



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA
DE MÉXICO

**DISEÑO DE UN SISTEMA PASIVO PARA EL
ACONDICIONAMIENTO DEL AIRE EN UN SALÓN DE CLASES**

T E S I S

QUE PARA OBTENER EL TÍTULO DE:

INGENIERO MECÁNICO ELECTRICISTA
P R E S E N T A N :

MARCO ALBERTO TORRES OLVERA
FELIPE DE JESÚS RAMÍREZ MANDUJANO

ASESOR: DR. VÍCTOR HUGO HERNÁNDEZ GÓMEZ



Universidad Nacional
Autónoma de México



UNAM – Dirección General de Bibliotecas
Tesis Digitales
Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS ©
PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

Todo el material contenido en esta tesis esta protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.

RESUMEN

CONTENIDO

ÍNDICE DE CUADROS

ÍNDICE DE GRÁFICAS Y FIGURAS

INTRODUCCIÓN

OBJETIVOS

CAPÍTULO I. RADIACIÓN SOLAR

Constante solar
Radiación extraterrestre
Tipos de radiación
Medición de la radiación solar
Modelos para calcular la radiación solar
Modelo lineal
Modelo sin restricción
Modelo de la irradiación solar
Radiación solar en la FES-Cuautitlán

CAPÍTULO II. SISTEMAS PASIVOS DE CLIMATIZACIÓN

Clasificación de los sistemas pasivos de climatización
Clasificación por configuración estructural
Ganancia directa
Muro de almacenamiento térmico
Invernadero acoplado
Techo de almacenamiento térmico e intercambio de calor
Circuito convectivo
Clasificación por género
Directo
Sistemas pasivos de ganancia semi-indirecta de calor
Indirecto
Aislado

CAPÍTULO III. MURO TROMBE

Funcionamiento de un Muro Trombe
Diseño de un Muro Trombe
Factores importantes a considerar en el diseño de el Muro Trombe
Factores externos
Factores internos

CAPÍTULO IV. DISEÑO PROPUESTO

Ubicación geográfica
Condiciones climáticas
Selección del aula
Cálculos de rendimiento en el aula
Pared I
Pared II
Pared III
Pared IV
Techo
Diseño del prototipo

CAPÍTULO V. ANÁLISIS Y DISCUSIÓN DE RESULTADOS

Cálculos de rendimiento
Ventilación
Calefacción

CONCLUSIONES

REFERENCIAS

ANEXOS

ÍNDICE DE CUADROS

- Cuadro 1. Radiación solar anual en la FES-Cuautitlán
- Cuadro 2. Superficie del muro necesaria por unidad de superficie útil
- Cuadro 3. Espesor del muro recomendado para diferentes materiales de construcción
- Cuadro 4. Caracterización de la Pared I en el aula A-104 del edificio A-1 de Ingeniería Agrícola
- Cuadro 5. Caracterización de la pared II en el aula A-104 del edificio A-1 de Ingeniería Agrícola
- Cuadro 6. Caracterización de la pared III en el aula A-104 del edificio A-1 de Ingeniería Agrícola
- Cuadro 7. Caracterización de la pared IV en el aula A-104 del edificio A-1 de Ingeniería Agrícola
- Cuadro 8. Medidas de los muros en la pared seleccionada del aula A-104 del edificio A-1 de Ingeniería Agrícola
- Cuadro 9. Temperatura del aire a la salida del sistema
- Cuadro 10. Radiación solar máxima en el periodo de abril a septiembre
- Cuadro 11. Radiación solar en el periodo de octubre a marzo

ÍNDICE DE GRÁFICAS Y FIGURAS

- Gráfica 1. Radiación solar máxima, mínima y media en la FES-Cuautitlán
- Gráfica 2. Temperatura máxima de aire a la salida del sistema
- Gráfica 3. Radiación solar en el período de abril a septiembre
- Gráfica 4. Radiación solar en el período de octubre a marzo
- Figura 1. Esfera celestial y coordenadas del sol relativas a un observador ubicado sobre la tierra en el punto 0
- Figura 2. Definición del ángulo cenital del sol, la altura solar y el azimut
- Figura 3. Muro Trombe
- Figura 4. Muro Trombe (ventilación)
- Figura 5. Incidencia de los rayos solares
- Figura 6. Trayectoria del sol
- Figura 7. Ubicación del edificio A-1 de Ingeniería Agrícola en la FES-Cuautitlán
- Figura 8. Vista noroeste Edificio A-1 de Ingeniería Agrícola y del aula A-104
- Figura 9. Vista sureste Edificio A-1 de Ingeniería Agrícola y del aula A-104
- Figura 10. Localización de la pared I del aula A-104 en el edificio A-1 de Ingeniería Agrícola
- Figura 11. Localización de la pared II del aula A-104 en el edificio A-1 de Ingeniería Agrícola
- Figura 12. Localización de la pared III del aula A-104 en el edificio A-1 de Ingeniería Agrícola
- Figura 13. Localización de la pared IV del aula A-104 en el edificio A-1 de Ingeniería Agrícola

RESUMEN

Las condiciones climáticas y las características de construcción del aula A-104 en el edificio A-1 de la carrera de Ingeniería Agrícola de la Facultad de Estudios Superiores Cuautitlán, ocasionan que en invierno y verano se tengan temperaturas fuera del confort térmico, esto genera la necesidad de acondicionar el aire dentro del salón con el fin de lograr dicho confort para los usuarios del aula; por ello, en este trabajo se propone el diseño de un sistema pasivo, en éste caso nos referimos al muro Trombe, para el acondicionamiento del aire dentro del aula A-104 del edificio A-1 de Ingeniería Agrícola.

El diseño de éste prototipo requirió la caracterización geográfica y climática de la zona, y de manera específica las condiciones del aula seleccionada; ésta caracterización permitió establecer las dimensiones, los materiales así como la localización del sistema pasivo (muro Trombe) para dicha construcción, con el fin de obtener la mayor eficiencia y el máximo confort térmico para los usuarios.

Los requerimientos de calefacción y ventilación fueron calculados para realizar y programar la apertura y cierre de las ventilas del muro Trombe con el fin de conseguir el mayor confort térmico a lo largo del año de acuerdo con las necesidades de las personas que utilizan la instalación.

Los resultados obtenidos en el capítulo referido al diseño propuesto, indican que las condiciones climáticas y geográficas, así como las características de construcción permiten establecer un muro Trombe en el aula A-104 con el fin de acondicionar el aire dentro del salón. La posibilidad de utilizar muro Trombe como sistema de almacenamiento de energía solar permite disminuir costos de acondicionamiento; al mismo tiempo es una opción más sustentable que otras en las que se utilizan combustibles fósiles, ya que permite eficientar el aprovechamiento de la energía solar y evita la contaminación originada por la combustión.

INTRODUCCIÓN

El sol es la fuente de energía más abundante en la tierra; además de ser renovable y gratuita, se encuentra en cantidad superior a las necesidades de la población mundial; por tanto, conocer la cantidad de energía solar que incide en un lugar tiene una gran importancia en términos ecológicos y económicos. Por ello, la perspectiva a nivel mundial es que la energía del sol tenga un papel cada vez más significativo lo que producirá un cambio de tendencia que es indispensable para lograr la sustentabilidad en el planeta.

En la actualidad, un término utilizado para designar al aprovechamiento de la energía solar, es la arquitectura bioclimática o arquitectura solar pasiva, que se refiere a las formas en que la energía solar se capta, se guarda y se distribuye de manera directa, es decir, sin la intervención de otros elementos. Brevik y Chadwick [1], establecen que éste concepto se plantea con el fin de diseñar y aportar soluciones constructivas que permitan la captación o desecho de energía solar en un edificio; esta captación se hará de acuerdo con la época del año, a fin de regularla con respecto a las necesidades de calefacción, refrigeración o de luz de los usuarios.

Los sistemas pasivos de climatización se caracterizan por su mínima dependencia de energéticos convencionales (como combustibles fósiles y electricidad), contribuyendo de manera contundente al ahorro y uso razonable de recursos no renovables; entre estos sistemas se encuentra el muro Trombe, que es un sistema creado en Francia en 1957 por Félix Trombe y Jacques Michael; este muro es un sistema pasivo que recolecta la energía solar de forma indirecta a través de transferencia de calor, por conducción, convección y/o radiación, se utiliza para el calentamiento en el interior de las edificaciones o como generador de un flujo de ventilación.

Para el diseño de estos sistemas es necesario determinar: la radiación solar incidente y la demanda energética; a su vez, estos dos factores permiten definir el tamaño, los materiales, el volumen de la edificación y las características de aislamiento del sistema de almacenamiento a utilizar.

Uno de los problemas detectados en las aulas de la carrera de Ingeniería Agrícola de la FES Cuautitlán, es la pérdida de calor en invierno y la necesidad de eliminarlo en primavera y verano; ésta condición se debe principalmente a la ubicación de la edificación y los materiales con que se construyó, por tanto hay alteraciones en el confort térmico a lo largo del año y se genera la necesidad de utilizar sistemas de calefacción o enfriamiento para mantener dicho confort. Por ello, en el presente trabajo se propone el diseño de un sistema pasivo para el acondicionamiento del aire en el aula A-104 del edificio A-1 de la carrera de Ingeniería Agrícola con el fin de lograr el confort térmico de acuerdo con las necesidades de los usuarios de dicha construcción.

El trabajo se estructuró en cinco capítulos; en el primero se describe la radiación solar, considerando los tipos y algunos modelos para calcularla; en el segundo se abordan los sistemas pasivos de climatización así como su clasificación y funcionamiento; en el capítulo 3 se trata el Muro Trombe mencionando aspectos de diseño, funcionamiento y los factores a considerar para su utilización; mientras que en el capítulo 4 se propone un diseño de Muro Trombe considerando las características geográficas, climáticas y de construcción del aula A-104 de la carrera de Ingeniería Agrícola de la FES-Cuautitlán; finalmente se presentan los resultados y conclusiones obtenidos durante el desarrollo de la tesis.

CAPÍTULO I

RADIACIÓN SOLAR

La radiación solar consiste en la transmisión de calor por ondas electromagnéticas, como ocurre con la luz y el calor del Sol que llegan a la Tierra, esta radiación puede convertirse en calor; en el límite de la atmósfera, de acuerdo con Rau [2], la intensidad de radiación sobre una superficie perpendicular o normal a los rayos incidentes es en promedio de $1,353 \text{ Kw}\cdot(\text{m}^2)^{-1}$, valor que se denomina constante solar.

El Sol emite radiación en toda la gama del espectro electromagnético, desde los rayos gamma, hasta las ondas de radio. Sin embargo, para los fines del aprovechamiento de la energía, sólo es importante la radiación térmica que incluye la radiación ultravioleta (UV), la radiación visible (VIS) y la infrarroja (IR)

El Sol transforma, cada segundo, unos 4 millones de toneladas de su masa en energía, esta cantidad representa, para la Tierra, un foco energético de 1.779×10^{11} MW de potencia, que la sociedad humana y la biosfera utilizan de forma directa o indirecta. Conocer con cierto detalle la energía solar que incide en un lugar tiene una enorme importancia en términos ecológicos y económicos ya que según Pons [3], el Sol proporciona el 99.97% de la energía usada en la superficie de la Tierra para todos los procesos naturales.

1.1 Constante solar

La constante solar, denominada SC, es la cantidad de energía solar que llega por el tiempo al límite superior de nuestra atmósfera por cm^2 de superficie. La combinación de tres factores: 1) la distancia Tierra-Sol, 2) el diámetro solar y 3) la temperatura del Sol; determinan un flujo de energía que incide sobre la superficie de la Tierra.

De acuerdo con Rau [2], la radiación emitida por el Sol y sus condiciones geométricas respecto de la Tierra, generan que sobre la atmósfera terrestre incida una cantidad de radiación solar casi constante, con lo cual se origina la llamada constante solar.

La órbita que describe la Tierra alrededor del Sol no es circular, por lo tanto, la distancia Tierra-Sol es variable, esto hace necesario considerar un valor promedio para poder hablar de una constante; el valor comúnmente aceptado para la constante solar ha variado en los últimos años según las técnicas de medición que se han empleado, es importante mencionar que a pesar de dichas variaciones, la magnitud de la energía que se recibe del Sol no ha sufrido cambios. Leng [4], propone que el valor de la constante solar es de $1,353 \text{ Kw}\cdot(\text{m}^2)^{-1}$, en otras unidades equivale a $1.94 \text{ Kal}\cdot(\text{cm}^2)^{-1}$.

