensible por persona según actividad realizada (W).



**Figura 5:** Intercambio de calor entre ser humano y su entorno.

**Fuente:** Guía de Diseño para la Eficiencia Energética en la Vivienda Social (Bustamante, W. 2009).

Además, en la **Tabla 13** se muestra el flujo de personas considerado a lo largo del año en la edificación.

**Tabla 13:** Flujo de personas en el establecimiento según periodo anual

Hora	Enero – Marzo	Abril - junio	Julio - septiembre	Octubre - diciembre
0:00	1	3	3	3
1:00	1	3	3	3
2:00	1	3	3	3
3:00	1	3	3	3
4:00	1	3	3	3
5:00	1	3	3	3
6:00	1	3	3	3
7:00	3	9	9	8
8:00	108	325	270	270
9:00	108	325	270	270
10:00	108	325	270	270
11:00	108	325	270	270
12:00	108	325	270	270
13:00	108	325	270	270
14:00	108	325	270	270
15:00	108	325	270	270
16:00	108	325	270	270
17:00	108	325	270	270
18:00	108	325	270	270
19:00	3	9	9	8
20:00	1	3	3	3
21:00	1	3	3	3
22:00	1	3	3	3
23:00	1	3	3	3

### 10.3.2 Carga interna por iluminación, $Q_{ii}$

Esta carga corresponde a aquella energía generada por la potencia de las ampollas del lugar, las cuales emiten energía calórica al ambiente interno de la edificación.

Para este parámetro se tienen dos casos, cuando la carga interna sensible de iluminación es producida por lámparas incandescentes (**Ecuación 11**) y por lámparas de descarga (**Ecuación 12**).

La carga interna sensible de iluminación para lámparas incandescentes se describe a continuación.

$$\dot{Q}_{iii} = n * Pot_{lámpara\ incandescente} \quad (11)$$

Donde:

$n$ : Número de lámparas de cada tipo (cantidad).

$Pot_{lámpara\ incandescente}$ : Potencia de la bombilla de lámpara incandescente (W).

La carga interna sensible de iluminación para lámparas de descarga se expresa como sigue.

$$\dot{Q}_{iid} = 1,25 * n * Pot_{lámpara\ descarga} \quad (12)$$

Donde:

$n$ : Número de lámparas de cada tipo (cantidad).

$Pot_{lámpara\ descarga}$ : Potencia de la bombilla de lámpara descarga (W).

### 10.3.3 Carga interna por artefactos, $Q_{ie}$

La carga interna por artefactos es aquella que corresponde a la sumatoria de las potencias de los aparatos eléctricos emisores de calor que se encuentran en la edificación. En la **Ecuación 13** se muestra la obtención de este parámetro,

$$\dot{Q}_{ie} = \sum n * C_{artefacto} \quad (13)$$

Donde:

$n$ : Número de artefactos en el recinto.

$C_{artefacto}$ : Carga térmica sensible de cada artefacto a considerar (W).

## 10.4 Balance térmico de Cargas de Ventilación, $Q_v$

Son aquellas producidas por infiltraciones y/o ventilaciones desde el exterior al interior de una edificación, lo que provoca un cambio en la humedad.

### 10.4.1 Carga de ventilación sensible, $Q_{vs}$

Estas cargas son producidas a través del ingreso del aire exterior a la edificación, lo que renueva el aire interno expulsándolo hacia afuera. En la **Ecuación 14** se muestra los parámetros de los que depende la carga de ventilación sensible.

$$\dot{Q}_{vs} = C_{e,aire} * V_{infil} * \rho * \Delta T \quad (14)$$

Donde:

$C_{e,aire}$ : Calor específico del aire (1012 J/Kg°C).

$V_{infil}$ : Caudal de aire de ventilación (m<sup>3</sup>/s).

$\rho$ : Densidad del aire (1,18 Kg/m<sup>3</sup>).

$\Delta T$ : Diferencia de temperaturas entre el ambiente exterior e interior (°C).

#### 10.4.2 Carga de ventilación latente, $Q_{vl}$

Las cargas de ventilación latente hacen referencia a las transferencias de calor emitidas por infiltraciones y ventilaciones de aire desde el exterior al interior de la edificación habitable, las cuales depende de la humedad del lugar.

En **Ecuación 15** y **16** se muestran los parámetros de los que depende la carga de ventilación latente.

$$\dot{Q}_{vl} = V_r * 0,84 * \Delta W \quad (15)$$

Donde:

$V_r$ : Caudal de aire infiltrado y ventilación ( $m^3/s$ ).

