

CAPÍTULO 2

ANTECEDENTES

2.1. Antecedentes

En la revisión bibliográfica se tomó en cuenta trabajos relacionados con la interacción entre el medio ambiente y el interior de una edificación considerando que varían con el tiempo y que entre ellos existe un sistema de descarga de calor montado sobre un muro del edificio, además de la interacción que existe entre el ambiente y el sistema de descarga de calor así, como los fenómenos de transferencia de calor como la convección entre placas planas paralelas, fenómeno que se presenta en el interior del sistema.

Se encontraron referencias sobre aplicaciones de la energía solar en edificaciones, la mayoría enfocadas al calentamiento de la edificación como resultado de la distribución del aire previamente calentada por la radiación solar en colectores solares (montados en muros). También se encontró referencias sobre estudios, teóricos y experimentales, de sistemas que aíslan los edificios contra las condiciones ambientales.

Los antecedentes encontrados sobre el diseño y estudio del comportamiento de sistemas de descarga de calor en muros se clasificaron en base a los conocimientos que aportan al trabajo de investigación.

Para el diseño del prototipo experimental, de los antecedentes encontrados se observó que se ha estudiado el comportamiento del aire a la salida del canal al variar las condiciones ambientales, forma de la sección transversal y materiales del elemento almacenador. También como se incrementa o disminuye la temperatura del aire a la salida del canal formada por el vidrio y el elemento almacenador, al modificar las propiedades térmicas del elemento almacenador. Los antecedentes son los siguientes:

Edward S. Morse (1880) construyó un colector solar sobre una pared orientada al sur para calentamiento de una vivienda. Le implementó orificios para permitir que el aire calentado se introdujera a las habitaciones. El dispositivo resultó pequeño en comparación del tamaño de la habitación donde se encontraba pero notó que el aire interior tenía una diferencia de 15 °C con respecto al exterior. En 1882 modificó su colector solar y le añadió un vidrio transparente para que retuviera el calor. Consiguió aumentar la temperatura del aire interno desde 20 °C hasta 31 °C. Un dispositivo de mayor dimensión se colocó en Ateneo de Boston donde se logró ahorrar entre 19 y 38 kilos de carbón diarios utilizados para calentar el lugar.

P. Ohanessian y Charters (1978) estudiaron el comportamiento de un sistema pasivo empleando los principios del muro Trombe, pero adaptándole una placa colectora de calor para ser empleado para calentar el interior de la edificación. Por medio de la simulación en computadora estudiaron el comportamiento térmico de la placa montada a una pared de concreto durante las peores condiciones de invierno en Melbourne Australia. Encontraron que al emplear doble vidrio en el colector no incrementa en un valor considerable la temperatura del interior de la habitación y que el espesor óptimo de la placa absorbadora de calor para esas condiciones era de 25 cm. Observaron que con el paso del tiempo el espesor de la placa colectora de calor tiende a adquirir la misma temperatura en ambos extremos, mientras que la temperatura del muro de concreto no lo consigue. Con un espesor de placa colectora pequeño se requiere de menor tiempo para conseguir igualar las temperaturas en ambos extremos.

H. Manz and et al. (1996) estudiaron un calentador de aire montado en el exterior de una pared compuesto de material de aislamiento transparente y una película absorbadora de calor. La película de

$\text{CaCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ permite que la luz visible se transmita y la radiación invisible se absorba empleándola para calentar aire circundante. El medio de almacenaje es la película de $\text{CaCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ y el muro. Con la película se obtuvo una mayor ganancia de calor y se distribuyó mejor el calor a lo largo del muro.

Guohui Gan (1998), realizó un estudio de la ventilación natural en verano empleando un programa de computadora (de dinámica de fluidos) para la simulación del comportamiento del muro Trombe el cual corroboró con la similitud presentada con los resultados de otros modelos experimentales. Por medio del programa estudió el comportamiento del sistema al variar la distancia entre el vidrio y el muro, la altura del muro, tipo de vidrio y aislante del muro. En sus resultados menciona que conforme se aumenta la temperatura del muro, su altura y espesor, el flujo de aire de ventilación aumenta. En su modelo que esta en estado estable no contempla el almacenamiento de calor por considerarlo un valor despreciable.

Raman et al (2000), empleando los conocimientos adquiridos al evaluar un modelo para obtener calefacción en una casa de la india, construyó un segundo modelo el cual puede ser empleado en condiciones climáticas como cálido seco y cálido húmedo. Presenta el modelo analítico utilizado para su evaluación.

Zalewski et al (2002), presentaron el comportamiento del muro Trombe mediante la simulación de un modelo analítico al variar sus características como: quitar la cubierta de vidrio, incrementar un aislante entre el muro y la habitación a ventilar y no colocar entradas y salidas de aire a la habitación a ventilar. El diseño original de muro Trombe presenta mayor ganancia de calor en el muro, mientras que el que se encuentra aislado transmite menor flujo de calor al interior de la edificación. El modelo analítico consiste en dividir el muro Trombe en varios nodos y realizar balances de energía en cada uno afín de encontrar por el método de diferencias finitas los valores de temperatura.