1.2 Radiación extraterrestre

La radiación extraterrestre que incide sobre la Tierra está sujeta a las variaciones geométricas y a las condiciones físicas del propio Sol y a la forma casi elíptica de su órbita; la pequeña excentricidad de la órbita hace que, alrededor del 4 de enero, cuando la Tierra se encuentra en el perihelio (mínima distancia al Sol) la radiación solar extraterrestre sea máxima, mientras que, alrededor del 1 de julio, seis meses después, la Tierra se encuentra en el afelio (máxima distancia al Sol) y entonces la radiación solar extraterrestre es mínima.

La radiación solar extraterrestre es transmitida con atenuaciones a la superficie de la tierra, esta condición se debe a los fenómenos de absorción así como a la dispersión de otros componentes en la atmósfera, moléculas de aire, aire, polvo, o vapor de agua.

El flujo de energía sobre un plano normal a la radiación solar extraterrestre, a lo largo del año es descrito por Duffie y Beckman [5] en la ecuación I :

$$G_{on} = G_{sc} (1 + 0.033 \cos (360 n \cdot 365^{-1})) \quad I$$

Donde: G_{on} es el flujo de radiación extraterrestre, medida en un plano normal a la radiación, "n" es el número de día del año; el subíndice "o" se usa para indicar que se mide la radiación extraterrestre, esto es, fuera de la atmósfera.

1.3 Tipos de radiación

La radiación solar sufre ciertas transformaciones al incidir sobre la atmósfera, de modo que es necesario manejar algunos conceptos específicos para los diversos tipos de radiación.

- 1 La radiación directa, se recibe del Sol sin sufrir alguna dispersión atmosférica; generalmente se usa el subíndice "b" para indicar radiación directa.
- 2 La radiación difusa se recibe del Sol después de ser desviada por dispersión atmosférica; suele utilizarse el subíndice "d" para la radiación difusa.
- 3 La radiación terrestre proviene de objetos terrestres, por ejemplo, la que refleja una pared blanca, un charco o un lago, entre otros.
- 4 La radiación total es la suma de las radiaciones directa, difusa y terrestre que se reciben sobre una superficie
- 5 La radiación global es la suma de la directa y la difusa.

De acuerdo con Bohórquez [6], cuando un plano recibe la radiación durante un tiempo determinado, puede hablarse entonces de que incidió una cierta cantidad de energía. La cantidad de energía por unidad de área que incide

durante un periodo de tiempo dado, recibe el nombre de irradiación (Jm^{-2}), y no es otra cosa que la integral de la irradiancia durante el periodo en cuestión. Generalmente se usa el símbolo "I" para la insolación por hora, mientras que "H" se usa para la insolación en el periodo de un día. La irradiación se está calculando desde el tiempo t_1 hasta el tiempo t_2 y la irradiancia se considera función del tiempo.

1.4 Medición de la radiación solar

Para muchas aplicaciones prácticas, no basta con calcular la radiación teórica que incide sobre un lugar o sobre un equipo solar determinado. Es necesario hacer las mediciones, para tener los valores efectivos de energía disponible o incidente sobre un colector. La radiación solar, se puede medir ya sea en forma de irradiancia o de irradiación. El método más aceptado comúnmente, es el uso de un piranómetro que es un instrumento para medir la irradiancia global (directa más difusa), usualmente sobre una superficie horizontal. El tipo más común de piranómetros, consiste en dos sensores de temperatura, uno de ellos expuesto a la radiación solar y ennegrecida y el otro, protegido de la radiación. Uno de los sensores es calentado por una corriente eléctrica hasta que alcanza la temperatura de la placa expuesta a la radiación solar, de éste modo se obtiene un equilibrio es decir, una igualdad de energías. Si los dos sensores se encuentran en condiciones similares en todo, menos en el hecho de estar expuestos a la radiación, habrá una diferencia de temperatura entre ellos.

Es posible utilizar piranómetros para medir radiación directa y difusa por separado, de la siguiente forma: se requieren dos piranómetros; uno de ellos se instala horizontalmente y mide radiación global, y al otro se le coloca una "sombra" que consiste en una banda o un disco para obstruir la radiación directa, así, este piranómetro medirá sólo radiación difusa. La diferencia de la radiación global menos la difusa, da como resultado la radiación directa.

Rodríguez [7], da a conocer otro instrumento para medir radiación solar, el pirheliómetro, el cual, se enfoca directamente al Sol para medir exclusivamente

la radiación que proviene de él y de sus alrededores cercanos, entonces éste mide la radiación directa.

1.5 Modelos para calcular la radiación solar

1.5.1 Modelo lineal

Duffie y Beckman [5] mencionan que se puede calcular la radiación directa (irradiancia e irradiación) sobre la superficie vertical con ángulos de incidencia en el plano, puede calcularse con el ángulo azimut (plano vertical) de superficie que es $\tan^{-1}(P/G+H)$, donde G es la altura del techo y P la proyección del borde exterior de la zona vertical del muro, para este plano es $\tan^{-1}(P/G)$.

Las relaciones trigonométricas de la irradiancia solar entre la posición del sol en el cielo y las coordenadas ecuatoriales sobre la tierra se presentan en la figura 1:

Donde:

ϕ : Latitud; es la localización del ángulo de norte o sur del ecuador; norte positivo $-90^\circ \leq \phi \leq 90^\circ$.

δ : Declinación; es la posición del ángulo del sol en la tarde (cuando el sol está en el meridiano local), con respecto al plano del ecuador; norte positivo $-23.45^\circ \leq \delta \leq 23.45^\circ$.

ω : Ángulo horario; es el desplazamiento angular del sol al este u oeste del meridiano local junto con la rotación de la tierra en su eje a 15° por hora, siendo positivo en la tarde y negativo en la mañana.

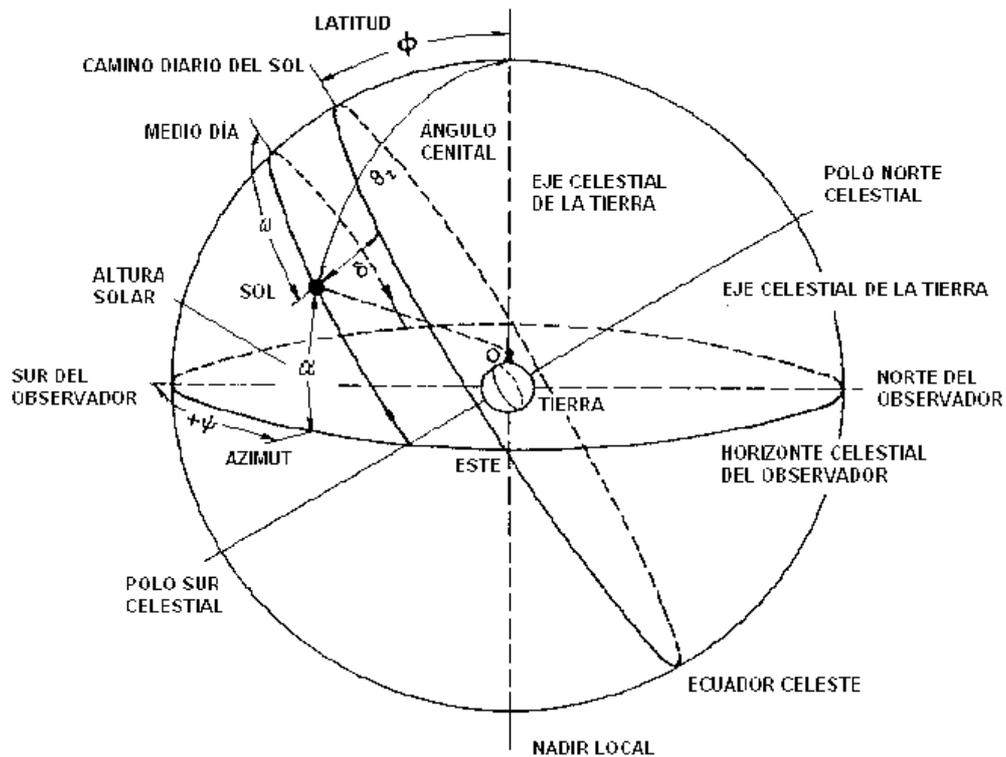


Figura 1. Esfera celestia y coordenadas del sol relativas a un observador ubicado sobre la tierra en el punto 0

El cenit (θ_z) es el ángulo entre el cenit local y la línea que une al observador y el sol, éste es un ángulo que varia entre 0° y 90° . La altura solar α (también llamada elevación solar) es la altura angular del sol sobre el horizonte celestia del observador; mientras que la altura solar es el complemento del ángulo cenital.

El azimut solar (ψ), es el ángulo en el cenit local entre el plano del meridiano del observador y el plano de un gran círculo que pasa por el cenit y el sol, es medido hacia el Este positivamente, Oeste negativamente, (sur = cero) y de este modo varia entre 0° y $\pm 180^\circ$.

El ángulo horario (ω), es el ángulo medido en el polo celestia entre el meridiano del observador y el meridiano del sol; contando desde el medio día cambia 15° por hora.

En la figura 2. se observa la representación del ángulo cenital del sol, la altura solar y el azimut.

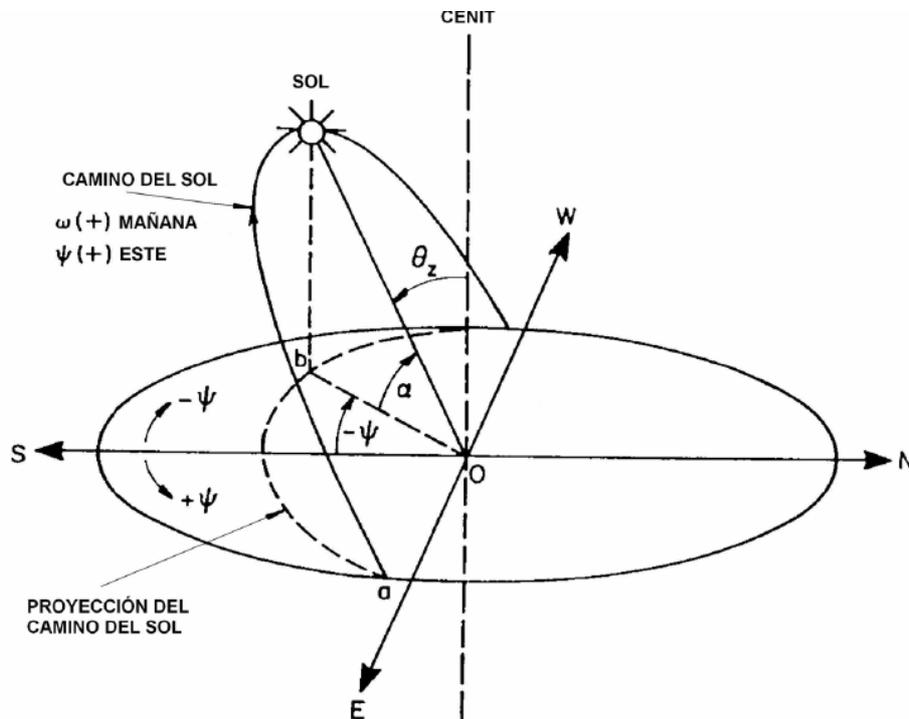


Figura 2. Definición del ángulo cenital del sol, la altura solar y el azimut.

El ángulo cenital (θ_z), tendrá una influencia despreciable sobre la altura solar aparente, la cual es un poco menor que la altura calculada, la diferencia varía desde 0° en el cenit, hasta $34'$ en la horizontal, y depende ligeramente de la temperatura y presión atmosférica, y en los almanaques esta tabulada para θ_z entre 80° y 90° , donde el efecto es máximo.

1.5.2 Modelo sin restricción

La atmósfera ejerce un efecto de redistribución de la radiación que recibe del Sol, en un día muy despejado una parte relativamente pequeña se convierte en radiación difusa, mientras que la mayor parte permanece como directa. La radiación difusa, en un día despejado, es la que proviene del cielo, en cambio, en un día nublado, la redistribución de la radiación es mucho más notable. Las

nubes densas tienen un albedo (fracción de energía reflejada) muy alto, lo cual hace que, en un día densamente nublado, una gran parte de la radiación solar se refleje al espacio exterior; además, la energía que logra pasar a través de las nubes, es únicamente radiación difusa. Es muy difícil desarrollar modelos para predecir con precisión la presencia de nubes (posición y densidad).