$\Delta W$ : Diferencial de humedad entre el ambiente exterior e interior ( $W_{ext} - W_{int}$ ).

$$V_r = A * V_{viento} \quad (16)$$

Donde:

A: Área de la puerta o ventana ( $m^2$ ).

$V_{viento}$ : Velocidad del viento ( $m/s$ ).

### 10.5 Estimación Huella de Carbono

Para cuantificar le emisión de gases de efecto invernadero (GEI) se utiliza la **Ecuación 17** indicada a continuación.

$$HdC = \text{Datos de actividad} \cdot \text{Factor de emisión} \quad (17)$$

Dónde **Datos de actividad** es cualquier dato cuantificable a lo largo del proceso (en kg, Litros, kWh, etc) y **Factor de emisión** es el valor de conversión asociado en términos de kilogramos dióxido de carbono equivalente por unidad de actividad (en kg de  $CO_2eq$  por kg/Litros/kWh, etc).

## 11 ANEXO B

**Tabla 14:** Horas de sol incidentes en el establecimiento, según época del año y orientación

Orientación	Enero - marzo		Abril - junio		Julio - septiembre		Octubre - diciembre	
	Horario	Cant. horas	Horario	Cant. horas	Horario	Cant. horas	Horario	Cant. horas
Este	7:30-11:30	4	7:00-11:00	4	7:00-11:00	4	7:00-11:00	4
Norte	11:30-16:30	5	11:00-15:00	4	11:00-15:00	4	11:00-16:00	5
Oeste	16:30-20:30	4	15:00-18:00	3	15:00-19:00	4	16:00-20:00	4
Sin sol	20:30-7:30	11	18:00-7:00	13	19:00-7:00	12	20:00-7:00	11

### 11.1 Cargas internas

#### 11.1.1 Carga interna por ocupantes

Para evaluar el grado de actividad que se realiza dentro del establecimiento, se considera como actividad de las personas sentadas en reposo una cantidad de 50 (W/persona) de calor sensible y 40 (W/persona) de calor latente. Respecto a las salas de clases se obtiene la misma evaluación, donde la cantidad de ocupantes va desde los 24 a 27 personas.

#### 11.1.2 Carga interna por iluminación

La iluminación del lugar se basa en sólo lámparas incandescentes, correspondientes a tubos led de alta eficiencia y equipo estanco, los cuales poseen 36 W de potencia. Respecto a lámparas de iluminación por descarga, el establecimiento no posee elementos de estas características. Además, cada sala de clase posee aproximadamente 9 lámparas.

### 11.1.3 Carga interna por artefactos

Para obtener el cálculo del aporte de energía de los artefactos del establecimiento se realiza un catastro de los que posee el establecimiento, considerando un 10% de potencia residual para cada uno de ellos. Estas consideraciones se hacen tanto en salas de clases como en la biblioteca, correspondientes a artefactos como proyector de imagen y dispositivo de audio. Cabe resaltar que en la sala donde existe una mayor cantidad de equipos es en la sala de computación, por lo que la carga por artefactos en esta zona se diferencia de las demás.

## 12 ANEXO C

**Tabla 15:** Parámetros para la carga de envolvente con solución pasiva

DATOS PARA CARGA ENVOLVENTE		
Elementos de envolvente	Superficie (m <sup>2</sup> )	U (W/m <sup>2</sup> *K)
Ventanas	571,07	571,07
Hormigón	595,74	595,74
Albañilería	333,96	333,96
Techumbre	1282,17	1282,17
Puertas	28,80	28,80
Radier	1232,32	1232,32
Muro Trombe	87,9	87,9

La cantidad de metros cuadrados intervenidos con la solución pasiva se restan a la superficie total de hormigón del establecimiento debido a que cambia su materialidad por completo respecto a las paredes exteriores, por lo que se consideran como elementos diferentes al calcular las cargas dependientes de estos parámetros,

Según lo indicado en la **Figura 6** se señalan las siguientes características respecto a las zonas en las que se aplica la solución pasiva.

**Tabla 16:** Datos para solución pasiva SMT1

Nivel (piso / elevación)	1
H (m)	2,5
L (m)	3,2
A (m <sup>2</sup> )	8
Área de perforación sugerida (cm <sup>2</sup> )	800
Cantidad de perforaciones	4

**Tabla 17:** Datos para solución pasiva SMT2

Nivel (piso / elevación)	1	2
H (m)	2,5	2,7
L (m)	11,7	11,7
A (m <sup>2</sup> )	29,3	31,0
Área de perforación sugerida (cm <sup>2</sup> )	2925,0	3100,5
Cantidad de perforaciones	12	12

