

PROPUESTA DE PROGRAMA PARA CÁLCULO DE POTENCIA Y PÉRDIDAS TÉRMICAS QUE GENERA UN MURO TROMBE CLÁSICO IMPLEMENTADO EN UNA VIVIENDA COMO SISTEMA DE CALEFACCIÓN.

G. Riquelme Rudolph¹, F. González Monsalve² y C. Correa Rogel³

RESUMEN:

En la actualidad, cada vez es más frecuente la implementación de sistemas que utilizan la radiación solar como fuente de energía para calefaccionar viviendas, donde la característica principal es que no necesitan de mecanismos externos artificiales para funcionar. Un ejemplo de esta técnica empleada en la construcción, es el muro Trombe clásico. De este muro, se conoce su origen, procedimiento y ciertas características generales que se deben considerar para regular su eficiencia. Existen diversos artículos que analizan el desempeño del sistema Trombe y otros que entregan algunos parámetros que sirven para el diseño del muro, pero ninguno que proponga un programa o aplicación que en base a la entrega de variables arroje resultados que permitan relacionar las dimensiones del muro con el aporte a la potencia térmica de la vivienda y las pérdidas que genera este sistema solar pasivo.

El presente proyecto, tiene como finalidad diseñar un procedimiento digital que, mediante el ingreso de valores y la selección de diferentes parámetros, entregue la potencia y pérdidas térmicas que genera la implementación de un muro Trombe clásico como sistema de calefacción en una vivienda.

El procedimiento digital se realizó en el lenguaje de macros de Microsoft Visual Basic para aplicaciones (VBA) a través de la aplicación Excel, donde se creó un formulario mediante el cual una persona puede interactuar para obtener parámetros que le facilitarán el dimensionamiento de un muro Trombe clásico. La aplicación está orientada a un público que tenga conocimiento básico sobre el funcionamiento del sistema que tiene este tipo de muro.

PALABRAS CLAVE: sistema solar pasivo, potencia térmica.

¹ Estudiante, Carrera de Ingeniería Civil, Universidad Católica de la Santísima Concepción, griquelmer@ing.ucsc.cl

² Profesor Guía, Departamento de Ingeniería Civil, Universidad Católica de la Santísima Concepción, fgonzalez@ucsc.cl

³ Profesor Informante, Departamento de Ingeniería Civil, Universidad Católica de la Santísima Concepción, claudiocorrea@ucsc.cl

ABSTRACT:

Currently, the implementation of systems that use solar radiation as a source of energy to heat homes, where the main characteristic is that they do not need artificial external mechanisms to operate, is becoming more and more frequent. An example of this technique used in construction is the classic Trombe wall. Its origin, procedure and certain general characteristics that must be considered to regulate its efficiency are well known. There are several articles that analyze the performance of the Trombe system and others that provide some parameters that serve for the design of the wall, but none that proposes a program or application that based on the delivery of variables yields results that allow relating the dimensions of the wall with the contribution to the thermal power of the house and the losses generated by this passive solar system.

The purpose of this project is to design a digital procedure that, through the input of values and the selection of different parameters, provides the power and thermal losses generated by the implementation of a classic Trombe wall as a heating system in a house.

The digital procedure was carried out in the Microsoft Visual Basic for Applications (VBA) macro language through the Excel application, where a form was created through which a person can interact to obtain parameters that will facilitate the sizing of a classic Trombe wall. The application is oriented to a public that has basic knowledge about the operation of the system that has this type of wall.

KEYWORDS: passive solar system, thermal power.

1. INTRODUCCIÓN

El 6 de septiembre del año 1881 el ingeniero estadounidense Edward Morse, patentó el diseño del que se conoce actualmente como muro Trombe. La denominación de este muro proviene del apellido de Felix Trombe, un ingeniero francés que junto con Jacque Michel, un arquitecto de la misma nacionalidad, popularizaron el diseño propuesto por Morse, con una casa solar pasiva ubicada en Odeillo⁴.

En relación al diseño creado por Morse y al actual modelo conocido como muro Trombe, este se puede definir como un muro de una edificación, orientado especialmente para captar la radiación solar mediante una estrategia pasiva de calentamiento, que se construye con un material que es capaz de absorber el calor rápidamente⁵. Dicho muro se encuentra protegido en su cara exterior por una capa de un material transparente o translúcido, ubicada a una cierta distancia con el fin de generar una cámara de aire. El muro consta con aperturas en la parte superior y en la parte inferior que conectan la cámara de aire con el interior del edificio⁶.

A lo largo del tiempo, el diseño del muro ha ido sufriendo diferentes modificaciones, pero el diseño que se va a utilizar y analizar en este proyecto es el modelo de Trombe clásico, que solo contempla las características mencionadas anteriormente y ninguna otra característica general como por ejemplo la inclinación del muro. Este muro está diseñado para alcanzar su máxima eficiencia durante los meses más fríos del año, ya que su funcionamiento depende del gradiente de temperatura que se origina a partir del intercambio de aire caliente que se encuentra dentro de la cámara de aire del sistema y el aire más frío que se encuentra en el interior de la vivienda.

El presente proyecto tiene como objetivo diseñar un procedimiento digital en el programa Visual Basic de Excel que, mediante el ingreso de parámetros energéticos y diferentes dimensiones, entregue la potencia y pérdidas térmicas que genera la implementación de un muro Trombe clásico en una vivienda. Las variables de salida están relacionadas con la función del muro como sistema de calefacción y por lo tanto el proyecto en todos los cálculos va a considerar condiciones climáticas de bajas temperaturas. Además, el programa está diseñado para que lo pueda utilizar una persona con conocimientos básicos sobre el sistema solar pasivo de muro Trombe.

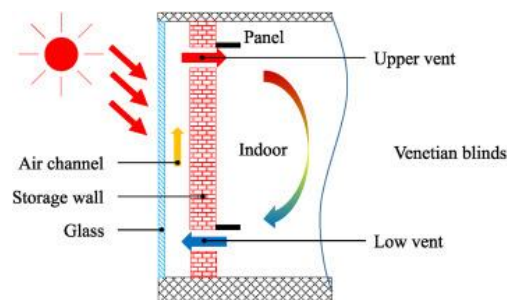


Figura 1: Funcionamiento de muro Trombe clásico.

Fuente: Diario “Revisiones de energía renovable y sostenible”, mayo de 2020.

⁴ Muros trombe: qué son y cómo funcionan; www.huellasdearquitectura.com/2018/10/22/muros-trombe-que-son-y-como-funcionan

⁵ Agrawal, B., & Tiwari, G. N. (2010). Building integrated photovoltaic thermal systems: for sustainable developments. Royal Society of Chemistry.

⁶ Morse, E.S. (1881). PATENT ‘Warming and Ventilating Apartments by the Sun’s Rays’.

2. OBJETIVOS

2.1 Objetivo general

- Diseñar un procedimiento digital en el programa Visual Basic de Excel que, mediante el ingreso de valores y la selección de diferentes parámetros, entregue la potencia y pérdidas térmicas que genera la implementación de un muro Trombe clásico como sistema de calefacción en una vivienda.

2.2 Objetivos específicos

- Determinar las cargas térmicas que actúan en el funcionamiento de un muro Trombe.
- Definir y determinar los parámetros de diseño de un muro Trombe.
- Definir las variables necesarias para elaborar el procedimiento digital.
- Programar el procedimiento digital en VBA de Excel.
- Determinar que sucede con el muro Trombe en verano y sugerir soluciones.
- Ejemplificar el uso del programa con una vivienda cualquiera.

3. COMPARACIÓN DE VIVIENDA CON Y SIN MURO TROMBE

Si bien, el presente proyecto no busca realizar un análisis de los cambios que provoca la implementación de un muro Trombe ni comparar el antes y después de su construcción, es importante entregar información que respalde en parte, la función y la eficiencia de este sistema solar pasivo. El año 2017, se instaló un sistema de Trombe clásico en uno de los muros de albañilería, ubicado con orientación sur en una sala de 15 m², en una vivienda social ubicada en el estado de Hidalgo, México⁷. La finalidad de realizar dicha incorporación, fue obtener una simulación energética del espacio arquitectónico y comparar los cambios de temperatura interno que alcanzaría la vivienda. La región donde se llevó a cabo el estudio cuenta con un clima templado frío, y tiene una temperatura promedio anual de 16°C.

Tabla 1: Diferencia de variación de temperaturas en vivienda con y sin muro Trombe.

Fuente: Revista “Investigación y desarrollo” volumen 3. ECORFAN (2017).

	Temperatura Máx. (°C)	Temperatura Mín. (°C)	Temperatura Prom. (°C)	Temperatura Confort (°C)	Confort (%)	Δ%
Sin muro	17,09	10,5	13,795	20	68,97	18,03
Con muro	20	14,8	17,4	20	87	

De la Tabla 1 se puede observar como la implementación de un muro Trombe, ayuda a incrementar la temperatura interior de una vivienda, disminuyendo la diferencia para alcanzar la temperatura confort propuesta que tiene por objetivo que las personas que ocupan la casa no experimenten sensación de calor ni de frío.

⁷ Revista “Investigación y desarrollo” volumen 3. ECORFAN (2017)

4. METODOLOGÍA

4.1 Balance térmico

Para que una vivienda o cualquier otro tipo de construcción, que albergue personas u objetos, alcance un estado de equilibrio en su interior que otorgue una temperatura optima, debe existir una igualdad en el balance energético⁸. Este balance relaciona los parámetros que interfieren en las ganancias y pérdidas de energía del recinto y se representa según la siguiente ecuación.

$$\dot{Q}_{\text{Total}} = \dot{Q}_s \pm \dot{Q}_i \pm \dot{Q}_c \pm \dot{Q}_v \quad \text{Ecuación 1}$$

Donde:

- \dot{Q}_{Total} : balance térmico [W].
- \dot{Q}_s : cargas térmicas solares, directas e indirectas [W].
- \dot{Q}_i : cargas térmicas internas (ocupantes, artefactos eléctricos, iluminación) [W].
- \dot{Q}_c : envolvente térmica [W].
- \dot{Q}_v : cargas térmicas de ventilación, sensible y latente [W].