Existen modelos que llamamos sin restricción, para predicción de "días promedio" en cierta fecha, pero no para fechas específicas. Por otro lado, desde el punto de vista del aprovechamiento de la energía solar, no es interesante la predicción para fechas específicas. En cambio, existe una diversidad de modelos para estimar la radiación solar para días despejados. Básicamente, estos modelos aplican un factor de transmitancia a la radiación extraterrestre.

1.5.3 Modelo de la irradiación solar

El cálculo de la radiación directa sobre una superficie requiere considerar que el flujo de energía sobre una superficie determinada depende no sólo de la irradiancia que exista, sino también de la orientación que tenga la superficie en cuestión respecto de la dirección de propagación de la radiación, entonces tenemos que la irradiancia será máxima sobre un plano que esté en posición normal a la dirección de propagación de la radiación, en cambio, será mínima si el plano es paralelo a la radiación.

La intensidad de radiación sobre la superficie dependerá del ángulo que forme la normal de la superficie, respecto de la dirección de propagación de la radiación. Este ángulo se conoce con el nombre de incidencia

Si se conoce la irradiancia normal (por ejemplo, la constante solar G_{sc} es una irradiancia normal y se conoce el ángulo), mediante la ecuación anterior se puede calcular la irradiancia sobre un plano con cualquier inclinación. El Sol describe un movimiento aparente a lo largo del día que va de oriente a

poniente; y otro a lo largo del año que va de sur a norte y viceversa, entonces, el valor del ángulo varía con la fecha, la hora, la orientación del plano y su inclinación respecto de la horizontal así como por la latitud geográfica del lugar donde se encuentre el plano en cuestión.

En los estudios realizados por Quadri [8], de la irradiación solar se manipulan magnitudes de energía y potencia. Cuando se trabaja con energía se utiliza como unidad el joule propio del sistema internacional pero en la práctica se utilizan otras unidades energéticas como:

$$1 \text{ Kilovatio-hora (1KWH)} = 3.6 \times 10^6 \text{ J}$$

$$1 \text{ Kilocaloría (1Kcal)} = 103 \text{ cal} = 4186 \text{ J}$$

En cuanto a la potencia se utiliza el vatio (W), propia del sistema SI, y algún múltiplo o submúltiplo de ella.

1.6 Radiación Solar en la FES-Cuautitlán

La radiación incidente en la FES-Cuautitlán se presenta en el cuadro 1 el cual contiene los datos reportados por la Estación Meteorológica Almaraz ubicada en ésta Facultad; en la gráfica 1 se representan los valores máximos, mínimos y medios de dicha radiación.

Cuadro 1. Radiación solar anual en la FES-Cuautitlán

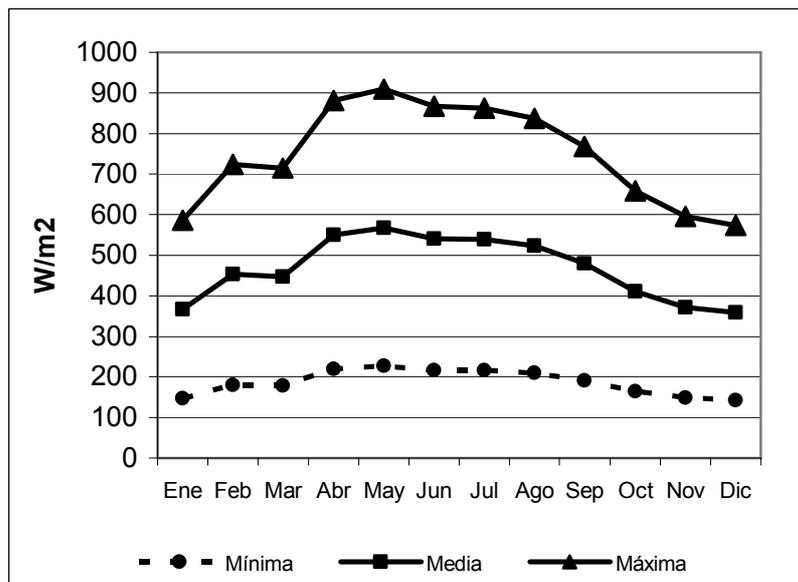
| RADIACIÓN SOLAR FES-CUAUTITLAN | | | |
|---------------------------------------|---------------|--------------|---------------|
| (W/m²) | | | |
| MES | Mínima | Media | Máxima |
| Enero | 146.57 | 366.44 | 586.30 |
| Febrero | 180.88 | 452.21 | 723.53 |
| Marzo | 178.48 | 446.22 | 713.95 |
| Abril | 220.12 | 550.30 | 880.48 |
| Mayo | 227.18 | 567.95 | 908.72 |
| Junio | 216.53 | 541.33 | 866.12 |
| Julio | 215.70 | 539.27 | 862.83 |
| Agosto | 209.41 | 523.53 | 837.64 |
| Septiembre | 191.85 | 479.64 | 767.42 |

| | | | |
|-----------|--------|--------|--------|
| Octubre | 164.44 | 411.11 | 657.77 |
| Noviembre | 148.76 | 371.90 | 595.04 |
| Diciembre | 143.27 | 358.18 | 573.08 |

Fuente: Elaboración Personal con datos de la Estación Meteorológica Almaraz.

La radiación máxima se presenta en el mes de mayo con 908.72 W/m², mientras que la mínima ocurre en diciembre con 143.27 W/m².

Gráfica 1. Radiación solar máxima, mínima y media en la FES-Cuautitlán



CAPÍTULO II

SISTEMAS PASIVOS DE CLIMATIZACIÓN

La climatización mediante energías renovables ha sido relacionada con la arquitectura mediante diversos adjetivos, entre ellos: bioclimática, arquitectura solar, heliarquitectura, arquitectura solarizada, natural, autosuficiente, ecológica. Los sistemas de climatización, por sus características; Morillón [9], ha denominado, entre otros: sistemas pasivos, cuasipasivos, activos, híbridos, naturales y de autoclimatización.

Los sistemas pasivos son aquellos, tanto para calentamiento como enfriamiento, que se aplican a los edificios en el propio proyecto arquitectónico; por tanto son las acciones que en este campo se denominan “arquitectura bioclimática”, y según Bohórquez [6], consisten en el diseño de medidas para obtener aportaciones solares en invierno y reducción de éstas en verano.

Entonces, la captación pasiva es una técnica simple y de bajo costo, generalmente consiste en proyectar la construcción con una orientación adecuada o ubicar convenientemente las superficies vidriadas, por tanto, es la forma más económica de calentar o, como mínimo, templar una vivienda.

Esta captación se basa en el principio de "caja caliente", el cual consiste en un recinto orientado al sur con amplios cristales y paredes bien aisladas, en ocasiones tiene también un elemento reflector-concentrador, un elemento captador (el cual tendrá una mayor captación de calor cuanto más oscura y mate sea su superficie), y dependiendo de la aplicación que deseemos puede tener un acumulador; Caballero [10], menciona que las ventilas deberán estar diseñadas para que en verano den sombra y en otoño, primavera e invierno dejen pasar los rayos luminosos. El concepto se basa en el empleo de un adecuado diseño de la edificación, así como una apropiada utilización de materiales y sistemas constructivos; para ello debe realizarse un estudio de diversos factores climáticos como son:

- a) Latitud y altitud de la zona.
- b) Duración e intensidad de la radiación solar.
- c) Temperatura del aire exterior y su variabilidad.
- d) Humedad relativa.
- e) Precipitación pluvial.
- f) Intensidad, frecuencia y dirección del viento.
- g) Grado de nubosidad y frecuencia.

Las pautas de diseño, de acuerdo con Bohórquez [6]; para captar o evitar los factores climáticos según nuestra conveniencia puede hacerse aprovechando:

- 1. La orientación de la edificación y de las superficies expuestas.
- 2. La relación entre superficie exterior y volumen interior.
- 3. El color de los recubrimientos de superficie.
- 4. El tamaño, ubicación, orientación y tipo de las ventanas.
- 5. Los acristalamientos adosados tipo invernadero.
- 6. El tipo, colocación y uso de persianas y cortinas.
- 7. Los sistemas de penetración de luz y control lumínico.
- 8. El uso de sistemas de sombreado fijos o móviles.
- 9. La distribución interior.
- 10. Los huecos o patios interiores.
- 11. La colocación y el tipo de vegetación en el exterior y en los patios.
- 12. El uso del agua en fuentes y estanques.
- 13. El espesor de los aislamientos y materiales de construcción de paredes exteriores y su posición relativa.
- 14. El establecimiento de rejillas y huecos para el control de ventilación.
- 15. El diseño de la trama y elementos urbanos.
- 16. Los diseños específicos para captación de calor, refrigeración, ventilación iluminación

2.1 Clasificación de los sistemas pasivos de climatización

Los sistemas pasivos de climatización se clasifican con base en tres aspectos:

1. Configuración estructural
2. Género
3. Requerimientos de climatización

Por su configuración estructural, los sistemas pasivos se clasifican en:

- Ganancia directa
 - Muro de almacenamiento térmico
 - Invernadero acoplado
 - Techo de almacenamiento térmico e intercambiador de calor
 - Circuito convectivo
-
- Según su género, los sistemas pasivos de climatización se clasifican en:
 - Directo
 - Indirecto
 - Aislado
-
- Conforme a los requerimientos de climatización, los sistemas pasivos de climatización se clasifican en:
 - Calefacción
 - Enfriamiento
 - Humidificación
 - Deshumidificación
 - Ganancia Directa y protección solar

2.1.1 Clasificación por configuración estructural

De acuerdo con su configuración estructural, los sistemas pasivos se clasifican en los siguientes tipos:

2.1.1.1 Ganancia directa

La radiación solar penetra en el espacio por calentar a través de una cubierta transparente, donde es absorbida por las superficies de captación y convertida en calor. Éste se dispersa en todo el volumen de aire contenido en un espacio, así como en los muros que confinan.

2.1.1.2 Muro de almacenamiento térmico

La radiación solar penetra por una cubierta transparente o traslúcida, e incide sobre la superficie de un muro interpuesto entre la cubierta y el espacio por calentar. El muro generalmente es de concreto (muro Trombe), ladrillo, agua o algún material con cambio de fase contenido en depósitos metálicos o plásticos.

2.1.1.3 Invernadero acoplado

Combinación de ganancia directa con muro de almacenamiento térmico; éste último divide a la casa del invernadero. De ésta forma los espacios recalientan en forma indirecta.

2.1.1.4 Techo de almacenamiento térmico e intercambio de calor

Techo en el que se capta, almacena y transfiere radiación solar hacia el interior o donde se acumula, transfiere y disipa calor del interior hacia la atmósfera y el espacio (enfriamiento radiactivo nocturno).

Este techo generalmente consta de una lámina metálica que soporta contenedores con agua, ya sean metálicos o plásticos. Este sistema requiere de una cubierta móvil para tapar o destapar los contenedores diariamente.

2.1.1.5 Circuito convectivo

El colector solar y la unidad de almacenamiento térmico se encuentran separados y concentrados por ductos donde, por convección natural se hace circular el fluido de trabajo (gas o líquido) que transporta el calor.

2.1.2 Clasificación por género

De acuerdo con su género, los Sistemas Pasivos de Climatización Artificial (SPCA) se clasifican como se describe a continuación:

2.1.2.1 Directo

Morillón [9], describe que los sistemas pasivos de ganancia térmica de calor, son concebidos como los medios para captar la energía solar y reducir las pérdidas térmicas en el interior de la vivienda; también se incluyen medidas tomadas en la habitación interior en función de mejorar las condiciones del exterior para permitir o evitar el paso de la energía solar del aire y del calor.

2.1.2.2 Sistemas pasivos de ganancia semi-indirecta de calor

Bohórquez [6] menciona que estos son sistemas donde se trabaja en combinación medios de ganancia directa e indirecta de calor; la implementación de este sistema se relaciona directamente con la orientación de las viviendas, la posibilidad de realizar ampliaciones sobre el terreno o bien la modificación de los espacios existentes; una de las formas de implementación es anexando a las fachadas con mayor ganancia calórica un volumen compuesto por elementos de cristal y carpintería metálica o de madera para que funcione como tal; otra es reconvertir zonas utilizadas como balcones terrazas en muro Trombe o invernadero dentro del cual se pueden ubicar elementos acumuladores térmicos.