**Tabla 18:** Datos para solución pasiva SMT3

Nivel (piso / elevación)	1
H (m)	2,5
L (m)	1,7
A (m <sup>2</sup> )	4,25
Área de perforación sugerida (cm <sup>2</sup> )	425
Cantidad de perforaciones	2

**Tabla 19:** Datos para solución pasiva SMT4

Nivel (piso / elevación)	1	2	3
H (m)	2,5	2,65	2,65
L (m)	2,2	2,2	2,2
A (m <sup>2</sup> )	5,5	5,83	5,83
Área de perforación sugerida (cm <sup>2</sup> )	550,0	583,0	583,0
Cantidad de perforaciones	2	2	2

**13 ANEXO D**
**Tabla 20:** Resultados de huella de carbono en establecimiento educacional

Material	Unidad	Cantidad material	Valor factor de emisión	Unidad de medida f,e	Total KgCO <sub>2</sub> eq
Hormigón radier	m <sup>3</sup>	123,232	196,3	KgCO <sub>2</sub> eq/m <sup>3</sup>	24190,44
Hormigón losas	m <sup>3</sup>	207,567	296,4	KgCO <sub>2</sub> eq/m <sup>3</sup>	61522,86
Hormigón vigas y pilares	m <sup>3</sup>	101,776	296,5	KgCO <sub>2</sub> eq/m <sup>3</sup>	30176,58
Hormigón muros	m <sup>3</sup>	372,869	296,6	KgCO <sub>2</sub> eq/m <sup>3</sup>	110592,95
Albañilería	m <sup>2</sup>	333,96	29,15	KgCO <sub>2</sub> eq/m <sup>2</sup>	9734,93
Volcanita	m <sup>2</sup>	1718,906	3,8	KgCO <sub>2</sub> eq/m <sup>2</sup>	6531,84
Poliestireno	kg	888,1014	3,355	KgCO <sub>2</sub> eq/kg	2979,58
Filtro asfáltico	kg	438,32	6,5	KgCO <sub>2</sub> eq/kg	2849,08
Cubierta Instapanel	kg	12376,12	3,165	KgCO <sub>2</sub> eq/kg	39170,43
Pintura	m <sup>2</sup>	1768,56	1,3	KgCO <sub>2</sub> eq/m <sup>2</sup>	2299,12
Estuco	m <sup>2</sup>	884,28	7,3	KgCO <sub>2</sub> eq/m <sup>2</sup>	6455,23
Cerámico	m <sup>2</sup>	2616,10	23,22	KgCO <sub>2</sub> eq/m <sup>2</sup>	60745,84
Polietileno	kg	123,232	1,694	KgCO <sub>2</sub> eq/kg	208,76
Puertas de aluminio vidrio	m <sup>2</sup>	20	11,2	KgCO <sub>2</sub> eq/m <sup>2</sup>	224,00
Vidrio	kg	5521,35	0,52	KgCO <sub>2</sub> eq/kg	2871,10
Ventana de aluminio	kg	734,36	11,2	KgCO <sub>2</sub> eq/kg	8224,79
				<b>TOTAL KgCO<sub>2</sub>eq</b>	<b>368777,54</b>
				<b>TOTAL TonCO<sub>2</sub>eq</b>	<b>368,78</b>

**14 ANEXO E**
**Tabla 21:** Temperatura en muro Trombe según el exterior entre enero y marzo

DÍA DE MENOR TEMPERATURA: ENERO - MARZO			
Hora	Radiación Solar (W/m <sup>2</sup> )	Temp. Exterior (°C)	Temp. cámara de aire MT (°C)
0:00	0,00	15,63	15,63
1:00	0,00	15,61	15,61
2:00	0,00	15,65	15,65
3:00	0,00	15,46	15,46
4:00	0,00	15,29	15,29
5:00	0,00	15,08	15,08
6:00	0,00	14,9	14,90
7:00	0,00	14,89	14,89
8:00	1,85	14,91	14,92
9:00	4,43	15,46	15,48
10:00	6,77	16,25	16,28
11:00	8,56	16,98	17,02
12:00	9,69	17,65	17,70
13:00	11,36	18,16	18,22
14:00	9,60	18,18	18,23
15:00	8,39	17,52	17,56
16:00	6,50	16,32	16,35
17:00	412,87	15,23	17,29
18:00	153,54	13,82	14,59
19:00	0,00	12,41	12,41
20:00	0,00	11,26	11,26
21:00	0,00	10,88	10,88
22:00	0,00	9,82	9,82
23:00	0,00	8,48	8,48