4.2 Resistencia térmica del muro Trombe

En relación a lo establecido en la Nch853-2007, la resistencia térmica total del muro queda dada por la Ecuación 2, donde se va a desprejiciar la resistencia de la cámara de aire, debido a que los orificios de ventilación y la longitud de la cámara de aire permiten una renovación de aire constante provocando que no se generen pérdidas de aire desde el interior de la cámara hacia el exterior de la vivienda⁹.

$$R_T = R_{si} + R_i + R_e + R_{se} \quad \text{Ecuación 2}$$

Donde:

- R_T : resistencia térmica del muro Trombe [$\text{m}^2\text{K/W}$].
- R_{si} : resistencia térmica de superficie al interior [0,12 $\text{m}^2\text{K/W}$].
- R_i : resistencia térmica del vidrio según material [$\text{m}^2\text{K/W}$].
- R_e : resistencia térmica de la pared según material [$\text{m}^2\text{K/W}$].
- R_{se} : resistencia térmica de superficie al exterior [0,05 $\text{m}^2\text{K/W}$].

4.3 Potencia térmica que entrega el muro Trombe

El muro Trombe no posee cargas térmicas internas, ya que es un elemento que constituye parte de la envolvente de la vivienda y su implementación no genera la formación completa de un recinto cerrado. En la magnitud de la potencia que genera un sistema Trombe, interactúan distintos tipos de cargas que modifican la temperatura del aire al interior de la vivienda. Todas las ecuaciones están planteadas considerando condiciones climáticas de bajas temperaturas.

$$P_m = A_s + A_c + P_t \quad \text{Ecuación 3}$$

⁸ Acondicionamiento térmico de edificios, Buenos Aires (Díaz, 2005)

⁹ Nch853-2007, acondicionamiento térmico.

Donde:

- P_m : potencia que entrega el muro Trombe [W].
- A_s : aporte solar [W].
- A_c : aporte por convección natural [W].
- P_t : pérdidas por transmitancia térmica [W].

4.3.1 Aportes térmicos del muro

4.3.1.1 Aporte solar del muro hacia el interior

La radiación solar es capaz de atravesar las superficies hechas de materiales traslúcidos o transparentes e incide directamente sobre las superficies interiores, lo que genera una ganancia de calor de estas. A la ecuación planteada por Mazria, se le agregó el coeficiente de ganancia solar que tiene el sistema o tipo de cristalería utilizado, dado que la energía solar no llega directamente al muro de material macizo, sino que antes debe atravesar la cristalería que funciona como barrera captadora de radiación. El aporte solar se calcula según la Ecuación 4.

$$A_s = S \times R \times \theta \times P \quad \text{Ecuación 4}$$

Donde:

- A_s : aporte solar [W].
- S : superficie acristalada expuesta a la radiación solar [m²].
- R : radiación solar directa que atraviesa la superficie acristalada [W/m²].
- θ : coeficiente de ganancia de calor solar.
- P : porcentaje de energía incidente en la superficie del muro o cubierta térmica que es transferido al local (considerando el muro pintado de negro).

En el libro “Energía solar pasiva” de Edward Mazria, se establece que solo una parte de la energía proveniente del sol, que logra captar el muro, es transferida a la habitación o local. Este porcentaje de energía incidente en la superficie del muro o cubierta térmica que es transferido al local se puede extraer del gráfico que se muestra a continuación, donde F es un parámetro que indica un valor medio de las pérdidas de calor que se generan en la habitación (considerando las pérdidas térmicas que genera el muro Trombe)¹⁰.

¹⁰ Libro “Energía solar pasiva” de Edward Mazria.

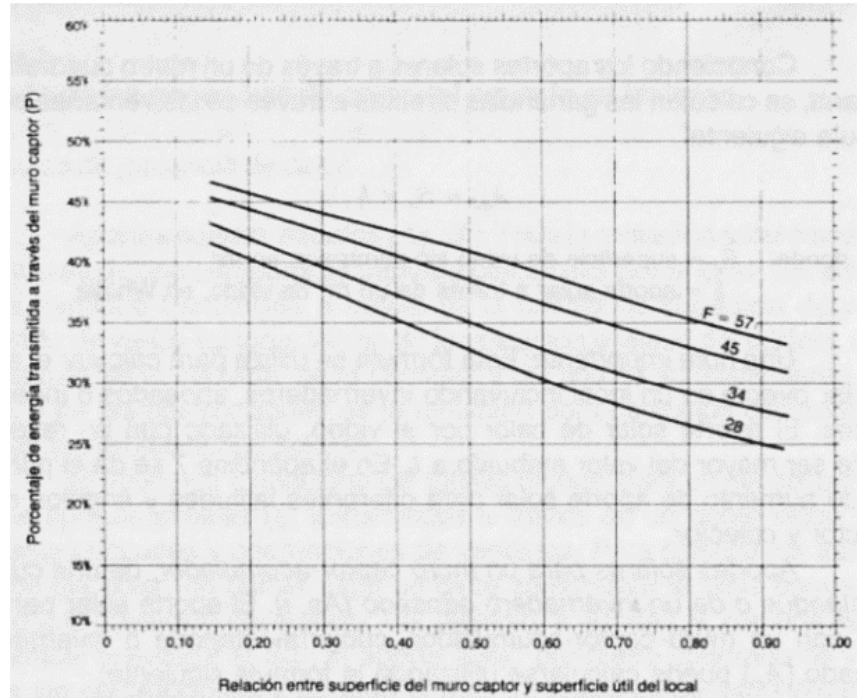


Figura 2: Gráfico para determinar el porcentaje de energía solar transmitida por el muro Trombe.
 Fuente: Libro “Energía solar pasiva” de Edward Mazria.

Observación: el gráfico de la Figura 2, está calculado con muros térmicos de superficie exterior pintada de negro.

Para crear una ecuación de la cual se pueda obtener el porcentaje de energía transmitida, ingresando el valor de F y la relación entre la superficie del muro y de la habitación, se generaron las curvas correspondientes a los valores entregados en el gráfico de la Figura 2, donde:

- F: coeficiente de pérdidas térmicas en la habitación.
- R_{ss} : relación entre superficie del muro Trombe y superficie útil de la habitación.
- P: porcentaje de energía transmitida a través del muro.

La ecuación para obtener el coeficiente de pérdidas térmicas en la habitación, quedaría como se muestra a continuación:

$$F = \frac{\text{Pérdidas térmicas en la habitación}}{\text{Superficie útil de la habitación}} \quad \text{Ecuación 5}$$

Donde:

- F: coeficiente de pérdidas térmicas en la habitación [W/m^2].
- Pérdidas térmicas en la habitación, incluye las pérdidas que genera el muro Trombe [W].
- Superficie útil de la habitación [m^2].

Curvas

A continuación, se muestran las ecuaciones correspondientes a las curvas de la Figura 2.

F = 28,

$$P = -22,5 \times R_{ss} + 44,25$$

Ecuación 6

F = 34,

$$P = -21,786 \times R_{ss} + 46,357$$

Ecuación 7

F = 45,

$$P = -19,167 \times R_{ss} + 48,417$$

Ecuación 8

F = 57,

$$P = -17,5 \times R_{ss} + 49,75$$

Ecuación 9

Junto con este informe, se adjunta un archivo Excel. En la hoja “% de energía – muro” de este archivo se indica de qué forma se obtuvieron las ecuaciones 6,7,8 y 9. Además, se establece la relación para obtener el porcentaje de energía transmitida a través del muro para cualquier coeficiente de pérdidas térmicas en la habitación.

4.3.1.2 Aporte por convección natural

El fenómeno de convección en el sistema solar pasivo ventilado, comienza cuando el aire proveniente del interior de la vivienda que viene con cierta temperatura, atraviesa por los orificios inferiores del muro. Como el muro se encuentra en una constante captación de radiación solar debido a su masa térmica, transfiere energía al aire contenido en la cámara, provocando un aumento de temperatura en el fluido. El aire al calentarse comienza a disminuir su densidad por lo que se vuelve más liviano, provocando que de manera natural tienda a subir. Cuando el aire caliente se encuentre subiendo hasta el tope de la cámara, se va a encontrar con los orificios superiores del muro Trombe y va a ingresar al interior de la vivienda con una mayor temperatura. El movimiento del fluido ocurre debido al gradiente de temperatura por lo que se define como un proceso natural o libre ya que no se requiere de un factor externo como una bomba o un ventilador para provocar la circulación del aire. Debido a la convección y a la captación de la radiación solar de forma natural es que al muro Trombe se le conoce como sistema solar pasivo.

El aporte térmico por convección es un factor crucial a la hora de estimar o analizar el incremento de temperatura que va a significar la incorporación de un muro Trombe, por lo mismo es que se define la siguiente ecuación para determinar su valor:

$$A_c = h \times A \times \Delta T \quad \text{Ecuación 10}$$

Donde:

- A_c : aporte por convección natural [W].
- h : coeficiente de transmisión de calor [W/m^2K].
- A : área a través de la cual ocurre la transferencia térmica por convección [m^2].
- ΔT : diferencia de temperatura entre el muro y el fluido, de manera que sea siempre positiva [K].

Observación: para la diferencia de temperatura se va a considerar que el fluido se encuentra con la menor temperatura posible.

La superficie a través de la cual ocurre la transferencia es un parámetro que se obtiene directamente del procedimiento digital donde al área del muro se le resta el área total correspondiente a la suma del área de todos los orificios de ventilación.

A pesar de que, el coeficiente de transmisión de calor es un parámetro difícil de obtener teóricamente, ya que se encuentra en función de la configuración geométrica de la superficie y el régimen del flujo, los autores Cengel y Ghajar¹¹ explican que la complejidad de obtener una cantidad exacta que represente este coeficiente se debe a que su obtención depende de correlaciones empíricas sobre números adimensionales como lo son: el número promedio de Nusselt, número de Rayleigh, número de Grashof y el número de Prandtl. Sin embargo, estos mismos autores plantean diferentes ecuaciones que permiten obtener un valor aproximado de este.

El **número de Grashof**, representa la relación entre la fuerza de flotabilidad y la fuerza de viscosidad que actúan sobre el fluido. Se calcula según la Ecuación 11.

$$G_r = \frac{g \times \beta \times (T_s - T_\infty) \times L_c^3}{\nu^2} \quad \text{Ecuación 11}$$

Donde:

- G_r : número de Grashof.
- g : aceleración de gravedad [9,81 m/s²].
- β : coeficiente de expansión volumétrica [0,0035 1/°C].
- T_s : temperatura de la superficie [°C].
- T_∞ : temperatura del fluido suficientemente lejos de la superficie [°C].
- L_c : longitud característica de la configuración geométrica [m].
- ν : viscosidad cinemática del fluido [m²/s].

Observación, se va a considerar que la temperatura del fluido suficientemente lejos de la superficie corresponde a la temperatura exterior de la vivienda. Además, la longitud característica de la configuración geométrica, corresponde a la distancia vertical que existe entre los orificios superiores y los inferiores (ver figura 17 del Anexo).