2.1.2.3 Indirecto

La radiación solar es absorbida por la superficie de un material interpuesto entre la cubierta transparente (o traslúcida) y el espacio por calentar. Este espacio está parcialmente confinado por el material que almacena la energía y sirve de acoplamiento térmico natural. Morillón [9] menciona que en este tipo de sistemas se encuentran: el muro y techo de almacenamiento térmico y el invernadero acoplado a la pieza por calentar.

Pons [3] menciona que para reducir las pérdidas de calor podemos incidir sobre el fenómeno de conducción ocurrido en toda la envolvente, pero para ello habrá que actuar directamente sobre las paredes incorporando muro Trombe o invernadero, la ventaja del muro Trombe es que el calor contenido en la cámara de aire puede pasarse por convección al interior de la vivienda sin perderse una buena proporción de energía solar.

2.1.2.4 Aislado

Morillón [9] establece que estos sistemas son similares al de tipo indirecto, pero que existe una separación entre la unidad de almacenamiento térmico y el espacio por climatizar. Esta separación puede ser con aislamiento térmico. Entre estos sistemas se encuentran, el circuito convectivo, así como el invernadero acoplado y el muro o techo de almacenamiento térmico (actuando como unidades aisladas).

Los sistemas pasivos se encuentran integrados en el edificio, forman parte de la arquitectura, pueden ser un muro de ladrillo, una pared de vidrio, una cubierta; que además de cumplir sus funciones estructurales, constructivas, estéticas; captan la radiación solar y la transmiten al interior del edificio.

En los sistemas pasivos es importante considerar cuál es la fachada que permite captar la mayor cantidad de radiación, pero en los períodos sobrecalentados (verano) es muy difícil controlar dicha captación debido al ángulo de incidencia de la radiación que es casi horizontal, por tanto, estas aportaciones directas a través de los vidrios se fundamentan en una aplicación del denominado efecto invernadero.

CAPÍTULO III

MURO TROMBE

El muro Trombe es llamado así porque fue diseñado por el ingeniero Félix Trombe en Odelló, una localidad junto a los Pirineos; es el método más conocido de captación indirecta, la energía solar pasa a través del vidrio y calienta el muro que puede ser de mampostería, hormigón o incluso agua; el muro está pintado de negro (para absorber mejor la radiación solar), tiene delante del muro un vidrio formando una cámara de aire. Este mecanismo es efectivo si se aprovecha al máximo la radiación solar, lo cual se logra armándolo sobre muros orientados hacia el sur, en el hemisferio Norte, y hacia el norte en el hemisferio sur.

El muro absorbe el calor y se calienta emitiendo a su vez calor por radiación, pero por efecto invernadero este calor queda atrapado debido a que el vidrio no lo deja escapar, por tanto, es una opción para calentar en los días soleados toda la construcción. El muro Trombe, mostrado en la figura 3, está compuesto por un acristalamiento paralelo a la fachada, con rejillas en su parte inferior y superior, para que el aire del interior de la construcción entre por su parte inferior y, al ser calentado por la incidencia del sol, vuelve a entrar a la construcción por su parte superior.

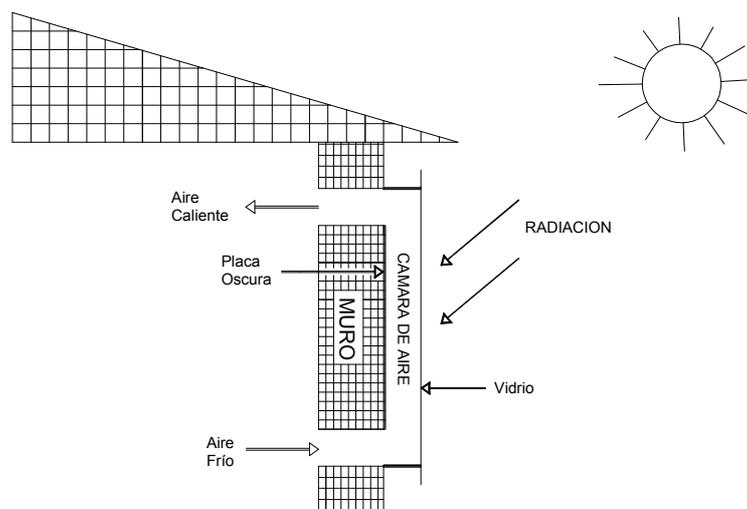


Figura 3. Muro Trombe

3.1 Funcionamiento de un Muro Trombe

El muro de Trombe trabaja absorbiendo radiación solar en la cara exterior y entonces, los rayos de luz que chocan contra la superficie oscura generan calor que el vidrio impide escapar; dado que el aire caliente es menos denso que el aire frío, sube transportando el calor e ingresa a la construcción por una ventila superior; al mismo tiempo, el aire frío de la casa sale por una ventila que se conecta con la parte baja de la pared Trombe. Es posible añadir orificios de ventilación en la pared para distribuir el calor dentro de una habitación, por convección (termo circulación), exclusivamente durante las horas de luz, es decir en el día.

Algunos muros están formados por una pared gruesa de 20 a 40 centímetros como elemento almacenador, en la parte frontal tiene un vidrio (cristal) simple o doble, que se coloca de entre 5 a 10 centímetros de la pared, si ésta distancia fuera mayor se podrían presentar fugas de aire; así se puede generar un espacio pequeño o cámara de aire en la cual no se produzcan efectos conductivos. Adicionalmente es posible colocar una película oscura sobre la pared en la parte exterior para absorber una mayor cantidad de luz. La absorción transforma la luz en calor en la superficie de la pared y disminuye la reflexión.

Por lo general las paredes son de hormigón, aunque pueden ser de ladrillo, piedra, adobe, u otros elementos de baja difusividad térmica para que exista un gran almacenamiento de energía durante el día y en la noche mediante un proceso lento ésta sea transmitida al interior de la construcción. Es conveniente que el vidrio adicionalmente también tenga un componente aislante para evitar pérdidas de calor durante la noche.

El Muro Trombe permite ventilar la construcción en primavera y verano; esto se logra cerrando la ventilación superior para que el aire caliente salga y permitiendo el paso del aire exterior por la parte baja hacia la cámara de aire, de esta forma se favorece la circulación del aire dentro de la edificación (figura 4).

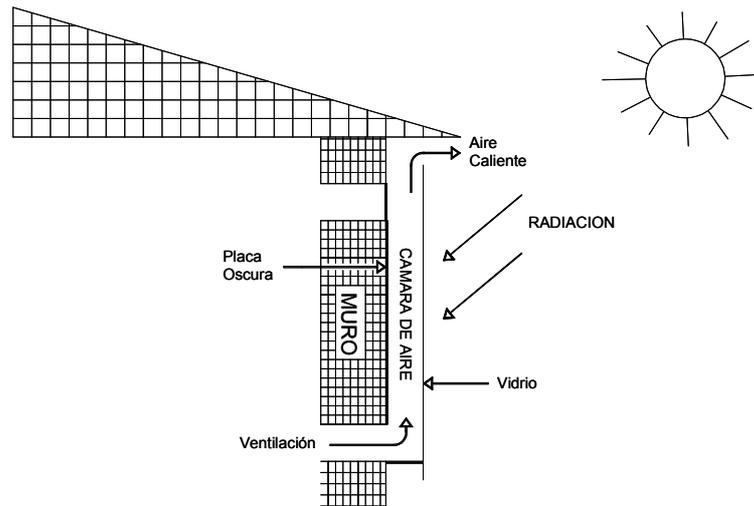


Figura 4. Muro Trombe (ventilación)

Rodríguez [7] menciona que además de calentar la construcción, es posible enfriarla mediante un cambio de dirección de las ventanillas que regulan la circulación del aire en la parte superior e inferior del muro y con ayuda de una ventana del lado Norte la cual nos va a facilitar la circulación de aire.

3.2 Diseño de un Muro Trombe

El muro se construye de ladrillo, Bohórquez [6] menciona que, con un muro de éste material, que en invierno recibe una adecuada acción solar en el día, se obtiene una corriente de aire caliente que se mantiene prácticamente hasta la medianoche.

Es importante considerar que el local debe tener un adecuado aislamiento de modo que pueda mantener el calor sin demasiadas pérdidas. Si el local se encuentra aislado, puede adoptarse como norma práctica de diseño una superficie de muro colector en m^2 igual a la décima parte del volumen del local a calentar en m^3 . Por otra parte, a veces la sensación de calor se debe al exceso de humedad en el ambiente, por ello la ventilación con aire de renovación exterior contribuye a la disminución de la humedad relativa que

causa la sensación de incomodidad. La renovación del aire produce una sensación de enfriamiento al aumentar la evaporación del cuerpo humano, es entonces importante que las aperturas se hagan de modo que favorezcan la ventilación cruzada, siendo la apertura inferior en las paredes sur y las superiores en las paredes norte; cuando hay un claro viento predominante las aperturas deben instalarse a barlovento y sotavento.

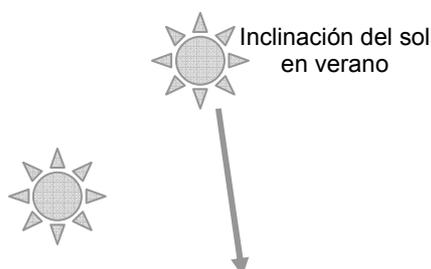
3.3 Factores importantes a considerar en el diseño de un Muro Trombe

Para dimensionar el muro se deben considerar el clima, la latitud y las necesidades de calefacción y enfriamiento (pérdidas de calor), que se pueden definir como los factores externos; además, los elementos que en este intervienen: el muro (espesor y material), la superficie de vidrio, el número y dimensiones de los orificios, ya que de esto dependerá la eficiencia del muro (factores internos).

3.3.1 Factores externos

a) El clima: La cantidad de calor perdido por el muro depende necesariamente de la diferencia entre la temperatura externa e interna del cuarto, entre más grande sea la diferencia mayores serán las pérdidas, por eso, para climas muy fríos se deberá sobredimensionar el muro.

b) Latitud y orientación: la energía solar incidente sobre la fachada sur en invierno para latitudes por encima del ecuador y sobre la fachada norte para las latitudes por debajo del ecuador, cambia según la latitud, por eso, como regla general es preciso incrementar el tamaño del muro a medida que se aumenta de latitud, ya que se recibe menos calor (figura 5).



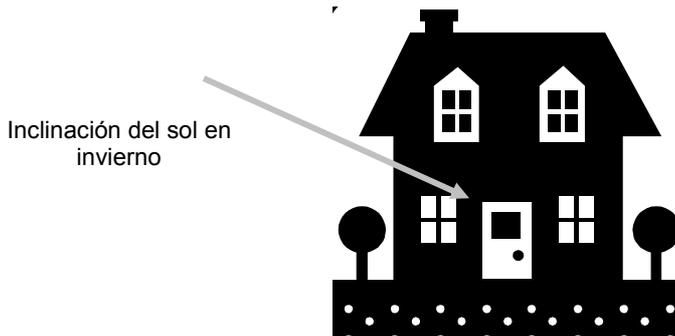


Figura 5. Incidencia de los rayos solares

En la figura 6 se muestra la trayectoria del sol durante las diferentes épocas del año; es importante considerar éste movimiento para orientar el muro de manera que capte la mayor cantidad de radiación solar.

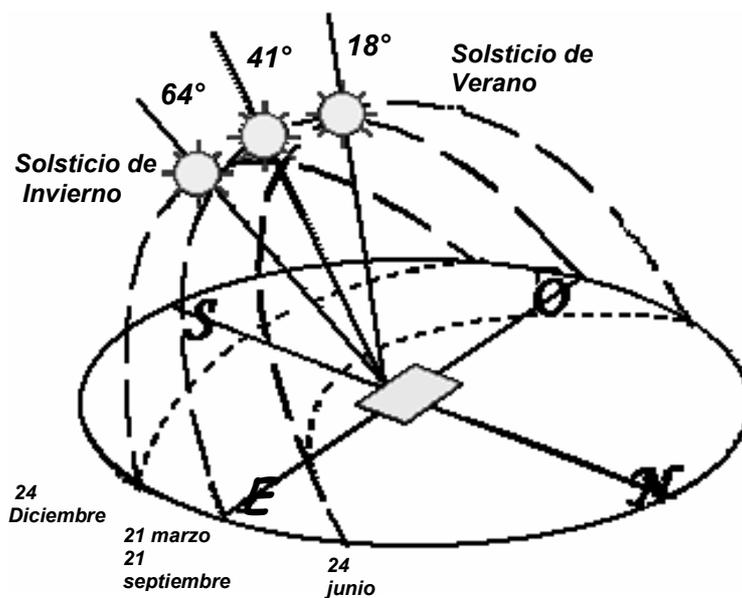


Figura 6. Trayectoria del sol

De acuerdo con Bohórquez [6], la orientación del muro en el hemisferio norte, debe ser, a 5° del punto sur, aunque entre 15° y 30° puede tener un buen funcionamiento, a 15° en verano reduce los problemas de sobrecalentamiento; mientras que en el hemisferio sur, debe ser al contrario; el muro debe ubicarse hacia el norte.