**Tabla 22:** Temperatura en muro Trombe según el exterior entre abril y junio

<b>DÍA DE MENOR TEMPERATURA: ABRIL - JUNIO</b>			
<b>Hora</b>	<b>Radiación Solar (W/m<sup>2</sup>)</b>	<b>Temp. Exterior (°C)</b>	<b>Temp. cámara de aire MT (°C)</b>
0:00	0,00	6,71	6,71
1:00	0,00	6,29	6,29
2:00	0,00	5,97	5,97
3:00	0,00	5,54	5,54
4:00	0,00	4,95	4,95
5:00	0,00	4,34	4,34
6:00	0,00	3,7	3,70
7:00	0,00	3,05	3,05
8:00	0,00	3,43	3,43
9:00	2,96	4,19	4,20
10:00	5,35	5,27	5,30
11:00	7,09	6,34	6,38
12:00	8,13	7,42	7,46
13:00	8,46	8,25	8,29
14:00	8,02	9,22	9,26
15:00	684,71	9,91	13,33
16:00	498,36	9,34	11,83
17:00	245,77	8,51	9,74
18:00	0,00	7,64	7,64
19:00	0,00	7,29	7,29
20:00	0,00	6,91	6,91
21:00	0,00	6,8	6,80
22:00	0,00	6,77	6,77
23:00	0,00	7,02	7,02

**Tabla 23:** Temperatura en muro Trombe según el exterior entre julio y septiembre

<b>DÍA DE MENOR TEMPERATURA: JULIO - SEPTIEMBRE</b>			
<b>Hora</b>	<b>Radiación Solar (W/m<sup>2</sup>)</b>	<b>Temp. Exterior (°C)</b>	<b>Temp. cámara de aire MT (°C)</b>
0:00	0,00	4,41	4,41
1:00	0,00	4,18	4,18
2:00	0,00	3,75	3,75
3:00	0,00	3,27	3,27
4:00	0,00	2,7	2,70
5:00	0,00	2,23	2,23
6:00	0,00	2,0	2,00
7:00	0,00	1,59	1,59
8:00	0,00	2,31	2,31
9:00	310,36	3,87	5,42
10:00	554,38	5,73	8,50
11:00	735,60	7,49	11,17
12:00	848,08	9,07	13,31
13:00	885,17	10,32	14,75
14:00	844,75	11,37	15,59
15:00	728,82	12,25	15,89
16:00	544,29	11,76	14,48
17:00	296,11	11,03	12,51
18:00	0,00	10,35	10,35
19:00	0,00	9,45	9,45
20:00	0,00	8,53	8,53
21:00	0,00	7,77	7,77
22:00	0,00	6,95	6,95
23:00	0,00	6,45	6,45

**Tabla 24:** Temperatura en muro Trombe según el exterior entre octubre y diciembre

DÍA DE MENOR TEMPERATURA: OCTUBRE - DICIEMBRE			
Hora	Radiación Solar (W/m <sup>2</sup> )	Temp. Exterior (°C)	Temp. cámara de aire MT (°C)
0:00:00	0.00	7.51	7.51
1:00:00	0.00	6.86	6.86
2:00:00	0.00	6.16	6.16
3:00:00	0.00	5.58	5.58
4:00:00	0.00	4.96	4.96
5:00:00	0.00	4.56	4.56
6:00:00	0.00	4.18	4.18
7:00:00	54.56	5.7	5.97
8:00:00	294.23	7.78	9.25
9:00:00	545.65	10.55	13.28
10:00:00	763.16	13	16.82
11:00:00	923.52	14.6	19.22
12:00:00	1012.84	15.86	20.92
13:00:00	1023.43	17.11	22.23
14:00:00	954.22	16.81	21.58
15:00:00	812.63	16.44	20.50
16:00:00	609.96	15.85	18.90
17:00:00	366.75	15.27	17.10
18:00:00	120.46	14.47	15.07
19:00:00	0.00	13.61	13.61
20:00:00	0.00	12.85	12.85
21:00:00	0.00	12.15	12.15
22:00:00	0.00	11.47	11.47
23:00:00	0.00	10.83	10.83