El **número de Prandtl** describe la relación entre la difusividad de la cantidad de movimiento y la difusividad térmica. Se obtiene de la figura 16 del Anexo.

El **número de Rayleigh**, es el producto de los números de Grashof y de Prandtl. Se calcula según la Ecuación 12.

$$R_a = G_r \times P_r \quad \text{Ecuación 12}$$

Donde:

- R_a : número de Rayleigh.
- G_r : número de Grashof.
- P_r : número de Prandtl.

Cengel y Ghajar, plantean una serie de correlaciones empíricas del número promedio de Nusselt para la convección natural sobre superficies con diferentes configuraciones geométricas dentro de diferentes

¹¹ Libro “Transferencia de calor y masa” cuarta edición. Yunus Cengel y Afshin Ghajar.

rangos para el número de Rayleigh. Con el fin de relacionar el muro Trombe con una de las superficies expuestas, se va a considerar que por sus dimensiones se puede vincular con una placa vertical. Frente a esta configuración geométrica, los autores presentan la siguiente ecuación:

$$N_u = \left\{ 0,825 + \frac{0,387 \times R_a^{1/6}}{\left[1 + \left(\frac{0,492}{P_r} \right)^{9/16} \right]^{8/27}} \right\}^2 \quad \text{Ecuación 13}$$

Donde:

- N_u : número de Nusselt.
- R_a : número de Rayleigh.
- P_r : número de Prandtl.

Para obtener el coeficiente de transmisión de calor “h” que se va a utilizar en la ecuación 10, se va a despejar de la siguiente ecuación del número de Nusselt:

$$N_u = \frac{h \times L_c}{k} \quad \text{Ecuación 14}$$

Donde:

- N_u : número de Nusselt.
- h : coeficiente de transmisión de calor [W/m²K].
- L_c : longitud característica de la configuración geométrica (misma longitud utilizada en el número de Grashof) [m].
- k : conductividad térmica del fluido [W/mK].

La viscosidad cinemática de la Ecuación 11 y la conductividad térmica de la Ecuación 14, son características del aire que circula a través del muro Trombe con una temperatura igual a la del aire que se encuentra dentro de la habitación donde se va a instalar el muro Trombe.

4.3.2 Pérdidas térmicas del muro¹²

Además del aporte térmico que produce la implementación del sistema solar pasivo en una vivienda, también se producen pérdidas. Estas pérdidas son principalmente por la transmitancia térmica del muro, por las infiltraciones de aire por los orificios de ventilación que permiten el intercambio de aire y por cambios en la humedad relativa del aire. Al igual que las ecuaciones de aportes térmicos del apartado 4.3.1, todas las ecuaciones están planteadas considerando condiciones climáticas de bajas temperaturas.

4.3.2.1 Pérdidas por transmitancia térmica a través del muro

Pérdidas por transmisión que se generan a través de los cerramientos que componen la envolvente de una edificación. Se calcula con la ecuación 15.

$$P_t = U \times S \times (T_e - T_i) \quad \text{Ecuación 15}$$

¹² Nch853, acondicionamiento térmico.

Donde:

- P_t : pérdidas por transmitancia térmica [W].
- U : transmitancia térmica [W/m^2K].
- S : superficie expuesta a la diferencia de temperatura [m^2].
- T_e : temperatura exterior de cálculo [K].
- T_i : temperatura interior de diseño [K].

4.3.2.2 Pérdidas por infiltraciones de aire a través del muro

Se producen debido a infiltraciones de aire por espacios en los elementos de la edificación que permiten la libre circulación de aire, produciendo pérdidas térmicas. A pesar de que el muro Trombe permite la libre circulación del aire, este flujo es retenido en la cámara de aire o canal que existe entre el muro de material macizo y la capa de vidrio, donde circula hasta volver a ingresar a la habitación por efecto de la convección natural que se produce. Con el fin de simplificar los cálculos, se asume que las pérdidas generadas por infiltración de aire desde la cámara hacia el exterior, son mínimas y dependen de la construcción y del buen aislamiento del sistema, por lo que no van a ser consideradas dentro de la magnitud total de pérdidas a través del muro. Estas cargas por infiltraciones de aire, sí se deben tener en cuenta durante el cálculo de las pérdidas térmicas de los otros componentes de la envolvente de la habitación (puertas, ventanas u otros espacios que permitan la infiltración) donde se encuentre el muro.

4.3.2.3 Pérdidas por aumento de humedad dentro del muro

Estas pérdidas térmicas ocurren por la alteración y diferencia de humedades relativas entre la humedad exterior de la vivienda y la humedad interior de la cámara de aire del muro Trombe. Los orificios de ventilación permiten una renovación de aire constante, por lo que si se considera el muro como un sistema independiente, se puede establecer que frente a las condiciones climáticas que plantea este proyecto (bajas temperaturas) y la existencia de ventilación por parte del sistema, estas pérdidas por aumento de humedad dentro del muro son muy pequeñas, en consecuencia, no se van a considerar dentro de la magnitud total de pérdidas a través del muro pero sí durante el cálculo de las pérdidas térmicas de la habitación. La humedad dentro del muro Trombe se encuentra directamente relacionada con la ventilación y regulación de humedad dentro de la habitación donde se instale el muro. No hay estudios que indiquen que, durante los meses de bajas temperaturas, la humedad natural producida dentro de la cámara del muro sea un problema que afecte la función de calefacción de este.

5. PARÁMETROS RELEVANTES DE ESTUDIO

Para la modelación del muro, es importante definir los siguientes parámetros que servirán para establecer las características de todas las variables bajo las que se debe construir el sistema solar pasivo. El procedimiento digital final, va a contemplar todos los valores proporcionados con cada definición, es por esto que, en caso de utilizar por ejemplo materiales con propiedades diferentes, se debe tener en cuenta que los valores finales quedan expuestos a variaciones.

5.1 Altura y ancho de la pared

Las dimensiones de la pared, alto y ancho, deben ser un parámetro conocido por el usuario que desee incorporar un muro Trombe clásico en su vivienda. Estas medidas proporcionaran la superficie total que va a captar parte de la radiación solar a través de la cristalería escogida.

5.2 Orientación del muro Trombe

El desplazamiento total de la tierra alrededor del sol dura un año y rota sobre su propio eje durante un día. La altitud máxima del sol y su trayectoria, varían según la época del año, dado que el ángulo de inclinación de la tierra en su eje polar es de $23,45^\circ$ en el plano de su órbita con respecto al sol. Esta inclinación causa que el sol esté más alto en el cielo durante el verano que en el invierno¹³.

En relación a la posición del sol y considerando la variación en la inclinación de los rayos solares que hace que estos incidan de diferentes ángulos según la zona donde se encuentre el muro¹⁴, es recomendable implementar el muro Trombe en una orientación de la vivienda donde se reciba radiación todo el año y durante las horas centrales que es cuando la energía del sol incide con mayor potencia. Importante tener en cuenta en qué hemisferio se ubica la vivienda, ya que según su ubicación la orientación recomendada para construir el muro cambia. Si la vivienda se encuentra en el hemisferio norte, la orientación sugerida del muro Trombe es en el lado sur, de lo contrario, si la vivienda se encuentra en el hemisferio sur, el muro se debe construir en el lado norte.

5.3 Color de superficie expuesta al sol

Para una mayor absorción solar, se recomienda pintar de color negro la superficie expuesta al sol. Según los resultados obtenidos del experimento planteado por V. L. Volantino y E.M. Etchechoury (2002), se puede establecer que existe una relación directamente proporcional entre la temperatura superficial que puede alcanzar el muro y la absorbancia solar del mismo que es otorgada por el tinte y las propiedades de la pintura aplicada. Mientras más oscura es la pintura, mayor es la absorbancia solar y, por tanto, mayor es la cantidad de energía que puede absorber la superficie de un muro.

¹³ Arrieta Paternina, M., Olmos Villalba, L. C., Izquierdo Nuñez, J. L., & Álvarez López, R. A. (2012). Diseño de prototipo de sistema solar fotovoltaico optimizando el ángulo de inclinación de los paneles solares. PROSPECTIVA, 10(1), 97-107.

¹⁴ <https://www.mpptsolar.com/es/orientacion-inclinacion-paneles-solares.html#:~:text=Dado%20que%20los%20paneles%20fotovoltaicos,%C3%A1ngulo%20azimutal%20%3D%20180%C2%B0>).

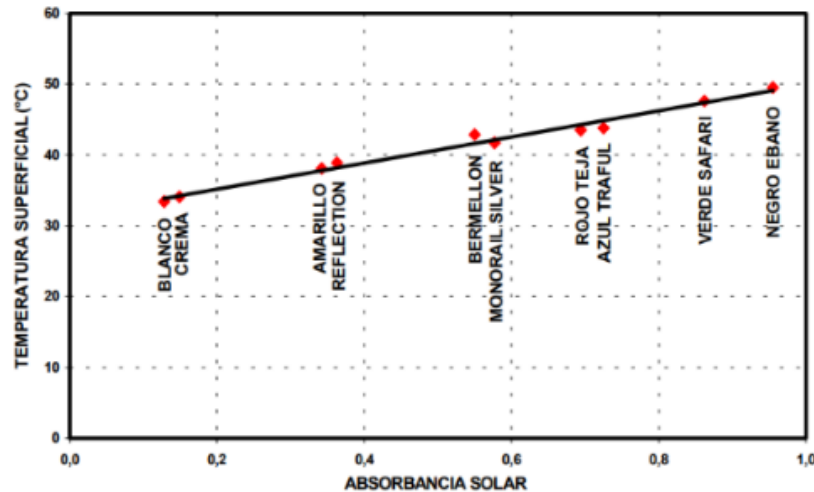


Figura 3: Valores de temperatura superficial versus Absorbancia solar, por superficie del muro.
 Fuente: Evaluación de muros en función de su absorbancia solar. Volantino y Etchechoury (2002).

Para efectos de cálculo, se asume que el usuario va a pintar la superficie de la pared de color negro y por tanto se considera un coeficiente de absorbancia de 0,9.

5.4 Material de la pared

La conductividad térmica del material que se utilice para construir el muro, es un factor clave para determinar la cantidad de calor que es capaz de transmitir el muro en un tiempo determinado. En relación esto, es que en la mayoría de los casos el muro se construye de hormigón o de albañilería, debido a la conductividad que presentan estos materiales en comparación a otros como la madera.

Tabla 2: Densidad aparente y conductividad térmica de diferentes materiales.
 Fuente: Elaboración propia.