El criterio básico para dimensionar un muro Trombe es que éste transmita a lo largo del día suficiente energía térmica (calor), lo cual supone que la energía

trasmitida por el muro debe ser suficiente para mantener una temperatura media en el interior de 18° C a 24° C durante 24 horas. A partir de este criterio se puede establecer proporciones necesarias por unidad de superficie de la habitación.

El Cuadro 2 proporciona diferentes valores de área para diferentes climas, según Bohórquez [6].

Cuadro 2. Superficie del muro necesaria por unidad de superficie útil

| | Temperatura media exterior de invierno (°C) | Superficie del muro por unidad de superficie de la habitación (superficie útil) (m²) |
|-----------------------|--|--|
| Clima Frío | -10°C | 0.72 > 1.0 |
| | - 7°C | 0.60 - 1.0 |
| | - 4°C | 0.51 - 0.93 |
| | - 1°C | 0.43 - 0.78 |
| Clima Templado | 2°C | 0.35 - 0.60 |
| | 5°C | 0.28 - 0.46 |
| | 7°C | 0.22 - 0.35 |

Fuente: Bohórquez (2001).

En la FES Cuautitlán se utilizaron las temperaturas de clima templado ya que no se presentan temperaturas promedio bajo cero grados.

3.3.2 Factores internos

El muro debe tener gran capacidad de absorción y captación de calor. Estos factores dependen básicamente la conductividad térmica (baja) y de la resistencia del muro (k) (mayor), por ello es muy importante tener en cuenta el grosor del muro, es decir, debe existir un grosor óptimo para evitar un sobrecalentamiento de la pared, en el Cuadro 3 se presentan los valores recomendados para diferentes materiales, según Bohórquez [6].

Cuadro 3. Espesor del muro recomendado para diferentes materiales de construcción

| Material | Espesor recomendado (cm) |
|-----------------|---------------------------------|
| Adobe | 20-30 |
| Ladrillo | 25-35 |
| Hormigón | 30-45 |

Fuente: Bohórquez (2001).

El espesor óptimo para un muro se incrementa cuando la conductividad también aumenta, entonces, un muro con un valor muy alto transfiere rápidamente el calor de la superficie exterior al interior del cuarto, por esto se debe sobredimensionar para que el transporte de calor sea utilizado en el momento, al contrario, si un muro tiene una conductividad baja, se debe reducir su espesor. El rendimiento del muro crece con la conductividad del mismo, cuanto mayor es la conductividad, mayor calor se transfiere a través del muro.

El área de vidrio debe ser mínima del 7% de área de la habitación y no debe exceder el 12% de esta, normalmente, se utilizan persianas o voladizos que en verano tapen lo suficiente el muro para ayudar a que no exista un sobrecalentamiento. Por lo general se utiliza un vidrio ordinario de forma vertical, aunque a veces es necesario inclinarlo para obtener el punto donde se pueda captar la mayor radiación

Las rejillas o ventilas deben tener un área suficiente para garantizar un flujo uniforme y constante, sin producir movimientos fuertes del aire circulante. Se sugiere que debe tomarse como superficie total de las ventilas de una hilera, aproximadamente 1 dm^2 por metro cuadrado de muro.

Es importante considerar la colocación de las ventanas en la edificación, la hermeticidad de la estructura y el color de la superficie; ya que estos elementos afectan el calentamiento o enfriamiento de la habitación.

La cantidad de aire que se pierde durante el día se puede calcular con la fórmula II :

$$P = \Delta T (S) [h_{\text{día}} / R_1 + h_{\text{noche}} / R_2] (3.6 \times 10^6) \quad \text{II}$$

Dónde:

ΔT = diferencia de temperaturas

S = Área del muro

R_1 = del vidrio

R_2 = del muro

El aporte solar (calefacción) para un muro de Trombe se debe calcular teniendo en cuenta la superficie del vidrio, el aporte solar día y el porcentaje de energía que transfiere el muro de la energía incidente, entonces se tiene:

$$A_s = S \times I \times P, \quad \text{III}$$

Dónde:

S = Superficie captora de vidrio (m^2)

I = Intensidad o aporte solar recibido ($\text{W h (m}^2\text{)}^{-1} \cdot \text{día}$)

P = porcentaje de energía transmitido por el muro

Para convertir este aporte en unidades por metro cuadrado, se divide por la superficie útil local coeficiente de aportes térmicos

$$C [\text{W h} \cdot \text{día} \cdot \text{m}^2]; \quad C = A_s (S_{\text{útil}})^{-1} \quad \text{IV}$$

Para la determinación de la temperatura media interior una vez conociendo los coeficientes anteriores, coeficiente de aportes térmicos (C), el coeficiente global por pérdidas locales (M) y la temperatura media exterior (T_o), es fácil determinar la temperatura media local (T_i) de la siguiente forma:

$$T_i = C \cdot M \times T_o \quad \text{V}$$

Teniendo en cuenta todos estos detalles, por lo general la temperatura media interna deseada es de 21° C, ya que es adecuada para tener confort térmico; sin embargo, es difícil lograr un diseño óptimo de la edificación para este fin, si la temperatura media interna es baja, existen soluciones para mejorar esta situación:

- 1) Reducir las pérdidas locales de calor (M), básicamente cambiando el muro por otro de un material diferente, con mayor resistencia.
- 2) Aumentando la captación solar, es decir, aumentando el área del vidrio.

Con la Radiación máxima obtenida en cada mes, se calculó el flujo de Calor que incide en la Placa de Aluminio pintada de color negro; empleando las formulas propuestas por Mills [33], que se describen a continuación:

$$Q_p = \infty A G \quad \text{VI}$$

Dónde:

Qp= Calor de la placa en (w)

∞ = Absortancia de la pintura negra.

G =Radiación solar.

Una vez obtenido el flujo de calor en la placa se calculó la temperatura alcanzada por ésta en °C, empleando la fórmula VII que se describe a continuación:

$$T_p = (Q_p / A \sigma) ^ { 1/4} \quad \text{VII}$$

Dónde:

Tp= Temperatura de la placa en °C

A= Área de la placa.

σ = Constante de Stefan.

El ancho del canal del muro se definió calculando el espesor de la capa límite del fluido entre el vidrio y el muro, aplicando la fórmula VIII:

$$\delta(x) = \frac{280 \mu X}{13 V}^{1/2} \quad \text{VIII}$$

Dónde:

$\delta(x)$ = Espesor de la capa límite.

μ = Viscosidad del aire

X = Distancia que recorre el fluido

V = Velocidad del fluido.

La velocidad del fluido (V) se calculó con la fórmula IX:

$$V = \frac{\text{Re crítico} \mu}{\rho X} \quad \text{IX}$$

Dónde:

Re = Número de Reynolds crítico

μ = Viscosidad cinemática

ρ = Densidad del aire

X = Largo del vidrio (m)

El espesor de capa límite es de 8.30 cm; mientras que el ancho del canal obtenido es de 10 cm.

El cálculo de la temperatura de salida del aire (Ts) del Muro Trombe requirió un balance de energía en el vidrio, en la placa y en el aire el cual se describe a continuación:

$$(\text{Vidrio}) - A_v h_e (T_v - T_\infty) + A_v U R_1 (T_p - T_v) + A_v h_i (T_s - T_v) = 0$$

$$(\text{Aire}) - A_v h_i (T_s - T_v) + A_p h_i (T_p - T_s) - m C_p (T_s - T_e) = 0$$

$$(Placa) -A_p h_i (T_p - T_s) - A_v U_p (T_p - T_v) - A_p U_g (T_p - T_s) - A (\zeta_{\infty}) G = 0$$

Dónde:

A_v = Área del vidrio en (m^2)

h_e = Coeficiente convectivo de la placa

h_i = Coeficiente interno del aire

T_s = Temperatura del aire a la salida ($^{\circ}C$)

T_v = Temperatura de la pared del vidrio ($^{\circ}C$)

T_{∞} = Temperatura del ambiente ($^{\circ}C$)

A_p = Área de la pared de la placa (m^2)

T_p = Temperatura de la pared de la placa ($^{\circ}C$)

m = Flujo de aire en el canal

C_p = Calor específico del aire

T_e = Temperatura del aire a la salida $^{\circ}C$

UR_1 = Coeficiente radiactivo de la placa

U_g = Constante global de transmitancia

ζ_{∞} = Producto de la transmitancia por la absorptancia

G = Radiación de Calor (W)

Para conocer la Temperatura de Salida, se calculó el valor de h_i usando la formula X:

$$h_i = Nu k / l \quad X$$

Dónde:

Nu = Número de Nusselt

K = Coeficiente de transferencia de calor

L = Largo del vidrio o placa.

El Número de Nusselt se calculó con la fórmula XI:

$$\text{Nu} = 0.029 \text{Re}_x^{0.8} \text{Pr}^{0.43} \quad \text{XI}$$

El cálculo del flujo de aire en el canal se hizo mediante la ecuación XII:

$$m = \rho V A_p \quad \text{XII}$$

Dónde:

ρ = Densidad del aire

V = Velocidad del aire (m/s)

A_p = Área de la placa (m²)

CAPÍTULO IV

PROTOTIPO PROPUESTO

4.1 Ubicación geográfica

La Facultad de Estudios Superiores Cuautitlán Campo IV, se localiza a 2.5 Km, al noroeste de la cabecera del municipio de Cuautitlán de Romero Rubio; colindando al sur con este municipio; al sureste con el municipio de Melchor Ocampo; al Norte con el municipio de Teoloyucan y al oeste con el municipio de Tepotzotlán; sus coordenadas geográficas son 99°11' 42" de longitud oeste y 19° 41' 35" de latitud y tiene una altitud de 2252 msnm.

4.2 Condiciones climáticas

El clima en la facultad está clasificado como templado, el más seco de los subhúmedos, con régimen de lluvias de verano invierno seco, menos del 5% de la precipitación anual, con verano largo y fresco, con poca oscilación de temperatura; lo cual se representa con la fórmula climática $C(w_o) (w) b(i')$. La temperatura media anual es de 15.7°C, con una oscilación media mensual de 6.5°C; siendo Enero el mes más frío, con una temperatura promedio de 11.8°C y Junio el mes más caliente, con 18.3°C promedio.

La temperatura máxima promedio es de 26.5°C en el mes de Abril y la temperatura mínima promedio de 2.3°C en Enero. El promedio de horas frío oscila entre 620 y 630 al año y la constante térmica o grados calor promedio es de 1250 por año. Con una precipitación en verano, concentrada del mes de Mayo a Octubre, con un invierno seco y un régimen promedio anual de 605 mm; siendo Julio el mes más lluvioso con 128.9 mm y Febrero el mes más seco con 3.8 mm y con una probabilidad de lluvia invernal menor del 5%. Presenta un promedio anual de días con heladas de 64 días, las heladas inician en Octubre y terminan en Abril, pueden presentarse heladas tempranas en Septiembre y tardías en Mayo; con una frecuencia de granizadas muy bajas que pueden observarse durante el verano.

4.3. Selección del aula

Una vez caracterizada la zona, se seleccionó un aula dentro de la facultad en la cual se realizaron los cálculos necesarios para el diseño del prototipo. El aula seleccionada es la A-104 y se ubica en el edificio A-1 del área correspondiente a la carrera de Ingeniería Agrícola; en la figura 7 se muestra un croquis del edificio A-1 y de los edificios y áreas que lo rodean.