**14.1 ANEXO F**
**Tabla 25:** Análisis de Precio Unitario de Muro Trombe Ventilado

Muro Trombe Ventilado									
Nombre									
Unidad	\$/m <sup>2</sup>								
Fecha	04-06-2022								
Cantidad (m <sup>2</sup> )	89.7								
Item	Unidad	Rend. U.	Unidad	Rend. C.	Unidad	P. Unitario	Unidad	P. Total	Unidad
Equipos									
							Total Equipos	-	
<b>Mano de Obra</b>									
Maestro Ira	día	14	m <sup>2</sup> /día	22	m <sup>2</sup> /día	30000	\$/día	1364	\$/m <sup>2</sup>
Ayudante	día	8	m <sup>2</sup> /día	22	m <sup>2</sup> /día	18000	\$/día	818	\$/m <sup>2</sup>
							Total Mano de Obra	2182	\$/m <sup>2</sup>
							Leyes sociales (30%)	655	\$/m <sup>2</sup>
							Total Mano de Obra	2836	\$/m <sup>2</sup>
<b>Materiales</b>									
Vidrio 6 mm 1,3 x 1,3 m	m <sup>2</sup>	1.69	m <sup>2</sup> /m <sup>2</sup>	0.59	m <sup>2</sup> /m <sup>2</sup>	21490	\$/m <sup>2</sup>	12716	\$/m <sup>2</sup>
Oleo negro	gl	1	gl/m <sup>2</sup>	1	m <sup>2</sup> /gl	21780	\$/gl	21780	\$/m <sup>2</sup>
Tornillo	Unidad	200	Unidad/m <sup>2</sup>	0.01	m <sup>2</sup> /Unidad	6390	\$/Unidad	32	\$/m <sup>2</sup>
Silicona	Unidad	1	Unidad/m <sup>2</sup>	1	m <sup>2</sup> /Unidad	3190	\$/Unidad	3190	\$/m <sup>2</sup>
Madera cepillada 2x2"	Unidad	10	Unidad/m <sup>2</sup>	0.1	m <sup>2</sup> /Unidad	2490	\$/Unidad	249	\$/m <sup>2</sup>
Celosía regulable	Unidad	1	Unidad/m <sup>2</sup>	1.00	m <sup>2</sup> /Unidad	6588	\$/Unidad	6588	\$/m <sup>2</sup>
Clavos 3"	Unidad	1	Unidad/m <sup>2</sup>	1	m <sup>2</sup> /Unidad	848	\$/Unidad	848	\$/m <sup>2</sup>
							Subtotal	45403	\$/m <sup>2</sup>
							5% Pérdidas	2270	\$/m <sup>2</sup>
							Total Materiales	47673	\$/m <sup>2</sup>
							Total Muro Trombe Ventilado	50509	\$/m <sup>2</sup>
							<b>Costo Total Solución Pasiva</b>	<b>4528929</b>	<b>\$</b>

**14.2 ANEXO G**

## 14.2.1 Potencia de calefacción y enfriamiento entre enero y marzo

**Tabla 26:** Cargas de calefacción y enfriamiento en el día de menor temperatura entre enero y marzo

DÍA DE MENOR TEMPERATURA: ENERO - MARZO										
Hora	Carga solar Directa [W]	Carga Solar Indirecta [W]	Carga Envolverte [W]	Carga Ventilación Sensible [W]	Carga Ventilación Latente [W]	Carga Interna Ocupantes Sensible [W]	Carga Interna Ocupantes Latente [W]	Carga Interna Artefactos + Iluminación [W]	Total Calefacción [kW]	Total Enfriamiento [kW]
0:00	0,00	0,00	-48593,25	-5349,10	0,0002	50,00	40,00	12678,00	-41,17	0,00
1:00	0,00	0,00	-48730,40	-5204,42	0,0002	50,00	40,00	12678,00	-41,17	0,00
2:00	0,00	0,00	-48456,11	-4750,75	0,0002	50,00	40,00	12678,00	-40,44	0,00
3:00	0,00	0,00	-49759,00	-3638,49	0,0001	50,00	40,00	12678,00	-40,63	0,00
4:00	0,00	0,00	-50924,74	-4778,59	0,0002	50,00	40,00	12678,00	-42,94	0,00
5:00	0,00	0,00	-52364,78	-5865,09	0,0002	50,00	40,00	12678,00	-45,46	0,00
6:00	0,00	0,00	-53599,09	-6987,88	0,0002	50,00	40,00	12678,00	-47,82	0,00
7:00	0,00	0,00	-53667,67	-5775,06	0,0002	150,00	120,00	12678,00	-46,49	0,00
8:00	91,09	26,82	-53530,52	-3458,81	0,0001	5400,00	4320,00	12678,00	-34,47	0,00
9:00	218,13	64,22	-49759,00	-1565,93	0,0001	5400,00	4320,00	12678,00	-28,64	0,00
10:00	333,35	98,14	-44341,72	-2790,73	0,0001	5400,00	4320,00	12678,00	-24,30	0,00
11:00	421,48	124,09	-39335,88	-4257,52	0,0003	5400,00	4320,00	12678,00	-20,65	0,00
12:00	723,49	153,00	-34741,48	-3899,22	0,0004	5400,00	4320,00	12678,00	-15,37	0,00
13:00	848,18	179,37	-31244,25	-2644,75	0,0005	5400,00	4320,00	12678,00	-10,46	0,00
14:00	716,77	151,58	-31107,11	-3403,26	0,0006	5400,00	4320,00	12678,00	-11,24	0,00
15:00	626,43	132,48	-35632,93	-4582,78	0,0004	5400,00	4320,00	12678,00	-17,06	0,00
16:00	485,31	102,63	-43861,71	-7252,52	0,0004	5400,00	4320,00	12678,00	-28,13	0,00
17:00	20581,72	4805,31	-51336,18	-7651,68	0,0003	5400,00	4320,00	12678,00	-11,20	0,00
18:00	7654,02	1787,02	-61004,99	-9569,93	0,0003	5400,00	4320,00	12678,00	-38,74	0,00
19:00	0,00	0,00	-70673,80	-11574,70	0,0003	150,00	120,00	12678,00	-69,30	0,00
20:00	0,00	0,00	-78559,71	-16112,08	0,0003	50,00	40,00	12678,00	-81,90	0,00
21:00	0,00	0,00	-81165,49	-11620,89	0,0002	50,00	40,00	12678,00	-80,02	0,00
22:00	0,00	0,00	-88434,24	-14212,82	0,0002	50,00	40,00	12678,00	-89,88	0,00
23:00	0,00	0,00	-97623,04	-18203,63	0,0002	50,00	40,00	12678,00	-103,06	0,00