Material	Densidad aparente kg/m ³	Conductividad térmica W/mK
Hormigón	2400	1,63
Ladrillo	2000	1
Madera	800	0,157

La conductividad térmica de la madera es baja debido principalmente a su porosidad y densidad, por lo mismo es que tiene mayor resistencia térmica y menor transmitancia térmica que otros materiales como el hormigón y el ladrillo. Los materiales que componen el muro Trombe clásico son sumamente relevantes a la hora de analizar la eficiencia potencial que podría alcanzar el muro, ya que están directamente relacionados con la masa térmica. A mayor densidad, capacidad calorífica y espesor, mayor es la capacidad del material para almacenar calor, y por lo tanto mayor es su masa térmica.

En la norma Nch853-2007, se define transmitancia térmica como el “flujo de calor que pasa por unidad de superficie del elemento y por grado de diferencia de temperaturas entre los dos ambientes separados por

dicho elemento”. En la norma se plantea una fórmula para la transmitancia¹⁵, donde el espesor de los materiales influye directamente en la magnitud del parámetro.

$$U = \frac{1}{R_T} = \frac{\lambda}{e} \quad \text{Ecuación 16}$$

Donde:

- U : transmitancia térmica del material [W/m²K].
- R_T : resistencia térmica del material [m²K/W].
- λ : conductividad térmica del material [W/mK].
- e : espesor del material [m].

5.5 Ventilación

Los orificios del muro son los responsables de permitir la libre circulación del aire. El caudal de aire varía según la diferencia de temperaturas que exista. Un estudio financiado por la Universidad de Taif (Arabia Saudita), publicado el 22 de octubre de 2021, habla sobre el efecto del tamaño del orificio de la pared Trombe para diferentes momentos del día en invierno y verano. La investigación se basó en el análisis numérico, en periodos de invierno y verano, sobre un muro Trombe ubicado en una ciudad tropical. El muro en su composición general es de hormigón con un espesor de 15 cm y se consideró diferentes tamaños en los orificios de entrada y salida de aire. La figura que se muestra a continuación, muestra las diferentes dimensiones de los agujeros que fueron estudiados:

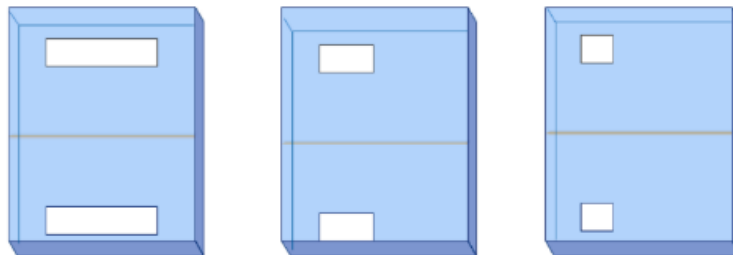


Figura 4: Tres tipos de orificios en un muro Trombe, de 70, 35 y 17,5 cm respectivamente.

Fuente: Estudio sobre el efecto del tamaño del orificio de la pared Trombe. Varios autores (2021).

Del estudio se concluyó que la temperatura de la pared disminuye debido a la reducción de la radiación solar en invierno. La cantidad de radiación es mayor durante el mediodía, de modo que, la temperatura de salida es mayor. Las mediciones arrojaron que mientras más pequeño es el agujero en la pared, mayor es la temperatura de salida del aire de esta. Finalmente se mencionó que la reducción del tamaño del orificio en el muro Trombe mejora la cantidad de temperatura de salida de la pared.

Para la dimensión de los orificios, no existe una norma que establezca parámetros que definan el diseño con las medidas, no obstante, según un artículo de muro Trombe publicado por Juan Manuel Bohórquez, se establece que el área de estos agujeros debe ser suficiente para garantizar un flujo uniforme y constante, sin generar variaciones bruscas del caudal de aire circulante. Además, dentro del artículo se sugiere que debe tomarse como superficie total de las perforaciones de una hilera, aproximadamente 1 dm² por metro cuadrado de muro¹⁶. La relación y el cálculo de dimensiones de los orificios de ventilación planteado por

¹⁵ Nch853-2007, acondicionamiento térmico.

¹⁶ Artículo de Juan Manuel Bohórquez sobre muro Trombe.

Bohórquez se va a utilizar como recomendación dentro del programa propuesto por este proyecto, pero no como obligación o factor determinante, ya que como se menciona más adelante, es responsabilidad del usuario escoger las dimensiones correspondientes.

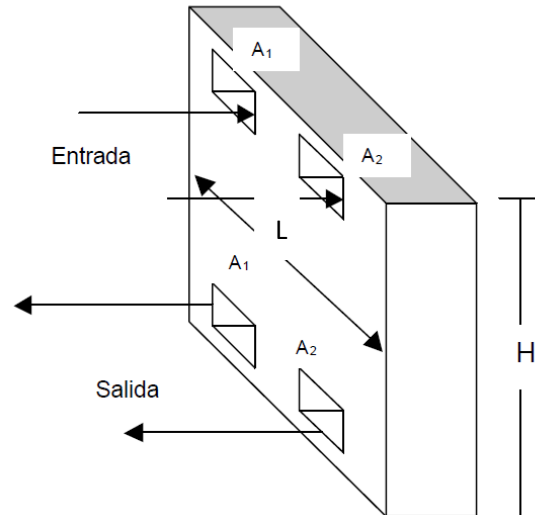


Figura 5: Muro Trombe.

Fuente: Artículo de Juan Manuel Bohórquez sobre muro Trombe.

$$\text{Área de orificios de ventilación} = \frac{L \times H}{200} \quad \text{Ecuación 17}$$

Donde,

L: Largo del muro en metros y H: Altura del muro en metros.

La distancia entre los orificios superiores y los inferiores debe ser la más grande posible, ya que, esta favorece al fenómeno de termo circulación y a la convección que se produce en el muro. La instalación de rejillas que permitan abrir y cerrar los orificios de ventilación, cambia el coeficiente de transferencia de calor entre el aire en el espacio, la pared y el acristalamiento (Hami et al., 2012).

La distancia entre los orificios de ventilación, es un parámetro que debe definir el usuario al igual que el número de orificios de ventilación. La cantidad de orificios en la parte inferior debe ser igual que la cantidad de orificios superiores, esto para que exista un equilibrio entre el volumen del flujo de aire que sale (parte inferior) y el flujo de aire que ingresa al interior de la vivienda. En relación a la posición de los orificios (superiores o inferiores), se deben construir en fila, esto quiere decir que si se desea agregar otro orificio se tiene que construir al lado de los otros (con cierta separación) de manera que se forme una hilera horizontal.

5.6 Tipo de cristalería

El primer material del muro Trombe clásico que recibe la radiación solar, es la capa transparente o translúcida que protege al muro, por esta razón, es de suma importancia saber si existe una correlación entre la transmitancia y el tipo de material utilizado. Según un estudio realizado el año 2001 por D. Perelló y A. Fasulo, donde se compara la transmitancia de policarbonato (material translucido) y la transmitancia de vidrio (material transparente), se concluyó que el vidrio, en comparación al policarbonato, tiene la capacidad de transmitir una mayor cantidad de calor por unidad de tiempo y superficie. En relación al cálculo de resistencias y transmitancias térmicas presentado en la Nch853-2007, se puede establecer que mientras mayor sea el espesor que se le asigne al acristalamiento, mayor va a ser la resistencia térmica del mismo y por lo tanto la superficie tendrá menos transmitancia térmica que una superficie con una capa más delgada.

La elección de la cristalería está limitada principalmente por el precio del cristal que se desee instalar ya que, según el tipo, es que su valor en el mercado varia. En el presente informe se va a trabajar con 3 tipos de cristales, el primero y más barato es un cristal incoloro común, el segundo es un vidrio Termopanel y el tercero es un vidrio Termopanel Low-E que, según las características de estos, ofrecen las transmitancias expuestas en la Tabla 3.

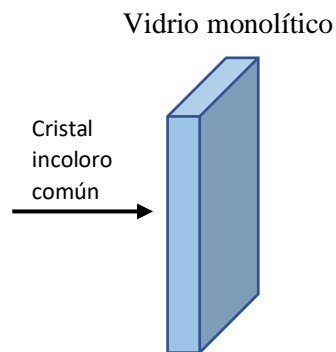


Figura 6: Composición vidrio monolítico.
Fuente: Elaboración propia.

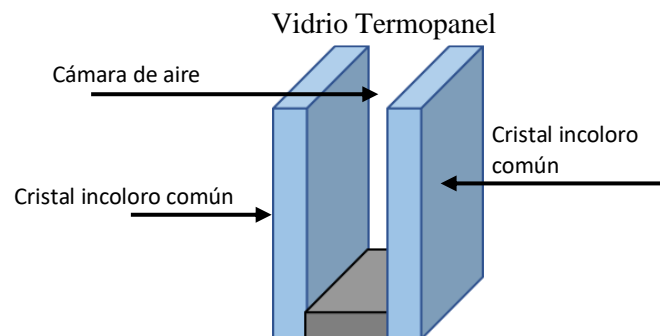


Figura 7: Composición Termopanel.
Fuente: Elaboración propia.

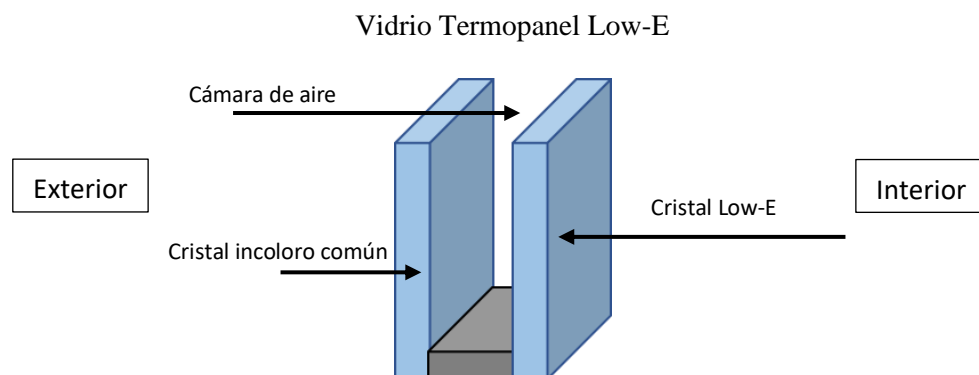


Figura 8: Composición vidrio Low-E.
Fuente: Elaboración propia.

Tabla 3: Transmitancia térmica y coeficiente de ganancia de calor solar según cristalería.
 Fuente: Elaboración propia.