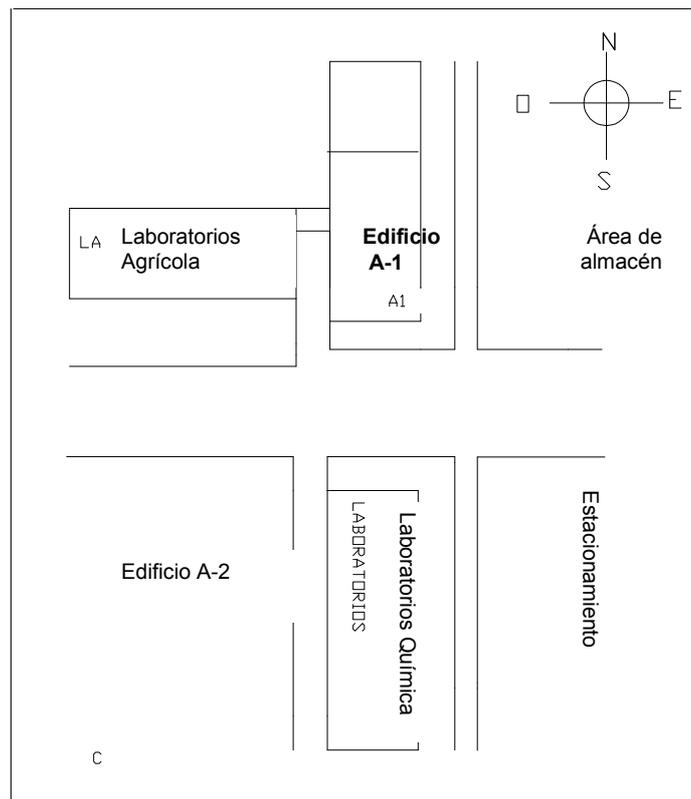


Figura 7. Ubicación del edificio A-1 de Ingeniería Agrícola en la FES-Cuautitlán

Para realizar los cálculos necesarios en la construcción del prototipo se realizaron planos con las vistas del edificio y muros; una vez ubicada el aula se tomaron las medidas externas e internas y se determinó el tipo de material de construcción.

En las figuras 8 y 9, se muestran las vistas noroeste y sureste del edificio A-1 y del aula A-104.

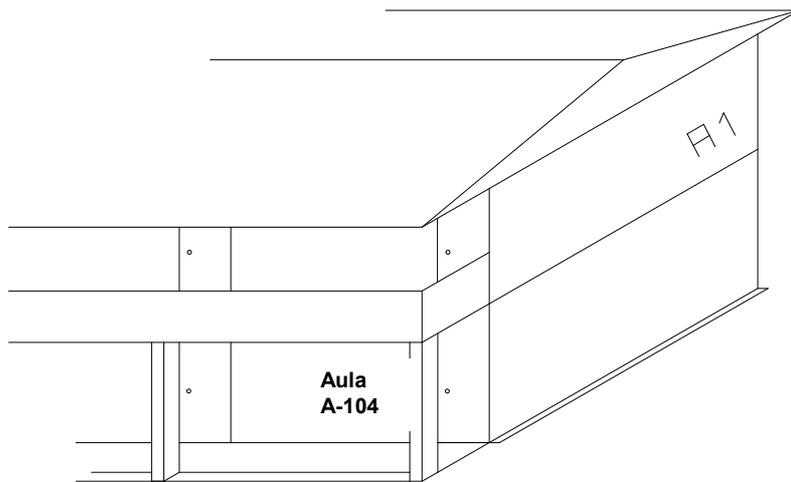


Figura 8. Vista noroeste Edificio A-1 de Ingeniería Agrícola y del aula A-104

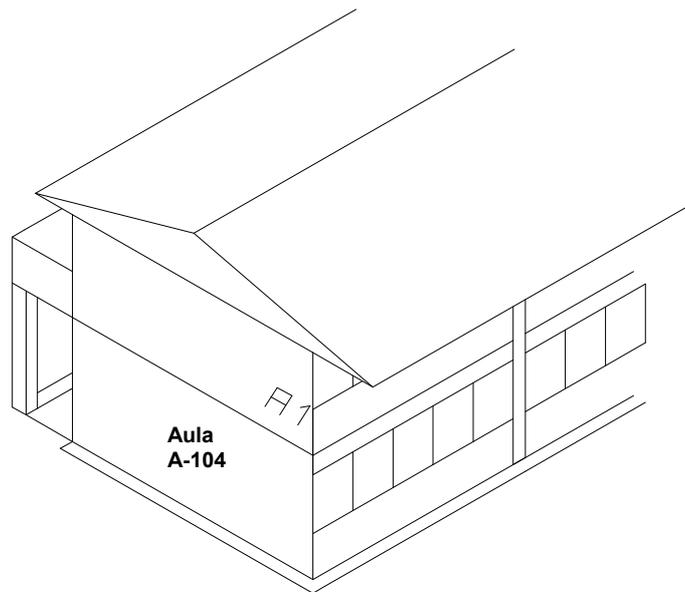


Figura 9. Vista sureste del Edificio A-1 de Ingeniería Agrícola y del aula A-104

4.4. Cálculos de rendimiento en el aula

Los cálculos de rendimiento se realizaron en el aula mediante la división por paredes.

4.4.1 Pared I

La caracterización de las paredes que constituyen el aula A-104, permitió identificar cual de ellas recibe la mayor cantidad de radiación solar directa y tiene la menor pérdida de calor; en este caso nos referimos a la pared que apunta al lado sur la cual llamaremos Pared I, que de acuerdo con las observaciones realizadas no tiene interferencias que generen sombra y recibe radiación directa durante ocho horas y diez minutos.

En la figura 10 se ubica la pared en la fachada sur del edificio A-1; la cual está construida con ladrillo rojo y tiene un grosor de trece centímetros. En el Cuadro 4 se mencionan las características de la Pared 1 de acuerdo con las observaciones realizadas durante un día.

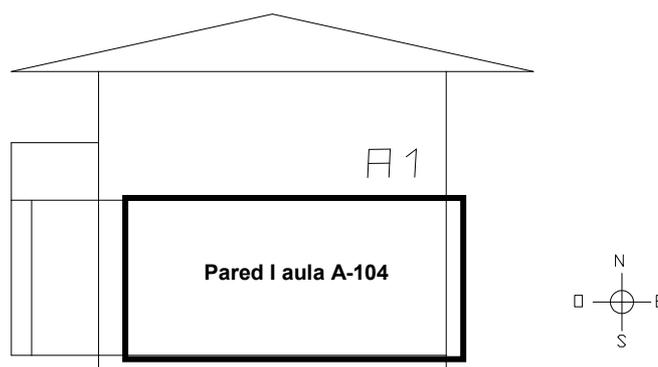


Figura 10. Localización de la pared I del aula A-104 en el edificio A-1 de Ingeniería Agrícola

Cuadro 4. Caracterización de la Pared I en el aula A-104 del edificio A-1 de Ingeniería Agrícola

| PARED I | |
|-------------------------------|--------------------|
| Grosor del muro | 13 cm |
| Material | Ladrillo rojo |
| Superficie Vidriada | Ninguna |
| Ubicación de la pared | Sur |
| Ubicación de la puerta | Ninguna |
| Horas Luz Recibidas | 8 horas 10 minutos |

| | |
|--------------------------------|--|
| | (8:05 – 16:15) |
| Tipo de Radiación | Directa |
| Obstáculos Circundantes | Árboles Altura Aprox. 15m en la parte Este Edificio 15m hacia el Sur |
| Medidas | Altura = 2.5 m Base = 4.5 m |
| Observaciones | Los árboles y el edificio no interfieren en la captación de la radiación; no se observa sombra |

4.4.2 Pared II

En la figura 11 se ubica la pared II, localizada al Este del edificio; está construida con ladrillo rojo y tiene un grosor de trece centímetros, posee una superficie vidriada de 5.4 m². En el Cuadro 5 se mencionan las características de la Pared II, de acuerdo con observaciones realizadas durante un día; esta pared presenta obstrucción de la radiación solar causada por la sombra que proyectan árboles cercanos.

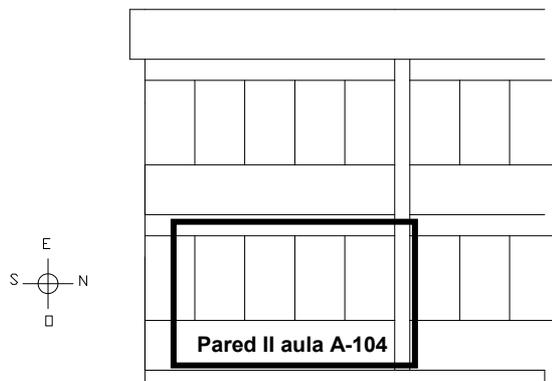


Figura 11. Localización de la Pared II del aula A-104 en el edificio A-1 de Ingeniería Agrícola

Cuadro 5. Caracterización de la Pared II en el aula A-104 del edificio A-1 de Ingeniería Agrícola

| PARED II | |
|--------------------------------|--|
| Grosor del muro | 13 cm |
| Material | Ladrillo rojo |
| Superficie Vidriada | 5.4 m ² |
| Ubicación de la pared | Este |
| Ubicación de la puerta | Ninguna |
| Horas Luz Recibidas | 3 horas 40 minutos (8:00 – 11:40) |
| Tipo de Radiación | Directa |
| Obstáculos Circundantes | Árboles altura aprox. 15m se localizan a una distancia de 2.8 m en la parte frontal de la pared. |
| Medidas | Altura = 1.3m muro + 1.2m ventana Base = 4.5 m |
| Observaciones | Los árboles proyectan sombra a partir de las 11:40 hrs causando obstrucción de la radiación. |

4.4.3 Pared III

La pared III (figura 12), se localiza al Norte en el interior del edificio; está construida con tabla roca, aluminio y vidrio; su grosor es de seis centímetros, posee una superficie vidriada de 4.2 m², no recibe radiación y en invierno presenta pérdidas de calor por una puerta de acceso ubicada en esta pared, la cual puede servirle para circular el aire en el verano. La figura 12 nos muestra como esta constituida la Pared III; el cuadro 6 nos menciona las características de la Pared III.

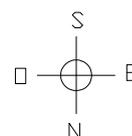
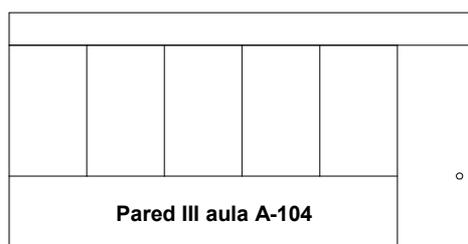


Figura 12. Localización de la Pared III del aula A-104 en el edificio A-1 de la carrera de Ingeniería Agrícola

Cuadro 6. Caracterización de la Pared III en el aula A-104 del edificio A-1 de Ingeniería Agrícola

| PARED III | |
|--------------------------------|---|
| Grosor del muro | 6 cm |
| Material | Vidrio, aluminio y tabla roca |
| Superficie Vidriada | 4.2 m ² |
| Ubicación de la pared | Norte (interior del edificio) |
| Ubicación de la puerta | Norte (1.0 m x 2.1 m) |
| Horas Luz Recibidas | Ninguna |
| Tipo de Radiación | Ninguna |
| Edificación Circundante | Edificio |
| Medidas | Altura = 1.3 por 1.2 m de ventana Base = 3.5 m |
| Observaciones | Hay pérdidas de calor por una puerta de acceso. No recibe radiación directa |

4.4.4 Pared IV

La figura 13 nos ubica la pared IV la cual se localiza al Oeste del edificio; la cual no recibe radiación directa. En el Cuadro 7 se describen las características de la pared IV esta presenta obstrucción de la radiación solar causada por la sombra que proyecta la parte superior del edificio y árboles cercanos.