## 14.2.2 Potencia de calefacción y enfriamiento entre abril y junio

**Tabla 27:** Cargas de calefacción y enfriamiento en el día de menor temperatura entre abril y junio

DÍA DE MENOR TEMPERATURA: ABRIL - JUNIO										
Hora	Carga solar Directa [W]	Carga Solar Indirecta [W]	Carga Envoltante [W]	Carga Ventilación Sensible [W]	Carga Ventilación Latente [W]	Carga Interna Ocupantes Sensible [W]	Carga Interna Ocupantes Latente [W]	Carga Interna Artefactos + Iluminación [W]	Total Calefacción [kW]	Total Enfriamiento [kW]
0:00	0,00	0,00	-109760,49	-41893,22	0,0009	150,00	120,00	12678,00	-138,71	0,00
1:00	0,00	0,00	-112640,56	-38529,38	0,0008	150,00	120,00	12678,00	-138,22	0,00
2:00	0,00	0,00	-114834,90	-35600,35	0,0007	150,00	120,00	12678,00	-137,49	0,00
3:00	0,00	0,00	-117783,54	-30996,23	0,0006	150,00	120,00	12678,00	-135,83	0,00
4:00	0,00	0,00	-121829,36	-27967,80	0,0005	150,00	120,00	12678,00	-136,85	0,00
5:00	0,00	0,00	-126012,32	-24413,75	0,0005	150,00	120,00	12678,00	-137,48	0,00
6:00	0,00	0,00	-130401,00	-28664,51	0,0005	150,00	120,00	12678,00	-146,12	0,00
7:00	0,00	0,00	-134858,25	-21166,62	0,0004	450,00	360,00	12678,00	-142,54	0,00
8:00	0,00	0,00	-132252,47	-20257,19	0,0004	16250,00	13000,00	12678,00	-110,58	0,00
9:00	145,75	42,91	-127040,92	-14258,62	0,0003	16250,00	13000,00	12678,00	-99,18	0,00
10:00	263,43	77,56	-119635,02	-23222,26	0,0005	16250,00	13000,00	12678,00	-100,59	0,00
11:00	349,10	102,78	-112297,69	-24212,61	0,0005	16250,00	13000,00	12678,00	-94,13	0,00
12:00	607,02	128,37	-104891,79	-18229,91	0,0004	16250,00	13000,00	12678,00	-80,46	0,00
13:00	631,65	133,58	-99200,23	-11188,94	0,0003	16250,00	13000,00	12678,00	-67,70	0,00
14:00	598,80	126,63	-92548,63	-20867,64	0,0006	16250,00	13000,00	12678,00	-70,76	0,00
15:00	51122,95	10811,37	-87817,09	-31103,57	0,0009	16250,00	13000,00	12678,00	-15,06	0,00
16:00	37209,38	5800,31	-91725,75	-27775,38	0,0008	16250,00	13000,00	12678,00	-34,56	0,00
17:00	18350,09	2860,47	-97417,32	-14057,35	0,0004	16250,00	13000,00	12678,00	-48,34	0,00
18:00	0,00	0,00	-103383,19	-9311,28	0,0002	16250,00	13000,00	12678,00	-70,77	0,00
19:00	0,00	0,00	-105783,25	-10512,27	0,0002	450,00	360,00	12678,00	-102,81	0,00
20:00	0,00	0,00	-108389,02	-29728,89	0,0007	150,00	120,00	12678,00	-125,17	0,00
21:00	0,00	0,00	-109143,33	-35396,09	0,0008	150,00	120,00	12678,00	-131,59	0,00
22:00	0,00	0,00	-109349,05	-51394,85	0,0011	150,00	120,00	12678,00	-147,80	0,00
23:00	0,00	0,00	-107634,72	-51902,90	0,0012	150,00	120,00	12678,00	-146,59	0,00