Tipo de cristalería	Transmitancia térmica ¹⁷ W/(m ² K)	Coeficiente de ganancia de calor solar (SHGC) ¹⁸
Vidrio monolítico	5,8	0,85
Vidrio Termopanel	2,8	0,76
Vidrio Termopanel Low-E	1,8	0,65

Durante la noche, cuando la captación de energía por parte del muro disminuya debido a la inexistente radiación solar, la capa de vidrio es la encargada de evitar que el calor acumulado en el muro salga al exterior, pudiendo así redirigirlo hacia el interior de la vivienda. Mientras menor sea la transmitancia térmica del vidrio, mayor va a ser la capacidad de retención de energía en la cámara de aire del muro Trombe. Si el vidrio es de doble acristalamiento y bajo emisivo la condensación será mucho menor que la de un vidrio simple. Una menor condensación disminuye los efectos de la humedad dentro de muro.

5.6.1 Superficie de vidrio

El área de la superficie del vidrio debe ser un tamaño que permita que la superficie del muro pueda captar la radiación solar a través de toda su superficie. Las dimensiones de la superficie acristalada se deben escoger en relación al diseño final que se le dé al muro Trombe y, por ende, es decisión del usuario. Dentro de la programación del procedimiento digital se va a considerar que la superficie de vidrio tiene las mismas dimensiones que la superficie del muro.

5.7 Cámara de aire

El espacio que se debe dejar entre la cristalería y el muro, permite la libre circulación del aire hacia el interior de la vivienda. Si se designa un espacio muy estrecho como cámara de aire (2 cm o menos), se limita el caudal de aire que circula en el sistema pasivo y aumentan las pérdidas térmicas. De forma contraria, si el espacio es muy grande puede perjudicar el almacenamiento de energía del muro ya que el aire pierde temperatura al moverse en un espacio más amplio. Según lo mencionado por A. Wilson miembro de la asociación de energía solar de Nuevo México, el espacio recomendado entre el vidrio y el muro debe variar entre 5 y 15 cm. El rango propuesto por Wilson es el mismo que propone Edward Mazria en su libro de energía solar pasiva. Considerando los rangos que proponen los autores mencionados, el procedimiento digital va a sugerir al usuario que durante la construcción se considere un rango de entre 5 y 15 cm para el espesor de la cámara.

¹⁷ <https://www.termopanelsmart.cl/soluciones/low-e/>

¹⁸ <https://www.fau.ucv.ve/idec/racionalidad/Paginas/Manualventanas.html>

5.8 Espesor del muro

El espesor del muro Trombe, es un factor fundamental que influye de forma directa en la capacidad de almacenamiento de calor que pueda tener el muro. Mientras mayor sea el espesor del muro, mayor va a ser la cantidad de energía que puede contener el muro. La energía almacenada es liberada en forma de calor. La liberación más grande se produce principalmente en la noche, cuando no hay radiación solar y la temperatura exterior disminuye. El procedimiento digital da la opción al usuario para que pueda ingresar el espesor de muro que se desee y frente a esta variable, debe tener en cuenta que un muro más grueso va a tener mayor inercia térmica y una amplitud menor en la variación de la temperatura interior del local, lo que permite almacenar mayor energía en su masa térmica para posteriormente ser liberada hacia el interior de la vivienda. Un muro de menor espesor va a tener menor inercia térmica, por lo que la energía almacenada en el interior del muro se va a disipar de forma más rápida, lo que va a generar que frente a horas de la noche cuando la temperatura exterior comience a descender, un muro de mayor espesor va a tener la capacidad de mantener la temperatura interior por más tiempo que un muro más delgado.

6. DEFINICIÓN DE VARIABLES NECESARIAS PARA ELABORAR EL PROGRAMA

Antes de comenzar con la elaboración del procedimiento digital, se debe definir o establecer las diferentes variables que el usuario debe conocer e ingresar para ejecutar el programa. Al final de este apartado, se describen las variables de salida que va a entregar el programa.

6.1 Variables de entrada

6.1.1 Temperatura media interior y exterior [°C]

Estos parámetros están relacionados con la geolocalización de la vivienda donde se instale el muro Trombe, por lo tanto, son variables que se deben estimar o extraer de sitios oficiales que entreguen información sobre mediciones de temperaturas. El muro está diseñado para ser más eficiente en invierno, por lo que se recomienda considerar bajas temperaturas.

6.1.2 Altura y largo del muro [m]

Estas medidas dependen de la arquitectura de la vivienda y deben ser entregadas por el usuario.

6.1.3 Superficie útil de la habitación [m²]

Es la superficie de la habitación de la vivienda donde se va a implementar el muro Trombe, sin considerar muros, pilares u otros elementos por donde los habitantes no puedan caminar o poner muebles.

6.1.4 Espesor del muro [m]

Esta medida debe ser entregada por el usuario considerando lo que se indica en el apartado 5.8. Por otra parte, el usuario debe tener en cuenta que la elección de un grosor inferior implica un costo menor en la construcción del muro, ya que se va a necesitar un menor volumen de material, a diferencia de un muro con un espesor mayor.

6.1.5 Espesor de cámara de aire

Es una medida que puede escoger e ingresar el usuario en base al rango propuesto como sugerencia dentro del programa. Los cálculos contemplan que el usuario va a construir el muro Trombe con un espesor dentro del rango establecido en el ítem 5.7 (entre 5 y 15 cm).

6.1.6 Altura, largo y cantidad de orificios de ventilación [m]

Estas dimensiones se pueden distinguir de mejor forma en la Figura 17 del Anexo y son de elección del usuario, pero se recomienda seguir lo establecido en el apartado 5.5.

6.1.7 Distancia “d” [m]

Corresponde a una distancia señalada en la Figura 17 del Anexo.

6.1.8 Muro compuesto como elemento homogéneo – Transmitancia térmica del muro

Si la elección del usuario es construir el sistema Trombe con un muro homogéneo, es decir, un elemento de caras planas y paralelas conformado por un solo material de conductividad térmica, el input que debe entregar el usuario corresponde a la conductividad térmica del material en [W/mK] que se va a utilizar para construir el muro. La resistencia y transmitancia térmica del muro son calculadas automáticamente por el programa según lo establecido en la Nch853-2007.

6.1.9 Muro compuesto como elemento heterogéneo – Transmitancia térmica del muro

Si la elección del usuario es construir el sistema Trombe con un muro heterogéneo, es decir, un elemento de caras planas y paralelas conformado por varios materiales de conductividades térmicas diferentes, se recomienda utilizar una tabiquería de madera con plancha de fibrocemento o muro de albañilería. En relación a la elección de los materiales que componen la pared, se debe ingresar directamente en el programa la transmitancia térmica media del muro en [W/m²K], considerando lo establecido en la Nch853-2007 para elementos con heterogeneidades.

6.1.10 Tipo de cristalería

El tipo de cristalería queda a elección del usuario, ya que depende de su presupuesto y de las propiedades que se le quiera adicionar al sistema de acuerdo a lo presentado a lo largo de este informe. Para conocer las características de la ventana como la distancia de la cámara de aire o el espesor del cristal, se debe considerar los valores expuestos en la Tabla 3 sobre la transmitancia térmica asociada a cada tipo de ventana. Si la elección del usuario es utilizar otro tipo de vidrio diferente a los sugeridos, el programa da la opción de que se ingrese la resistencia térmica y el coeficiente de ganancia solar del vidrio que se desee instalar.

6.1.11 Pérdidas térmicas en la habitación [W]

Se debe ingresar las pérdidas térmicas que sufre el local o habitación donde se va a construir el muro Trombe. Este valor debe contemplar la pérdida total de calor que sufra la habitación, sin importar los factores que las propicien. La cantidad que se ingrese no debe incluir las pérdidas que produce el muro Trombe.

6.1.12 Radiación solar directa [W/m²]

Depende de la orientación del muro, es una energía asociada a la cantidad de radiación proveniente del sol que es capaz de atravesar la superficie de cristal y penetrar el muro Trombe. Este parámetro está relacionado con la geolocalización de la vivienda donde se instale el muro, por esto, se debe estimar o extraer de sitios oficiales. La magnitud que se debe ingresar, debe representar un valor promedio de la radiación solar directa que incide en la superficie de vidrio por hora durante los meses más fríos del año según la orientación del muro y el hemisferio en el que se encuentre la vivienda. El programa automáticamente aplica la declinación solar correspondiente a la radiación ingresada según lo establecido en la hoja “Declinación solar” del archivo Excel que se adjunta junto con este informe.

6.1.13 Temperatura media que puede alcanzar el muro [°C]

Este es un valor promedio, se puede estimar de acuerdo al comportamiento del muro frente a temperaturas comunes durante días fríos. No se establece ni limita el proceso para obtener la temperatura por lo que queda a libre elección del usuario, aun así, se debe tener muy presente que este parámetro es fundamental para definir el rango de valores en los que va a oscilar el calor por convección que produce el muro.

6.1.14 Ubicación de la vivienda

Este parámetro depende del país en el que se encuentre ubicada la vivienda donde se quiera implementar el muro Trombe. La elección de la ubicación, está ligada con la declinación solar que se le aplica a la radiación solar directa que llega al muro.

6.2 Variables de salida

6.2.1 Potencia que entrega el muro [W]

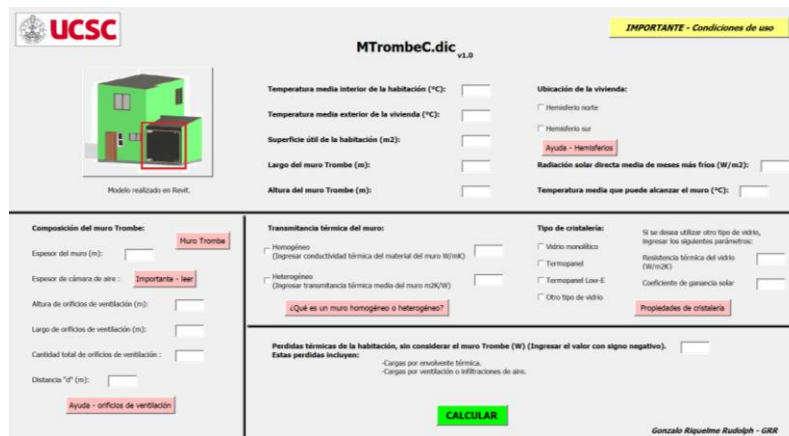
El rango de variación que se entrega, depende principalmente del coeficiente de transmisión de calor del aire que circula entre la cámara y la vivienda. Bajo condiciones estáticas y considerando los valores fijos que se ingresan al programa, la potencia se define como el ritmo al que se usa o genera la energía del muro Trombe y puede ser medida en cualquier instante de tiempo ya que siempre tendrá el mismo valor. Este valor de potencia contempla, las cargas que generan aporte térmico y las que generan pérdidas. El principal objetivo de entregar la potencia del muro, es que el usuario pueda relacionar las dimensiones o los diferentes parámetros que ingresó al programa, con una magnitud que va a variar a medida que se cambien los valores de entrada.