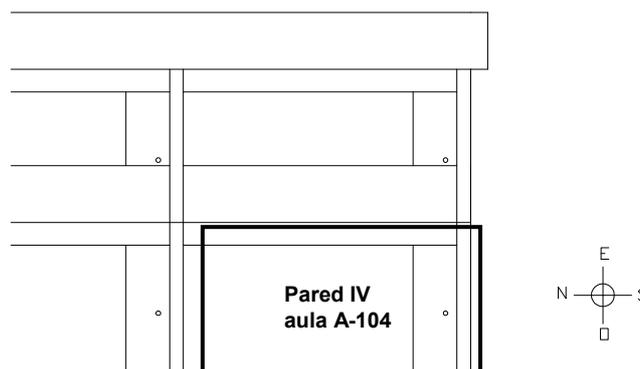


Figura 13. Localización de la Pared IV del aula A-104 en el edificio A-1 de Ingeniería Agrícola

Cuadro 7. Caracterización de la Pared IV en el aula A-104 del edificio A-1 de Ingeniería Agrícola

| PARED IV | |
|--------------------------------|--|
| Grosor del muro | 13 cm |
| Material | Ladrillo rojo |
| Superficie Vidriada | Ninguna |
| Ubicación de la pared | Oeste |
| Ubicación de la puerta | Oeste; 1.10 x 2.30cm |
| Horas Luz Recibidas | Ninguna |
| Tipo de Radiación | Ninguna |
| Edificación Circundante | Primer piso y árboles cercanos. |
| Medidas | Altura = 2.5m Base = 4.5 m |
| Observaciones | El nivel superior del edificio y los árboles cercanos producen sombra todo el día. |

4.4.5 Techo

El techo es de concreto, no recibe radiación ya que sirve de piso al primer nivel del edificio; además posee iluminación eléctrica (luz blanca).

4.5 Diseño del prototipo

El diseño propuesto se planteó tomando en cuenta las dimensiones del edificio; en el Cuadro 8, se muestran las dimensiones del prototipo; es importante considerar la distancia entre la placa de vidrio y el muro para generar una cámara de aire adecuada que permite el acondicionamiento del aula. En el muro se coloca una película de aluminio pintada de negro (placa opaca) para absorber el espectro solar visible y parte del rango infrarrojo; esta absorción transforma la luz en calor en la superficie del muro y disminuye la reflexión.

Cuadro 8. Medidas de los muros en la pared seleccionada del aula A-104 del edificio A-1 de Ingeniería Agrícola

| | Muro actual | Muro Trombe |
|---------------------------|----------------------|--------------------|
| Altura (muro) | 2.5 m | 2.12 m |
| Largo (muro) | 4.5 m | 2.12 m |
| Superficie de muro | 11.25 m ² | 4.5 m ² |

| | | |
|----------------------------------|-------|--------------------|
| Ancho (vidrio) | | 2.12 m |
| Largo (vidrio) | | 2.12 m |
| Superficie vidriada | | 4.5 m ² |
| Espesor del muro | 13 cm | 26 cm |
| Espesor del vidrio | | 5 mm |
| Ancho (placa de aluminio) | | 2.12 m |
| Largo (placa de aluminio) | | 2.12 m |
| Espesor del aluminio | | 2 mm |
| Altura de orificio 1 | | 15 cm |
| Largo de orificio 1 | | 200 cm |

Continuación de Cuadro 8. Medidas de ...

| | | |
|--------------------------------------|--|----------------------|
| Altura de orificio 2 | | 15 cm |
| Largo de orificio 2 | | 200 cm |
| Superficie de orificios | | 3000 cm ² |
| Distancia entre vidrio y muro | | 10 cm |

CAPÍTULO V

ANÁLISIS Y DISCUSIÓN DE RESULTADOS

5.1 Cálculos de rendimiento

La cantidad de aire para ventilación y calefacción requerido para el diseño propuesto se determinó a partir de los datos de radiación máxima reportados por la Estación Meteorológica Almaráz.

El estudio y los cálculos realizados en este trabajo permiten conocer la eficiencia que puede tener un Muro Trombe adaptado en un salón de clases; utilizando los mecanismos de calefacción y ventilación de acuerdo con los requerimientos de los usuarios.

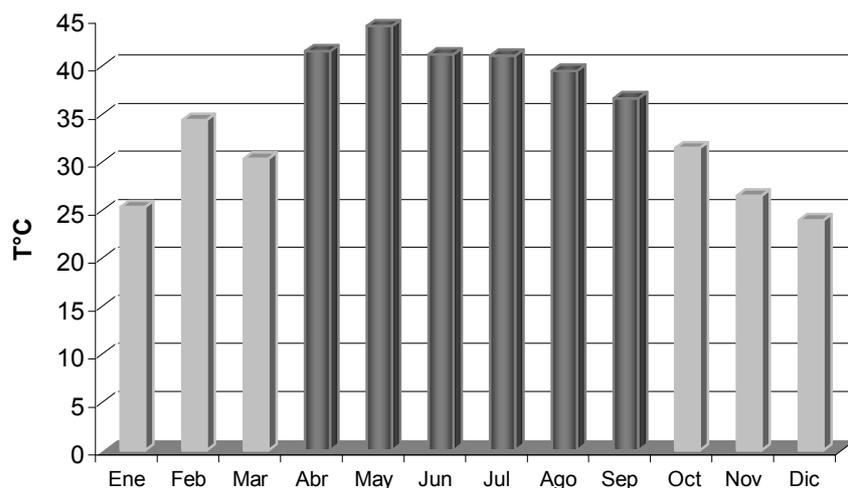
Mediante el balance de energía y la sustitución de los valores conocidos se obtuvo la temperatura del aire a la salida, la cual se muestra en el cuadro 9. En la gráfica 2 se presentan las temperaturas de salida del sistema durante el año.

Cuadro 9. Temperatura del aire a la salida del sistema

| MES | FLUJO DE CALOR EN LA PLACA (W) | TEMPERATURA PLACA (°C) | TEMPERATURA ENTRADA T_e (°C) | TEMPERATURA SALIDA T_s (°C) |
|------------|--------------------------------|------------------------|--------------------------------|-------------------------------|
| ENERO | 2,274.84 | 43.67 | 15.00 | 25.33 |
| FEBRERO | 2,807.30 | 60.55 | 20.00 | 34.44 |
| MARZO | 2,770.13 | 59.44 | 16.00 | 30.40 |
| ABRIL | 3,416.26 | 77.33 | 23.00 | 41.60 |
| MAYO | 3,525.83 | 80.11 | 25.00 | 44.20 |
| JUNIO | 3,360.55 | 75.89 | 23.00 | 41.23 |
| JULIO | 3,347.78 | 75.56 | 23.00 | 41.14 |
| AGOSTO | 3,250.04 | 72.99 | 22.00 | 39.54 |
| SEPTIEMBRE | 2,977.59 | 65.50 | 21.00 | 36.66 |
| OCTUBRE | 2,552.15 | 52.70 | 19.00 | 31.48 |
| NOVIEMBRE | 2,308.76 | 44.64 | 16.00 | 26.57 |
| DICIEMBRE | 2,223.55 | 41.67 | 14.00 | 23.93 |

Fuente: Elaboración personal con datos de la Estación Meteorológica Almaráz

Gráfica 2. Temperaturas máximas del aire a la salida del sistema



5.1.1 Ventilación

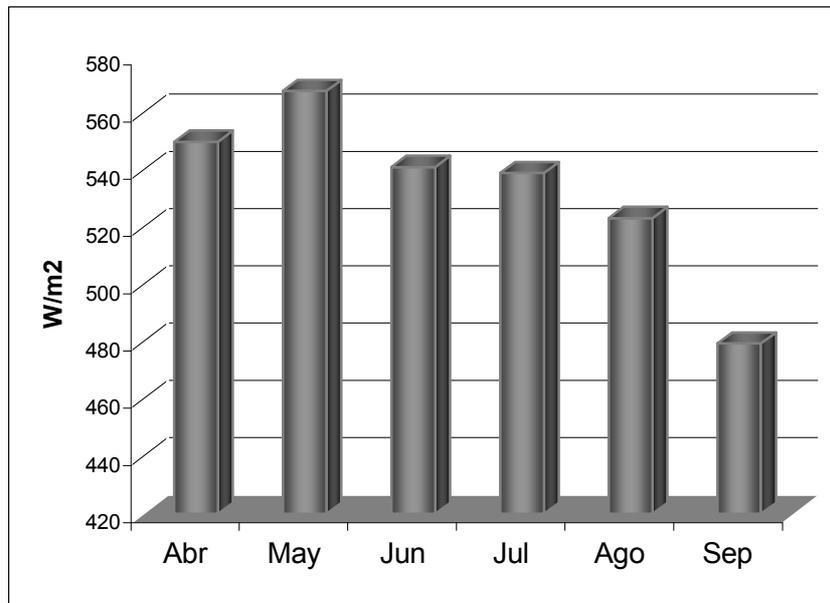
La ventilación existente durante las horas de luz varía dependiendo de la época del año. En el cuadro 10 y la gráfica 3 se observa que la radiación y por ende el calor se incrementan en el período de abril a septiembre, esto indica que el muro deberá permanecer con las ventilas de entrada de aire abiertas durante estos meses; y se podrá extraer un flujo de aire de 1.25 m³/min proveniente del aula.

Cuadro 10. Radiación Solar máxima en el período de abril a septiembre

| MES | RADIACION SOLAR MEDIA (W/m ²) |
|------------|--|
| Abril | 550.30 |
| Mayo | 567.95 |
| Junio | 541.33 |
| Julio | 539.27 |
| Agosto | 523.53 |
| Septiembre | 479.64 |

Fuente: elaboración personal con datos de la Estación Meteorológica Almaráz

Gráfica 3. Radiación solar en el período de abril a septiembre



5.1.2 Calefacción.

La utilización del mecanismo para calefacción se hará durante los meses en los que se presenta una disminución en la temperatura y la radiación, estos datos se observan en el cuadro 11 y la gráfica 4. Mediante los datos obtenidos se determinó que el muro deberá permanecer con las ventilas de salida cerradas durante éste período de esta forma se podría introducir un flujo de aire de 1.25 m³/min en el aula.

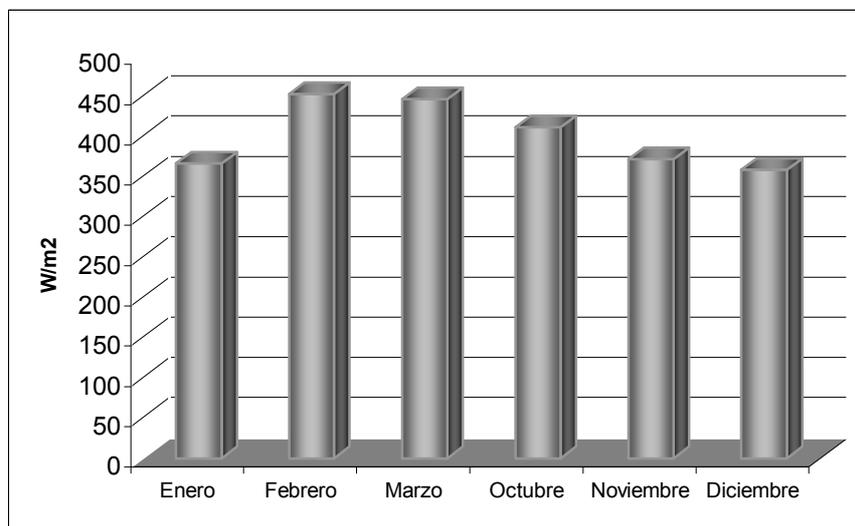
Cuadro 11. Radiación Solar en el período de octubre a marzo

| MES | RADIACION SOLAR MEDIA |
|-----|-----------------------|
|-----|-----------------------|

| | (W/m ²) |
|-----------|---------------------|
| Enero | 366.44 |
| Febrero | 452.21 |
| Marzo | 446.22 |
| Octubre | 411.11 |
| Noviembre | 371.90 |
| Diciembre | 358.18 |

Fuente: elaboración personal con datos de la Estación Meteorológica Almaráz

Gráfica 4. Radiación Solar en el período de octubre a marzo.



La posibilidad de obtener un confort térmico a lo largo del año, mediante la regulación de apertura y cierre de las ventilas dependerá de las temperaturas que se presenten; por tanto es viable la utilización de un Muro Trombe como dispositivo de almacenamiento de calor.

El diseño propuesto interacciona los datos climáticos con las características de construcción del aula A-104, por tanto es un sistema que puede satisfacer las necesidades de acondicionamiento de los usuarios, además la implementación del sistema propuesto puede representar un importante ahorro económico a medio plazo, ya que el costo del acondicionamiento del aire será menor que si se utilizan combustibles fósiles u otras fuentes de energía. Con la

implementación de dicho diseño es posible acercarse a un equilibrio térmico entre los usuarios y el entorno; por tanto se propicia el bienestar fisiológico y el mejor aprovechamiento académico al no exponer a los usuarios a las variaciones extremas que existen a lo largo del año en ésta edificación.