## 14.2.3 Potencia de calefacción y enfriamiento entre julio y septiembre

**Tabla 28:** Cargas de calefacción y enfriamiento en el día de menor temperatura entre julio y septiembre

<b>DÍA DE MENOR TEMPERATURA: JULIO - SEPTIEMBRE</b>										
<b>Hora</b>	<b>Carga solar Directa [W]</b>	<b>Carga Solar Indirecta [W]</b>	<b>Carga Envoltante [W]</b>	<b>Carga Ventilación Sensible [W]</b>	<b>Carga Ventilación Latente [W]</b>	<b>Carga Interna Ocupantes Sensible [W]</b>	<b>Carga Interna Ocupantes Latente [W]</b>	<b>Carga Interna Artefactos + Iluminación [W]</b>	<b>Total Calefacción [kW]</b>	<b>Total Enfriamiento [kW]</b>
0:00	0,00	0,00	-125532,31	-39293,09	0,0009	150,00	120,00	6339,00	<b>-158,22</b>	<b>0,00</b>
1:00	0,00	0,00	-127109,49	-48203,53	0,0010	150,00	120,00	6339,00	<b>-168,70</b>	<b>0,00</b>
2:00	0,00	0,00	-130058,13	-50395,78	0,0010	150,00	120,00	6339,00	<b>-173,84</b>	<b>0,00</b>
3:00	0,00	0,00	-133349,64	-55051,81	0,0011	150,00	120,00	6339,00	<b>-181,79</b>	<b>0,00</b>
4:00	0,00	0,00	-137258,31	-60439,81	0,0012	150,00	120,00	6339,00	<b>-191,09</b>	<b>0,00</b>
5:00	0,00	0,00	-140481,25	-60873,44	0,0011	150,00	120,00	6339,00	<b>-194,75</b>	<b>0,00</b>
6:00	0,00	0,00	-142058,43	-67016,56	0,0012	150,00	120,00	6339,00	<b>-202,47</b>	<b>0,00</b>
7:00	0,00	0,00	-144869,93	-68859,35	0,0012	450,00	360,00	6339,00	<b>-206,58</b>	<b>0,00</b>
8:00	0,00	0,00	-139932,66	-68400,22	0,0013	13500,00	10800,00	6339,00	<b>-177,69</b>	<b>0,00</b>
9:00	15281,75	4499,13	-129235,26	-62006,91	0,0013	13500,00	10800,00	6339,00	<b>-140,82</b>	<b>0,00</b>
10:00	27297,00	8036,56	-116480,65	-56455,89	0,0013	13500,00	10800,00	6339,00	<b>-106,96</b>	<b>0,00</b>
11:00	36220,05	10663,62	-104411,78	-48219,40	0,0013	13500,00	10800,00	6339,00	<b>-75,11</b>	<b>0,00</b>
12:00	63320,75	13390,94	-93577,23	-39533,14	0,0013	13500,00	10800,00	6339,00	<b>-25,76</b>	<b>0,00</b>
13:00	66090,02	13976,58	-85005,59	-29926,52	0,0011	13500,00	10800,00	6339,00	<b>-4,23</b>	<b>0,00</b>
14:00	63072,12	13338,36	-77805,41	-25810,03	0,0011	13500,00	10800,00	6339,00	<b>0,00</b>	<b>3,43</b>
15:00	54416,36	11507,86	-71770,97	-19232,62	0,0009	13500,00	10800,00	6339,00	<b>0,00</b>	<b>5,56</b>
16:00	40638,68	6334,88	-75131,06	-17331,93	0,0008	13500,00	10800,00	6339,00	<b>-14,85</b>	<b>0,00</b>
17:00	22108,65	3446,37	-80136,89	-14205,92	0,0006	13500,00	10800,00	6339,00	<b>-38,15</b>	<b>0,00</b>
18:00	0,00	0,00	-84799,87	-13279,71	0,0005	13500,00	10800,00	6339,00	<b>-67,44</b>	<b>0,00</b>
19:00	0,00	0,00	-90971,45	-19134,39	0,0006	450,00	360,00	6339,00	<b>-102,96</b>	<b>0,00</b>
20:00	0,00	0,00	-97280,18	-31057,90	0,0009	150,00	120,00	6339,00	<b>-121,73</b>	<b>0,00</b>
21:00	0,00	0,00	-102491,74	-39010,51	0,0011	150,00	120,00	6339,00	<b>-134,89</b>	<b>0,00</b>
22:00	0,00	0,00	-108114,73	-45151,29	0,0012	150,00	120,00	6339,00	<b>-146,66</b>	<b>0,00</b>
23:00	0,00	0,00	-111543,39	-42452,93	0,0011	150,00	120,00	6339,00	<b>-147,39</b>	<b>0,00</b>