6.2.2 Pérdidas [W]

Dado que el muro Trombe está diseñado para funcionar como sistema de calefacción, estas pérdidas contemplan que la cámara de aire se mantiene cerrada hacia el exterior de la vivienda, pero permite la libre circulación del aire desde la cámara hacia el interior de la vivienda. Estas pérdidas corresponden a las que genera el muro Trombe por sí solo.

7. ELABORACIÓN DE PROCEDIMIENTO DIGITAL

El procedimiento digital se realizó en el programa VISUAL BASIC de Excel. Con las variables de entrada ya definidas, se creó un UserForm o formulario, con todas las ventanas necesarias para que el usuario pueda ingresar, en un formato didáctico, con botones de ayuda e imágenes explicativas, todos los valores necesarios para que el programa entregue la potencia y las pérdidas térmicas del muro. Al programa se le dio el nombre de “MTrombeC.dic”.



The screenshot shows a software interface for calculating thermal losses of a Trombe wall. It features several input fields for room temperature, exterior temperature, room area, wall length, and wall height. There are also checkboxes for room location (north or south) and a section for wall composition (homogeneous or heterogeneous) with material properties. A 'CALCULAR' button is prominently displayed at the bottom.

Figura 9: Diseño de UserForm en Visual Basic.
 Fuente: Elaboración propia.

Una vez diseñado el UserForm, se programó el botón CALCULAR con todas las ecuaciones y consideraciones que se plantearon a lo largo de este informe. Dentro de la programación del botón hay variables que se definen durante el ingreso de los valores por parte del usuario y otras variables que se definen directamente a través de fórmulas. En el Anexo se muestra de qué forma se llevó a cabo el procedimiento digital y la programación del mismo.

8. ¿QUÉ SUCEDE CON EL MURO EN VERANO?

En verano, el muro Trombe se puede convertir en un problema debido principalmente a las ganancias térmicas no deseadas y un sobrecalentamiento descontrolado provocado por las altas temperaturas. Por lo cual, para mejorar la eficiencia del muro en verano y evitar los problemas mencionados se recomiendan las opciones que se plantean a continuación.

La primera alternativa sería cerrar los orificios de ventilación superiores y abrir la cámara del sistema Trombe para liberar el aire caliente hacia el exterior de la vivienda.

Otra solución adicional, incluyendo las mencionadas anteriormente, es instalar un alero que intercepte los rayos solares, disminuyendo el impacto y cambiando la dirección de parte de estos, tal como se indica en la Figura 10 propuesta por el autor José Tomás Franco en el artículo "En Detalle: Muro Trombe", donde se puede observar que el muro en verano es capaz de liberar el aire que logra ingresar desde el interior de la vivienda hacia la cámara, para luego liberarlo al exterior generando una pérdida de calor que permite el control y regulación de la temperatura interior de la vivienda.

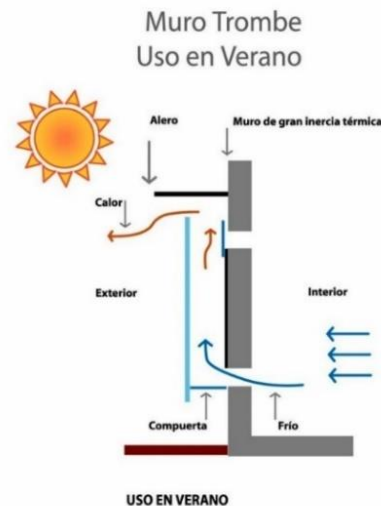


Figura 10: Funcionamiento de muro Trombe en verano.
 Fuente: "En Detalle: Muro Trombe". José Tomás Franco (2011).

Una alternativa, aunque poco estética, sería la instalación de una persiana veneciana sobre el cristal del muro Trombe para regular el paso de la radiación solar y evitar su penetración directa sobre el muro captador de energía.

9. EJEMPLO DE USO DEL PROGRAMA PARA VIVIENDA

Se realizó un diseño 3D de una vivienda cualquiera, de 2 pisos y 33 m² de construcción mediante el programa Revit de Autodesk, que se puede observar en la Figura 11. El modelo construido pretende exponer de manera sencilla, una vista general de la casa, sin incluir grandes detalles como las fundaciones y pasando por alto la composición de los elementos estructurales, dado que el fin principal del dibujo es crear una imagen a escala que logre ejemplificar el cambio físico que tendría una vivienda luego de la implementación de un muro Trombe diseñado a través del procedimiento digital propuesto en este proyecto. La habitación donde se va a incorporar este muro, es un recinto destinado como dormitorio y tiene las características y dimensiones que se entregan en las Tablas 1 y 2 del Anexo.

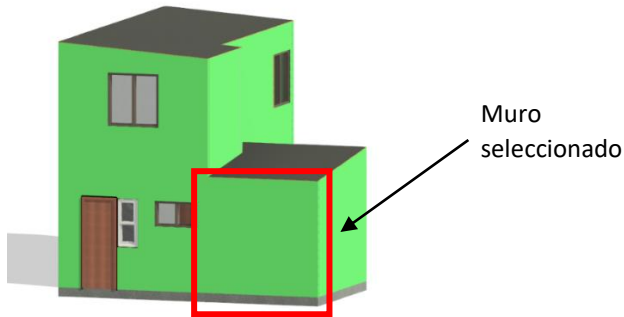


Figura 11: Modelo de vivienda sin muro Trombe en software Revit.
 Fuente: Elaboración propia.

Finalmente, los datos que arrojó el programa son los que se indican en la Tabla 4.

Tabla 4: Variables de salida de la vivienda.
 Fuente: Elaboración propia.

Potencia térmica del muro Trombe	506,73 W
Pérdidas térmicas del muro Trombe	95 W

10. CONCLUSIÓN Y COMENTARIOS FINALES

En cuanto al programa elaborado “MTrombeC.dic” para determinar la potencia y las pérdidas térmicas que genera un muro Trombe como sistema de calefacción en una vivienda, los resultados que se entregan están relacionados en gran medida a estimaciones medias que debe ingresar el usuario. El programa trabaja con valores fijos, por lo que la persona que lo utilice, debe tener muy presente que estos valores van a variar dependiendo de los factores climáticos que afecten a la vivienda donde se encuentre el muro, es por esto que los resultados obtenidos a través del procedimiento digital son estimaciones obtenidas de forma teórica que tienen como objetivo que el usuario pueda relacionar las dimensiones o los diferentes parámetros que ingresó al programa, con una magnitud que va a variar a medida que el cambie los valores de entrada.

El programa se encuentra en su versión Alpha, debido a esto y con el fin de verificar su funcionalidad y recopilar comentarios o sugerencias, se deja a disposición de la comunidad con el código abierto para que en el futuro se le incorporen variables que permitan calcular valores más exactos.

11. REFERENCIAS

- Agrawal, B., & Tiwari, G. N. (2010).** Building integrated photovoltaic thermal systems: for sustainable developments. Royal Society of Chemistry.
- Birkeland, J. (2012).** Positive development: from vicious circles to virtuous cycles through built environment design. Routledge.
- Bouet, P. (2020).** La pared de Trombe. En *Enfrentando el poder* (pp. 249-263). El descubrimiento.

- Dabaieh, M., & Elbably, A. (2015).** Ventilated Trombe wall as a passive solar heating and cooling retrofitting approach; a low-tech design for off-grid settlements in semi-arid climates. *Solar Energy*, 122, 820-833.
- Dodoo, A., Gustavsson, L. y Sathre, R. (2012).** Efecto de la masa térmica en los balances de energía primaria del ciclo de vida de un edificio de estructura de hormigón y madera. *Energía Aplicada*, 92, 462-472.
- Kanimozhi, B., & Ramesh Bapu, B. R. (2012).** Experimental study of thermal energy storage in solar system using PCM. In *Advanced Materials Research* (Vol. 433, pp. 1027-1032). Trans Tech Publications Ltd.
- Khetib, Y., Alotaibi, A. A., Alshahri, A. H., Cheraghan, G., Sharifpur, M., & Meyer, J. P. (2021).** Study on the Effect of Hole Size of Trombe Wall in the Presence of Phase Change Material for Different Times of a Day in Winter and Summer. *Processes*, 9(11), 1886.
- Mercado, M. V., Esteves Miramont, A., Filippín, C., & Flores Larsen, S. E. (2009).** Sistema de calefacción radiante solar pasivo: Diseño, construcción de un prototipo y obtención de resultados.
- Morse, E.S. (1881).** PATENT 'Warming and Ventilating Apartments by the Sun's Rays'.
- Müller, E. (2002).** Manual de diseño para viviendas con climatización pasiva. Forschungslabor für Experimentelles Bauen, Universidad de Kassel, Alemania.
- Perelló, D., & Fasulo, A. (2001).** Comparación de las transmitancias de policarbonatos y vidrio. *Avances en Energías Renovables y Medio Ambiente*, 5.
- Rabani, M., Kalantar, V., Dehghan, A. A., & Faghieh, A. K. (2015).** Empirical investigation of the cooling performance of a new designed Trombe wall in combination with solar chimney and water spraying system. *Energy and Buildings*, 102, 45-57.
- Wang, D., Hu, L., Du, H., Liu, Y., Huang, J., Xu, Y., & Liu, J. (2020).** Classification, experimental assessment, modeling methods and evaluation metrics of Trombe walls. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 124, 109772.

ANEXO
1. Programación

A continuación, se muestra una tabla con el significado de cada variable que no es definida dentro del código. Estas variables son las ingresadas directamente por el usuario en cada casilla o selección de alternativa.

Tabla 1: Nombre de variables utilizadas durante la programación.
 Fuente: Elaboración propia.