CONCLUSIONES

1. La ubicación geográfica de la FES-Cuautitlán favorece la presencia de temperaturas bajas, principalmente en los meses invernales, lo que genera la necesidad de acondicionar el aire para lograr confort térmico.
2. La construcción de un muro Trombe en el aula A-104 de la Facultad de Estudios Superiores Cuautitlán permite acondicionar el aire dentro de la construcción para poder obtener confort térmico (21°C) a bajo costo además de que se evitará la contaminación por el uso de combustibles fósiles.
3. El cálculo de ventilación y calefacción en el aula A-104 permiten programar la apertura o cierre de ventilas durante el año.
4. El diseño propuesto está adaptado a las condiciones geográficas y climáticas de la FES-Cuautitlán.
5. El correcto dimensionamiento del muro y la adecuada selección de materiales de construcción permiten acondicionar el aire dentro del salón y favorece la mayor captación de la radiación solar.
6. La captación de calor diaria que recibe la superficie varía según las horas de radiación y la época del año.
7. La ventilación es mayor en los meses invernales y disminuye en primavera y verano, entonces la utilización del sistema pasivo (muro Trombe) propuesto nos permitirá reducir estas variaciones dentro del aula A-104 a lo largo del año.

REFERENCIAS

- [1] Brevik, T. Chadwick M. 2000. July- September. Solar Energy in Progress and Future Research Trends. Progress in Energy and Combustion Science. Una publicación del Programa de las Naciones Unidas para el Medio Ambiente División de Tecnología, Industria y Economía. Canadá <http://www.elsevier.com/locate/pecs/> Volumen30. 367– 416pp.
- [2] Rau Hans. 1984. Energía solar. Aplicaciones Prácticas. Boixareu Editores. Barcelona-México. 2, 17, 20-24, 79 pp.
- [3] Pons, X. 1996. Estimación de la Radiación Solar a partir de modelos digitales de elevaciones. Propuesta metodológica. A: VII Coloquio de Geografía Cuantitativa, Sistemas de Información Geográfica y Teledetección. Juaristi, J. i Moro, I. (eds.) Vitoria-Gasteiz.15pp
- [4] Leng G. 2001 – 2004. Resources UNEP Ind Environ 2000; Solar Air Heating Project Analysis. Clean Energy Decision Support Centre. Ret Screen International. Una publicación del Programa de las Naciones Unidas para el Medio Ambiente División de Tecnología, Industria y Economía. Canadá. <http://www.retscreen.net./3>. 22–3pp.
- [5] Duffie, AJ, and Beckman, AW. 1991. Solar engineering of thermal processes. 2ª Ed. Wiley Interscience. U.S.A. 919 P.
- [6] Bohórquez, P, .J. 2001. Muro de Trombe. Universidad de los Andes, Bogotá D.C., Colombia. Departamento de Ingeniería Mecánica. Propuestas de intervención; Propuestas climáticas PDF 24pp.
- [7] Rodríguez V. 2001. Introducción a la Arquitectura Bioclimatica. Llimusa, S.A de C.V. México. 204 pp.

- [8] Quadri Nestor. 2003. Energía Solar. 3^a ed. Editorial Alsina.
- [9] Morillón, G.D. 1993. Bioclimática. Sistemas pasivos de climatización. Universidad de Guadalajara. México. 142 P.
- [10] Caballero, I. 2001. Calefacción en Bioconstrucciones.
http://www.geas.org/bioconstruccion/calefacion_biocons.html. México
- [11] Balance nacional de energía México. 1998
- [12] Beckham William, A. 1984. Proyecto de Sistemas Térmico-Solares. Editorial Index.
- [13] Borgerst, T. and H. Akbari. 1983 Free Convective Turbulent Flow Within the Trombe Wall Channel". Applied Solar Energy, USA. Vol.33.
- [14] Brevik, T. Hadwick, M. El-kholy O. Fussle, C. Htun, N. 2000 July - September. Industry and Environment. Sustainable Energy. Una publicación del Programa de las Naciones Unidas para el Medio Ambiente División de Tecnología, Industria y Economía. Canadá
http://www.uneptie.org/media/review/vol23no3/23-3_energy.pdf.
- [15] Butti, K. and Perlin, J. 1980. A Golden Thread 2500 Year Solar Architecture and Technology. E.U. 291 pp.
- [16] División de Tecnología, Industria y Economía. Canadá.
<http://www.retscreen.net/3>. 22–3pp.
- [17] Doffie, R.J., and Knowlest, G. 1997. A Simple Design Method for the Trombe Wall". Applied Solar Space Heating and Day Lighting. Solar Energy September.

[18] Elvis, F. Mendieta M. 31 de marzo del 2002. Energía Solar y Arquitectura. Revista Digital universitaria. [www.Revista.Unam,mx](http://www.Revista.Unam.mx). Vol.3 No.2.1-35pp.

[19] Espín, V. M. 1999 Abril. Antecedentes. Historia de la Arquitectura Solar. Boletín cf+s. <http://habitat.aq.upm.es/boletin/n9/amvaz.html>. Numero 9.

[20] Guohuai. G, 1998. A parametric Study of Trombe Walls for Passive Cooling of Buildings. Energy and Building Vol. 27. pp 37-43.

[21] Hirunlabh, J., Kongduang W., Namprakai, J., Khedari. 1999 .Study of Natural Ventilation of Houses by a Metallic Solar Wall Under Tropical Climate. Renewable Energy. Vol. 07.

[22] Leng G. 2001 – 2004. Resources UNEP Ind Environ 2000; Solar Water Heating Project Analysis. Clean Energy Decision Support Centre. Ret Screen internacional. Una publicación del Programa de las Naciones Unidas para el Medio Ambiente

[23] Leng G. 2001 – 2004. Resources UNEP Ind Environ 2000; Photovoltaic Project Analysis. Clean Energy Decision Support Centre. Ret Screen internacional. Una publicación del Programa de las Naciones Unidas para el Medio Ambiente División de Tecnología, Industria y Economía. Canadá. <http://www.retscreen.net/3>. 22–3pp.

[24] Manríquez J. 1984. Energía solar. Fundamentos y Aplicaciones Foto térmicas. Harla. 4, 3, 6-8,11-27,128 pp.

[25] Mejia. R.E. 1999. Estado del Arte de la Investigación en Energía Solar en México. Cuadernos FICA. México.

[26] Ohanessian., P and W. S. Charters. 1978. Thermal Simulation of a Passive Solar House Using a Trombe-Michel Wall Structure. Applied Solar Energy. Great Britannia. Vol.20.

[27] Proserpi. M. 1999. Radiación Solar. 22pp

[28] Torroja E. 1983. Bases para el Diseño Solar Pasivo.

[29] Villalobos. J. 1995 Febrero. Energía Solar. Tlaquepaque, Jalisco.158pp.

[30] Xiande Fang and Yyuanzhe li. 1999. Numerical Simulation and Sensitivity Analysis of Lattice Passive Solar Heating Walls. Solar Energy, vol.69. Great Britain.

[31] Zalewski, S. Lassue, B. Duthoit, M. Butez. 2001. Study of Solar Walls – Validating a Simulation Model Building and Environment. Vol. 37. pp. 109-121.

[32] Avances en Energía Solar. 1998. Recopilación de Artículos Técnicos Publicados en ERA SOLAR. Progenza Promotora de Estudios, S.A. España.15, 19,31pp.

[33] Mills F. A. 1997. Transferencia de Calor. McGraw Hill / Irwin University of California E.E.E.U.U.pp.269,868,197

ANEXOS

ANEXO 1. Conductividades térmicas y valores M

| Material | Conductividad, K | | | Valores M |
|----------|------------------|------------------------|-------------------------------------|------------------------------|
| | W / m · K | Kcal/m · s · C° | Btu · in / ft ² · h · F° | Ft ² · h · F°/Btu |
| Ladrillo | 0.7 | 1.7 x 10 ⁻⁴ | 5.0 | 4.00 |
| Concreto | 0.8 | 1.9 x 10 ⁻⁴ | 5.6 | 1.93 |
| Vidrio | 0.8 | 1.9 x 10 ⁻⁴ | 5.6 | 0.89 |

ANEXO 2. Concentrado de datos climáticos promedio mensual de la estación Almaraz, 1987 – 1997.

| | 1978 | 1997 |
|-------------------------------|--------------------------------|--------------------------------|
| Formula climática | C (W _o) (W) b (i') | C (W _o) (W) b (i') |
| Mes mas frío | Enero 11.8 ° C | Enero 11.6 ° C |
| Mes mas caliente | Junio 18.3 ° C | Junio 17.4 ° C |
| T ° c media | 15.7 ° C | 14.8 ° C |
| P p | 605.0 mm | 609.2 mm |
| Oscilación de t ° c | 6.5 ° C | 5.8 ° C |
| Porcentaje de lluvia invernal | 5.0 % | 16.7 % |
| Índice p / t ° c | 38.53 % | 41.16 % |
| Mes mas lluviosos | Julio 128.9 mm | Julio 120.5 mm |
| Mes mas seco | Febrero 3.8 mm | Diciembre 8.67 mm |
| Horas frío acumuladas | 800 y 820 horas | 607 horas |
| Constante térmica | 1,250 U.T. | 1,729.52 U.T. |
| Días c / heladas anuales | 64 días promedio | 25 días promedio |

Continuación ANEXO 2. Concentrado de...

| Mes | TEMPERATURA MEDIA | PP | EVAP | ETP | HORAS INSOLACION | RADIACION SOLAR |
|-------------------|--------------------------|-----------|-------------|------------|-------------------------|------------------------|
| Enero | 11.61 | 11.31 | 98.98 | 74.24 | 7.93 | 366.44 |
| Febrero | 12.78 | 13.97 | 114.08 | 85.56 | 9.03 | 452.21 |
| Marzo | 14.12 | 12.30 | 165.51 | 124.13 | 9.01 | 446.21 |
| Abril | 15.64 | 26.33 | 160.15 | 120.11 | 8.16 | 550.30 |
| Mayo | 17.08 | 43.80 | 151.72 | 113.79 | 8.69 | 567.95 |
| Junio | 17.43 | 104.35 | 144.79 | 108.60 | 7.41 | 541.33 |
| Julio | 16.57 | 120.58 | 128.57 | 96.43 | 7.14 | 539.27 |
| Agosto | 16.48 | 109.91 | 113.00 | 84.75 | 7.07 | 523.53 |
| Septiembre | 16.11 | 85.93 | 100.33 | 75.25 | 5.96 | 479.64 |
| Octubre | 14.17 | 70.07 | 97.46 | 73.09 | 6.84 | 411.11 |
| Noviembre | 13.17 | 14.04 | 85.94 | 64.46 | 8.03 | 371.90 |
| Diciembre | 11.96 | 8.67 | 79.69 | 59.77 | 8.09 | 358.18 |

ANEXO 3. Sumatoria total de las unidades térmicas

| UNIDADES TERMICAS SUMATORIA ANUAL | | | |
|--|----------------------|--------------------|---------------------|
| AÑO | T° C BASE 4.5 | T° C BASE 6 | T° C BASE 10 |
| 1988 | 3,161.15 | 2,703.95 | 1,459.95 |
| 1989 | 3,565.6 | 3,033.00 | 1,551.72 |
| 1990 | 3,843.26 | 3,296.76 | 1,835.76 |
| 1991 | 3,889.7 | 3,342.2 | 1,900.8 |
| 1992 | 3,686.92 | 3,137.92 | 1,673.52 |
| 1993 | 3,697.4 | 3,161.9 | 1,689.9 |
| 1994 | 3,819.8 | 3,272.3 | 1,812.3 |
| 1995 | 3,932.0 | 3,356.5 | 1,896.5 |
| 1996 | 3,756.2 | 3,209.2 | 1,745.2 |

ANEXO 4. Análisis de costos

La construcción ó adaptación del Muro Trombe requiere principalmente de un estudio de la edificación, así como clima y ubicación geográfica. Partiendo de este análisis se cuantifica el material de construcción, los cálculos físicos y matemáticos necesarios para optimizar su eficiencia y así tener un costo preciso.

Cabe mencionar que el costo de material de construcción, para realizar el proyecto se estima en \$ 2,039 pesos. Los precios de los componentes del Muro Trombe se consultaron con diferentes proveedores.

| CONCEPTO | PRECIO EN PESOS |
|--|------------------------|
| Vidrio de 6mm y 2m * 2m | 580 |
| Placa de aluminio de 0.89mm y 2m * 2m | 684 |
| Pintura negra 1 litro | 75 |
| Mano de obra por dos días | 400 |
| Otros gastos | 300 |
| Total | 2,039 |