M. Belusko et al (2003), presentaron el estudio realizado a un calentador solar de aire que emplea como placa almacenadora acero corrugado, para fines de calefacción. Presenta un modelo analítico en estado estacionario y a diferencia de otros modelos no considera ni las condiciones climáticas o al flujo de aire generado en el tiempo.

Para la formulación del modelo analítico, se consideraron los antecedentes que se enlistan a continuación, donde se encontraron modelos en estado transitorio y en estado estacionario, que permiten conocer el comportamiento de algunas variables de diseño de un muro Trombe, también se encontró el empleo de software como el de dinámica de fluidos para simular el comportamiento térmico del muro Trombe.

R. J. Duffin y Greg Knowles (1985) propusieron un modelo analítico para conocer el comportamiento de variables de diseño de un muro Trombe en estado transitorio. Dicho modelo contempla la semejanza con un circuito eléctrico y no presentan su validación ni resultados de pruebas del modelo.

Zalewski et al (1997), presentaron los resultados al evaluar un sistema que funciona bajo el principio del Muro Trombe pero le incluyen una pared de aislante la cual se encuentra separada por tres centímetros del muro almacenador de calor. Construyó un modelo de pruebas en una casa de uso rural en Cadarache Francia, el cual emplea un ático con ventilación como apoyo. Encontró que con una mica de policarbonato se reduce la pérdida de calor en invierno y que con el aislante se disminuye la

ganancia de calor del muro al interior de la habitación en verano. En el modelo analítico que presenta, (en función del tiempo), esta formado por una matriz de cuatro incógnitas y en ninguna de ellas contempla el almacenamiento de calor en el muro. Debido a que existe una separación entre el aislante y el muro se presenta ganancia de calor al interior de la habitación a ventilar (verano) debido a que el aire que circula por ese espacio es calentado e introducido al interior de la habitación, elevando su temperatura ambiental.

Hirunlabh and et al (1999), presentó un modelo analítico que permite conocer el comportamiento de un muro Trombe en estado estable y que fue validado mediante la experimentación. El diseño fue realizado para las condiciones ambientales de Bangkok Tailandia y observó su comportamiento al variar la distancia entre el muro - vidrio y la altura del muro. El modelo analítico considera a la temperatura ambiente y radiación solar pero no considera el almacenamiento de calor (considera que la placa emite todo el calor y no almacena nada) que sufre la placa absorbidora. Con la experimentación encontró que con el empleo de un muro Trombe se puede reducir la temperatura del interior de una habitación hasta acercarse a la temperatura ambiental.

Ekechukwu y Norton (1999), presenta un modelo analítico empleado para evaluar diferentes diseños de calentadores de aire. Entre las variaciones se observa que el flujo de aire es calentado por la parte posterior de la placa, en el lado donde no recibe la radiación solar, es decir, no existe flujo de aire entre la placa y el vidrio protector. En el modelo analítico que emplea no contempla el almacenamiento de calor originado en la placa absorbidora de calor debido a que el flujo de calor atraviesa la placa para ser retirado por el aire y no se almacena como es el caso donde se encuentra protegida la placa por aislante.

Xiande Fang y Yuanzhe Li (2000), presentó el comportamiento de un sistema, que varía con respecto del muro Trombe, en el muro almacenador de calor, el cual presenta varias entradas de aire a lo largo de su superficie. Presentó un modelo analítico para el comportamiento de su sistema, el cual considera el flujo de aire que circula a través de las entradas de aire sobre el muro y el espacio entre el muro y el vidrio. Encontró que la eficiencia de su sistema es mayor al del muro Trombe (30.2 % y 22.6% respectivamente).

Aboul et al (2000), a un calentador de aire solar le incrementan un elemento almacenador de calor con el fin de optimizar las ganancias de calor al aire para ser empleado con fines de secado agrícola. Aún cuando el modelo analítico presentado esta en estado estacionario, emplea una relación en función del tiempo para el flujo de aire. Encontró que la temperatura del aire a la salida del colector (no la del cuarto a ventilar) se incrementa conforme se aumenta la longitud y espesor del elemento almacenador y que se reduce al aumentar la separación entre el vidrio y el elemento almacenador.

S. O. Enibe (2003), presenta el estudio térmico realizado a un calentador solar de aire al recubrir a la placa almacenadora con un recubrimiento absorbente para la radiación solar de nombre PCM. Presenta al modelo analítico en estado transitorio recomendando su resolución por el método de diferencias finitas. El modelo contempla tanto a las condiciones climáticas como al flujo de aire en estado transitorio pero no incluye la temperatura del cuarto a condicionar.

M. Belusko et al (2003), presentaron el estudio realizado a un calentador solar de aire que emplea como placa almacenadora acero corrugado, para fines de calefacción. Presenta un modelo

analítico en estado estacionario y a diferencia de otros modelos no considera ni las condiciones climáticas o al flujo de aire generado en el tiempo.