Nombre de la variable	Significado
Me.ti.Value	Temperatura media interior de la habitación
Me.te.Value	Temperatura media exterior de la habitación
Me.su.Value	Superficie útil de la habitación
Me.la.Value	Largo del muro
Me.al.Value	Altura del muro
Me.emuro.Value	Espesor del muro
Me.aov.Value	Altura de orificios de ventilación
Me.lov.Value	Largo de orificios de ventilación
Me.cov.Value	Cantidad total de orificios de ventilación
Me.d.Value	Distancia "d"
mh.Value	Elección: muro homogéneo
mhe.Value	Elección: muro heterogéneo
Me.cte.Value	Conductividad térmica del material de muro homogéneo
Me.re.Value	Transmitancia térmica media muro heterogéneo
vm.Value	Elección: vidrio monolítico
tp.Value	Elección: termopanel
le.Value	Elección: termopanel low-e
ov.Value	Elección: otro tipo de vidrio
Me.rtv.Value	Resistencia térmica del vidrio
Me.cgs.Value	Coficiente de ganancia solar
Me.pl.Value	Pérdidas de calor en la habitación
Me.rd.Value	Radiación solar directa
Me.tm.Value	Temperatura media del muro
hn.Value	Elección: hemisferio norte
hs.Value	Elección: hemisferio sur

Las figuras que se presentan en las siguientes páginas, exponen de qué forma se realizó el proceso de programación. Las variables definidas dentro del mismo código, solo se van a describir la primera vez que aparecen, luego es deber del lector identificar el significado de la misma dentro de una ecuación.

```
Private Sub CommandButton1_Click()  
sm = ((Me.la.Value) * (Me.al.Value)) - ((Me.aov.Value) * (Me.lov.Value) * (Me.cov.Value))  
rms = sm / (Me.su.Value)  
sv = sm
```

Figura 1: Programación en Visual Basic.
Fuente: Elaboración propia.

Donde,

- sm: superficie del muro, se obtiene multiplicando el largo por la altura ingresadas del muro y a este valor se le resta la superficie total que ocupan los orificios de ventilación.
- rms: relación entre superficie del muro Trombe y superficie útil de la habitación, se obtiene dividiendo “sm” por la superficie útil de la habitación.
- sv: superficie de vidrio.

A continuación, se muestran las variables que son definidas por la elección del usuario. Mediante la secuencia “If”, se comprueba una condición (tipo de cristalería) y si la condición es verdadera (elección de una de las alternativas que se le ofrecen al usuario) entonces se realiza lo que se muestra a continuación en el código:

```
If vm.Value = True Then  
    c = 0.85  
    rt = 1 / 5.8  
End If  
  
If tp.Value = True Then  
    c = 0.76  
    rt = 1 / 2.8  
End If  
  
If le.Value = True Then  
    c = 0.65  
    rt = 1 / 1.8  
End If  
  
If ov.Value = True Then  
    c = Me.cgs.Value  
    rt = Me.rtv.Value  
End If
```

Figura 2: Programación en Visual Basic.
Fuente: Elaboración propia.

Donde,

- c: coeficiente de ganancia solar (de tabla 4).
- rt: resistencia térmica del vidrio (de tabla 4).

Luego de guardar las variables según la elección del usuario, el programa nuevamente mediante secuencias “If”, se define diferentes variables según la selección de alternativas según la composición del muro (heterogéneo u homogéneo). En caso de que el muro sea homogéneo, el programa calcula la transmitancia térmica del muro Trombe de forma automática, de lo contrario, el usuario debe ingresar la transmitancia térmica media del muro Trombe.

```

If mh.Value = True Then
    espesor = emuro.Value
    resistenciapared = espesor / (Me.cte.Value)
    resismuro = 0.12 + 0.05 + rt + rtc + resistenciapared
    transmuro = 1 / resismuro
End If

If mhe.Value = True Then
    espesor = emuro.Value
    transmuro = Me.re.Value
End If
    
```

Figura 3: Programación en Visual Basic.
 Fuente: Elaboración propia.

Donde,

- espesor: espesor del muro.
- resistenciapared: resistencia térmica de la pared del muro Trombe.
- resismuro: resistencia térmica del muro Trombe.
- transmuro: transmitancia térmica del muro Trombe.

Luego de definir la resistencia del muro, el programa calcula la transmitancia térmica del muro, que sirve para obtener las pérdidas térmicas que genera.

$$\text{perdida} = \text{transmuro} * (\text{Me.te.Value} - \text{Me.ti.Value}) * \text{sm}$$

Figura 4: Programación en Visual Basic.
 Fuente: Elaboración propia.

Donde,

- perdida: pérdidas térmicas del muro, se obtiene de la Ecuación 6.

Las pérdidas térmicas que genera el muro Trombe por sí solo, sirven para calcular el coeficiente de pérdidas térmicas según la siguiente ecuación:

$$F = \text{Abs}((\text{Me.pl.Value} + \text{perdida}) / (\text{Me.su.Value}))$$

$$\text{perdidas} = (\text{Me.pl.Value} + \text{perdida})$$

Figura 5: Programación en Visual Basic.
 Fuente: Elaboración propia.

Donde,

- F: coeficiente de pérdidas térmicas, se obtiene de la Ecuación 4.
- perdidas: perdidas térmicas de la habitación más perdidas por el muro Trombe.

En esta sección del código, mediante una secuencia “If” se utilizan las fórmulas obtenidas con la relación planteada en el Excel que se adjunta a este informe. Si el coeficiente de pérdidas térmicas arroja un valor menor o igual a 28, el porcentaje de transmisión de energía definido como “p” asume un valor sino se calcula mediante otro procedimiento.

```
If F <= 28 Then
  p = (-22.5 * rms + 44.25) / 100
Else
  Y = 0.1518 * F - 26.417
  X = 0.121 * F + 42.651
  p = (Y * rms + X) / 100
End If
```

Figura 6: Programación en Visual Basic.
Fuente: Elaboración propia.

Donde,

- p: porcentaje de energía solar que pasa a través del muro, se obtiene de la Ecuación 4.
- X e Y: son variables definidas en la hoja “% de energía – muro” del archivo Excel que se adjunta junto con este informe (sus ecuaciones se obtienen a partir del gráfico de la figura 2).

A continuación, frente a la elección de la ubicación de la vivienda, se le aplica la declinación solar a la radiación solar directa ingresada por el usuario.

```
If hn.Value = True Then
  radiación = (Me.rd.Value) * 0.94484
End If

If hs.Value = True Then
  radiación = (Me.rd.Value) * 0.94265
End If
```

Figura 7: Programación en Visual Basic.
Fuente: Elaboración propia.

Donde,

- radiación: corresponde a la radiación solar directa multiplicada por el factor de declinación solar.

Luego se calcula el aporte de calor por la radiación solar que se transmite al interior de la habitación.

```
aportesolar = sv * (Me.rd.Value) * c * p
```

Figura 8: Programación en Visual Basic.
Fuente: Elaboración propia.

Donde,

- aportesolar: el aporte de energía del muro por radiación, se obtiene de la Ecuación 3.

Las variables que se indican a continuación, son las necesarias para obtener el coeficiente de transmisión de calor, que sirva para reemplazarlo en la ecuación establecida para calcular el aporte por convección que genera el muro Trombe.

```

Lc = Me.al.Value - (2 * (Me.d.Value) + 2 * (Me.aov))
conductividadtermica = 0.00008 * (Me.ti.Value) + 0.0236
numerodeprandtl = 0.0003 * (Me.ti.Value) + 0.736
viscosidadcinematica = 0.00000009 * (Me.ti.Value) + 0.00001
Gr = (9.81 * 0.0035 * (Me.tm.Value - Me.te.Value) * ((Lc) ^ 3)) / ((viscosidadcinematica) ^ 2)
Ra = Gr * numerodeprandtl
den = (1 + (0.492 / numerodeprandtl) ^ 0.5625) ^ 0.296296
num = 0.387 * ((Ra) ^ 0.166667)
Nu = (0.825 + (num / den)) ^ 2
h = (Nu * conductividadtermica) / Lc
    
```

Figura 9: Programación en Visual Basic.
 Fuente: Elaboración propia.

Donde,

- L_c : longitud característica de la configuración geométrica, se puede observar en la figura 18 del Anexo.
- Las variables definidas como *conductividadtermica*, *numerodeprandtl* y *viscosidadcinematica* se obtienen de las ecuaciones relacionadas con las líneas de tendencia de los gráficos presentados en la hoja “Conductividad,viscosidad y Pr” del archivo Excel que se adjunta junto con este informe.
- Gr : número de Grashof, se obtiene de la ecuación 11.
- Ra : número de Rayleigh, se obtiene de la ecuación 12.
- Las variables *den* y *num*, son expresiones que forman parte de la ecuación del número de Nusselt. Se crearon con el propósito de dejar el código de forma más simplificada.
- Nu : número de Nusselt, se obtiene de la ecuación 14.
- h : coeficiente de transmisión de calor, se obtiene de la ecuación 14.

Finalmente, el aporte a la potencia térmica de la vivienda que entrega el muro Trombe se calcula a partir de la ecuación 11 y queda expresado de la siguiente forma en el código de programación:

```

aporte = h * sm * Abs(Me.te.Value - Me.tm.Value) + aportesolar + perdida
    
```

Figura 10: Programación en Visual Basic.
 Fuente: Elaboración propia.

2. Ejemplo de uso del programa para vivienda

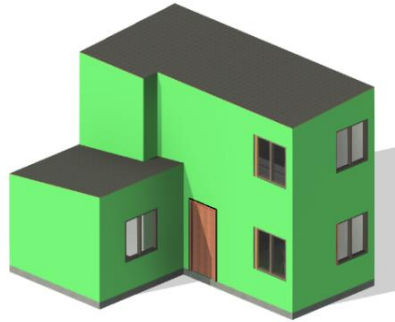


Figura 11: Modelo de vivienda en software Revit.
 Fuente: Elaboración propia.

Con el fin de implementar el sistema de Trombe en la vivienda, se eligió un muro al azar, ubicado en el primer piso de la vivienda y que se indica a continuación.

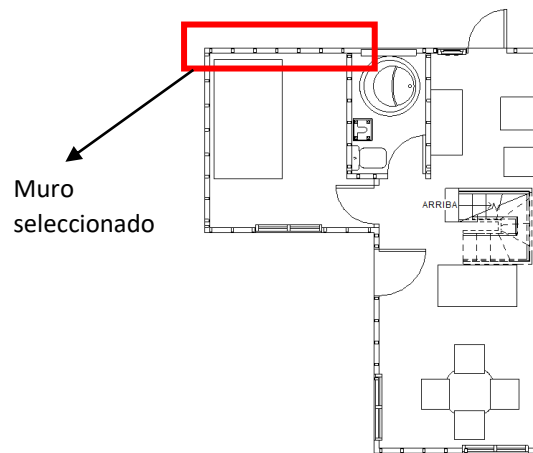


Figura 12: Plano de primer piso de vivienda en software Revit.
 Fuente: Elaboración propia.

Tabla 2: Variables conocidas de la vivienda.
 Fuente: Elaboración propia.