## 14.2.4 Potencia de calefacción y enfriamiento entre octubre y diciembre

**Tabla 29:** Cargas de calefacción y enfriamiento en el día de menor temperatura entre octubre y diciembre

DÍA DE MENOR TEMPERATURA: OCTUBRE - DICIEMBRE										
Hora	Carga solar Directa [W]	Carga Solar Indirecta [W]	Carga Envolverte [W]	Carga Ventilación Sensible [W]	Carga Ventilación Latente [W]	Carga Interna Ocupantes Sensible [W]	Carga Interna Ocupantes Latente [W]	Carga Interna Artefactos + Iluminación [W]	Total Calefacción [kW]	Total Enfriamiento [kW]
0:00	0,00	0,00	-104274,64	-17041,80	0,0003	125,00	100,00	12678,00	-108,41	0,00
1:00	0,00	0,00	-108731,89	-17532,03	0,0003	125,00	100,00	12678,00	-113,36	0,00
2:00	0,00	0,00	-113532,01	-14700,71	0,0002	125,00	100,00	12678,00	-115,33	0,00
3:00	0,00	0,00	-117509,25	-12571,17	0,0002	125,00	100,00	12678,00	-117,18	0,00
4:00	0,00	0,00	-121760,79	-15343,94	0,0002	125,00	100,00	12678,00	-124,20	0,00
5:00	0,00	0,00	-124503,71	-10520,73	0,0001	125,00	100,00	12678,00	-122,12	0,00
6:00	0,00	0,00	-127109,49	-5205,98	0,0001	125,00	100,00	12678,00	-119,41	0,00
7:00	2686,47	790,93	-116686,37	-6402,42	0,0001	375,00	300,00	12678,00	-106,26	0,00
8:00	14487,53	4265,30	-102423,16	-3357,46	0,0001	13500,00	10800,00	12678,00	-50,05	0,00
9:00	26867,14	7910,01	-83428,40	-5936,64	0,0001	13500,00	10800,00	12678,00	-17,61	0,00
10:00	37577,07	11063,14	-66627,99	-10226,17	0,0003	13500,00	10800,00	12678,00	0,00	8,76
11:00	45473,00	14582,11	-55656,29	-10075,25	0,0005	13500,00	10800,00	12678,00	0,00	31,30
12:00	49871,01	15992,45	-47016,07	-8701,61	0,0006	13500,00	10800,00	12678,00	0,00	47,12
13:00	50392,45	16159,66	-38444,43	-5631,03	0,0006	13500,00	10800,00	12678,00	0,00	59,45
14:00	46984,63	15066,86	-40501,62	-7408,12	0,0007	13500,00	10800,00	12678,00	0,00	51,12
15:00	40012,91	12831,19	-43038,83	-8426,57	0,0007	13500,00	10800,00	12678,00	0,00	38,36
16:00	45541,84	7099,20	-47084,65	-10491,59	0,0007	13500,00	10800,00	12678,00	0,00	32,04
17:00	27382,89	4268,53	-51061,89	-9948,40	0,0005	13500,00	10800,00	12678,00	0,00	7,62
18:00	8993,98	1402,01	-56547,74	-9135,25	0,0004	13500,00	10800,00	12678,00	-18,31	0,00
19:00	0,00	0,00	-62445,03	-6451,60	0,0002	375,00	300,00	12678,00	-55,54	0,00
20:00	0,00	0,00	-67656,58	-6241,09	0,0002	125,00	100,00	12678,00	-60,99	0,00
21:00	0,00	0,00	-72456,70	-5525,52	0,0002	125,00	100,00	12678,00	-65,08	0,00
22:00	0,00	0,00	-77119,68	-6857,78	0,0002	125,00	100,00	12678,00	-71,07	0,00
23:00	0,00	0,00	-81508,36	-10735,79	0,0003	125,00	100,00	12678,00	-79,34	0,00