Variable	Dimensión
Superficie útil de la habitación	9,15 m ²
Altura del muro	2,33 m
Largo del muro	2,50 m
Orientación	Sur

Las características definidas de la habitación, son las variables que se ingresan en el programa para obtener las dimensiones del muro. Las variables que dependen de la geolocalización y de las preferencias del usuario, se van a escoger aleatoriamente y se describen a continuación.

Tabla 3: Variables de entrada de la vivienda.
 Fuente: Elaboración propia.

Variable	Dimensión
Temperatura media interior	15°C
Temperatura media exterior	6°C
Muro	Homogéneo
Conductividad térmica del muro	1,63 W/mK
Espesor del muro	0,3 m
Altura de orificios de ventilación	0,2 m
Largo de orificios de ventilación	0,3 m
Cantidad total de orificios de ventilación	4
Distancia “d”	0,04 m
Tipo de cristalería	Vidrio monolítico
Pérdidas térmicas de la habitación	-300 W
Radiación solar	120 W/m ²
Temperatura media del muro	23°C
Ubicación de la vivienda	Hemisferio sur



Figura 13: Modelo de vivienda con muro Trombe en software Revit.
 Fuente: Elaboración propia.

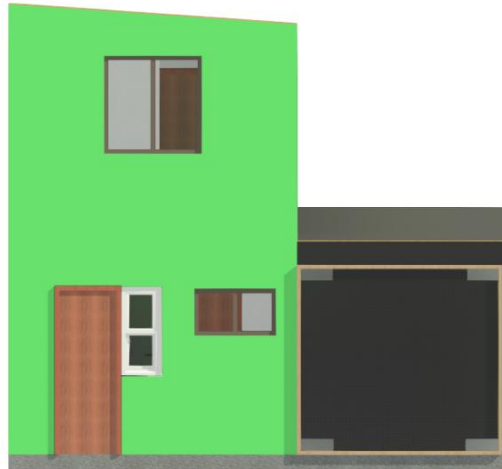


Figura 14: Modelo de vivienda con muro Trombe en software Revit.
Fuente: Elaboración propia.

En la Figura 14 se puede observar que parte del muro seleccionado queda libre o se encuentra fuera del sistema implementado. Específicamente la parte superior y la parte derecha del muro no forman parte del muro propiamente tal, ya que la primera constituye parte del cielo de la habitación y la segunda corresponde al muro lateral de la habitación.

El diseño final del muro visto desde el interior de la habitación, sería algo muy similar a la imagen que se muestra a continuación, que se extrajo del modelo realizado en Revit.

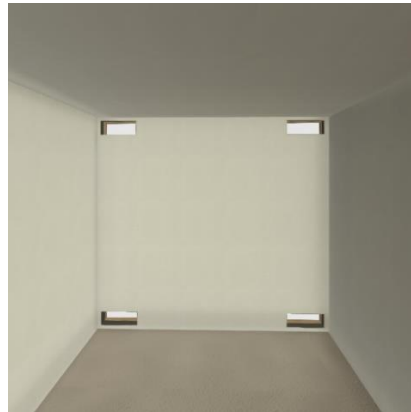


Figura 15: Modelo de vivienda con muro Trombe en software Revit.
Fuente: Elaboración propia.

3. Propiedades del aire

Temp. $T, ^\circ\text{C}$	Densidad $\rho, \text{kg/m}^3$	Calor específico c_p $\text{J/kg} \cdot \text{K}$	Conductividad térmica $k, \text{W/m} \cdot \text{K}$	Difusividad térmica $\alpha, \text{m}^2/\text{s}$	Viscosidad dinámica $\mu, \text{kg/m} \cdot \text{s}$	Viscosidad cinemática $\nu, \text{m}^2/\text{s}$	Número de Prandtl Pr
-150	2.866	983	0.01171	4.158×10^{-6}	8.636×10^{-6}	3.013×10^{-6}	0.7246
-100	2.038	966	0.01582	8.036×10^{-6}	1.189×10^{-6}	5.837×10^{-6}	0.7263
-50	1.582	999	0.01979	1.252×10^{-5}	1.474×10^{-5}	9.319×10^{-6}	0.7440
-40	1.514	1002	0.02057	1.356×10^{-5}	1.527×10^{-5}	1.008×10^{-5}	0.7436
-30	1.451	1004	0.02134	1.465×10^{-5}	1.579×10^{-5}	1.087×10^{-5}	0.7425
-20	1.394	1005	0.02211	1.578×10^{-5}	1.630×10^{-5}	1.169×10^{-5}	0.7408
-10	1.341	1006	0.02288	1.696×10^{-5}	1.680×10^{-5}	1.252×10^{-5}	0.7387
0	1.292	1006	0.02364	1.818×10^{-5}	1.729×10^{-5}	1.338×10^{-5}	0.7362
5	1.269	1006	0.02401	1.880×10^{-5}	1.754×10^{-5}	1.382×10^{-5}	0.7350
10	1.246	1006	0.02439	1.944×10^{-5}	1.778×10^{-5}	1.426×10^{-5}	0.7336
15	1.225	1007	0.02476	2.009×10^{-5}	1.802×10^{-5}	1.470×10^{-5}	0.7323
20	1.204	1007	0.02514	2.074×10^{-5}	1.825×10^{-5}	1.516×10^{-5}	0.7309
25	1.184	1007	0.02551	2.141×10^{-5}	1.849×10^{-5}	1.562×10^{-5}	0.7296
30	1.164	1007	0.02588	2.208×10^{-5}	1.872×10^{-5}	1.608×10^{-5}	0.7282
35	1.145	1007	0.02625	2.277×10^{-5}	1.895×10^{-5}	1.655×10^{-5}	0.7268
40	1.127	1007	0.02662	2.346×10^{-5}	1.918×10^{-5}	1.702×10^{-5}	0.7255
45	1.109	1007	0.02699	2.416×10^{-5}	1.941×10^{-5}	1.750×10^{-5}	0.7241
50	1.092	1007	0.02735	2.487×10^{-5}	1.963×10^{-5}	1.798×10^{-5}	0.7228
60	1.059	1007	0.02808	2.632×10^{-5}	2.008×10^{-5}	1.896×10^{-5}	0.7202
70	1.028	1007	0.02881	2.780×10^{-5}	2.052×10^{-5}	1.995×10^{-5}	0.7177
80	0.9994	1008	0.02953	2.931×10^{-5}	2.096×10^{-5}	2.097×10^{-5}	0.7154
90	0.9718	1008	0.03024	3.086×10^{-5}	2.139×10^{-5}	2.201×10^{-5}	0.7132
100	0.9458	1009	0.03095	3.243×10^{-5}	2.181×10^{-5}	2.306×10^{-5}	0.7111

Figura 16: Tabla de propiedades del aire a 1 atm de presión.

Fuente: Libro “Mecánica de fluidos, fundamentos y aplicaciones” de Y.Cengel y J.Cimbala.

4. Referencia de distancias utilizadas

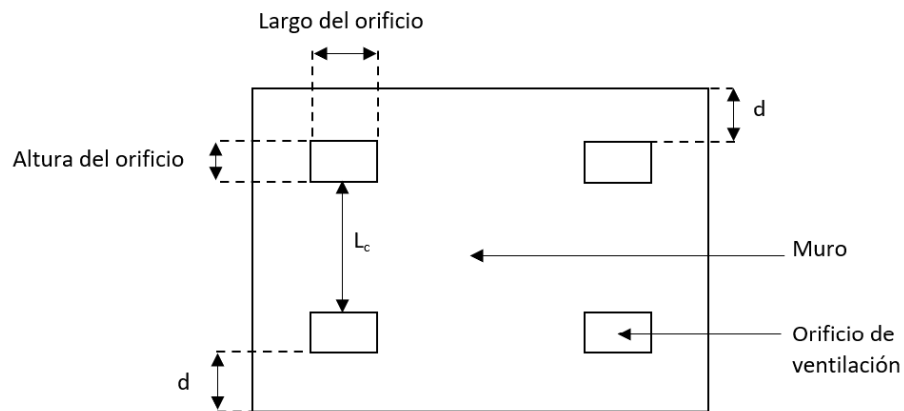


Figura 17: Distancias características.

Fuente: Elaboración propia.

5. Declinación de radiación solar

Día	Declinación solar invierno					
	Hemisferio norte			Hemisferio sur		
	Diciembre	Enero	Febrero	Junio	Julio	Agosto
1	-21,74	-23,07	-17,28	22,02	23,2	18,2
2	-21,9	-22,99	-17	22,15	23,13	17,94
3	-22,05	-22,9	-16,71	22,29	23,06	17,69
4	-22,19	-22,8	-16,41	22,41	22,98	17,42
5	-22,32	-22,7	-16,11	22,53	22,89	17,16
6	-22,45	-22,59	-15,81	22,64	22,8	16,89
7	-22,57	-22,47	-15,5	22,74	22,7	16,61
8	-22,68	-22,34	-15,18	22,84	22,59	16,33
9	-22,79	-22,21	-14,87	22,93	22,48	16,05
10	-22,28	-22,07	-14,54	23,01	22,36	15,76
11	-22,98	-21,92	-14,22	23,09	22,23	15,46
12	-23,06	-21,76	-13,89	23,16	22,1	15,17
13	-23,23	-21,6	-13,55	23,23	21,96	14,87
14	-23,2	-21,43	-13,22	23,28	21,81	14,56
15	-23,26	-21,25	-12,87	23,33	21,66	14,25
16	-23,31	-21,07	-12,53	23,38	21,5	13,94
17	-23,36	-20,88	-12,18	23,41	21,34	13,62
18	-23,39	-20,68	-11,83	23,44	21,17	13,3
19	-23,42	-20,48	-11,47	23,47	20,99	12,98
20	-23,44	-20,27	-11,12	23,48	20,81	12,66
21	-23,46	-20,05	-10,76	23,49	20,63	12,33
22	-23,46	-19,83	-10,39	23,49	20,43	11,99
23	-23,46	-19,6	-10,03	23,49	20,23	11,66
24	-23,45	-19,37	-9,66	23,47	20,03	11,32
25	-23,43	-19,13	-9,29	23,46	19,82	10,98
26	-23,4	-18,88	-8,91	23,43	19,6	10,63
27	-23,37	-18,63	-8,54	23,4	19,38	10,28
28	-23,33	-18,37	-8,16	23,36	19,15	9,93
29	-23,28	-19,11	0	23,31	18,92	9,58
30	-23,22	-17,84	0	23,26	18,68	9,22
31	-23,16	-17,56	0	0	18,44	8,87

Tabla 4: Declinación solar por día del año.
 Fuente: Libro “An introduction to solar radiation” de Muhammad Iqbal