Ammari (2003), desarrollo un modelo analítico aplicado a un calentador solar de aire, en el cual, el flujo de aire circulaba por el interior de la placa almacenadora mediante canales. El modelo se encuentra en estado estacionario pero involucra algunas ecuaciones en estado transitorio. Estudió su comportamiento al incrementar la altura de la placa almacenadora, espacio entre placas (vidrio y almacenadora). Encontró que empleando una placa acanalada se obtenía un comportamiento térmico más adecuado para la transferencia de calor con el aire.

Para conocer los estudios realizados a sistemas de descarga de calor, de los antecedentes que a continuación se presentan, se encontró que mediante la experimentación se varió el número de Grashof, entre valores comprendidos entre 10^2 y 10^{12} , es decir, vieron el comportamiento del fenómeno de la convección natural lo largo de la placa así como la variación de las temperaturas entre la sustancia de trabajo y la del ambiente (respuesta térmica); se varió el número de Rayleigh con valores comprendidos entre 0 y 10^{10} , es decir, analizan cómo se comporta un sistema almacenador de calor al variar la sustancia de trabajo; se varió el número de Fourier de 5 a 44,000, es decir, se analizó cómo responde el muro en cuanto a la capacidad de almacenamiento de calor con el paso del tiempo; y se varió el número de Prandtl desde 0 hasta 10^3 para conocer cómo se modifica la velocidad del flujo al cambiar la densidad (cambio de viscosidad y fuerzas de flotación), es decir, se modificó las propiedades del fluido de trabajo. Los antecedentes son:

Siebers, *et al.*, (1985) estudiaron experimentalmente la convección natural en una placa vertical, con temperatura y flujo de calor constantes, y con propiedades variables. La placa se alojó en un túnel de viento, que fue operado para régimen turbulento. Se manejó para el número de Grashof entre 10^6 y 10^{12} y con temperaturas de la placa de 2.7 veces la del ambiente. En los resultados se muestra que la variación en las propiedades no tiene un efecto significativo sobre la convección de calor. También se observa que el número de Grashof en la transición disminuye al aumentar la temperatura, y que el perfil de la capa límite turbulenta puede ser representado por un perfil universal. Construyeron además una correlación para cada región, siendo para flujo laminar $Nu_y = a Gr_y^{1/4} (T_w/T_\infty)^{-0.04}$ con a igual a 0.404 para flujo de calor constante y 0.356 para temperatura constante.

Jaluria (1985) presentó un estudio numérico de la interacción de la convección natural del aire debido al calentamiento de una placa vertical con fuente de calor discretizadas a lo largo de su superficie. Parte del estudio estuvo orientado a observar el efecto de una frontera inferior horizontal, por donde entra el aire a la placa vertical. Se trabajó para números de Grashof entre 100 y 10^5 , y relaciones de aspecto de 2 y 4. El trabajo muestra que, para valores pequeños del número de Grashof, la frontera inferior es importante en el resultado, y que aguas abajo del elemento calentador la solución es parecida a la de la placa uniforme para los números de Grashof grandes.

Chen, *et al.*, (1986) presentan un estudio numérico de la convección libre laminar en capa límite a lo largo de placas planas horizontales, inclinadas y verticales con variación exponencial de la temperatura o flujo de calor en la pared en dirección de la coordenada axial. Las ecuaciones del movimiento del fluido se transforman en variables de similitud adimensionales para ser resueltas por diferencias finitas. Para ello solucionan el problema en dos orientaciones distintas: inclinada-horizontal ($0^\circ \leq \gamma < 90^\circ$) e inclinada-vertical ($0^\circ < \gamma \leq 90^\circ$). Presentan resultados en gráficas de esfuerzos cortantes locales en la pared, de los números de Nusselt y Grashof locales, de la velocidad y temperatura locales,

así como del número de Nusselt promedio, todos para las inclinaciones de 0, 5, 15, 30, 45, 60 y 90°, para distintos valores del exponente, para dos fluidos con números de Prandtl de 0.7 y 7. Las correlaciones del número de Nusselt promedio para la orientación inclinada-vertical con variación exponencial de la temperatura es: $Un = (4/3) K_1(Ra_L \text{sen} \gamma)^{1/4}$, siendo K_1 una constante, función de Pr, y válida para $5 \times 10^3 \leq Ra_L \text{sen} \gamma \leq 5 \times 10^9$.

Hung y Shiau (1988) presentaron un estudio experimental de la convección natural entre dos placas paralelas verticales, conteniendo una de ellas una protuberancia rectangular, bajo condiciones asimétricas de flujo de calor, una placa calentada y la otra aislada. Se empleó trazador de humo para visualizar patrones de flujo. Se observaron dos celdas de recirculación cercanas a la protuberancia. El rango de pruebas fue en $10^4 \leq Ra \leq 10^{10}$, con calentamiento desde 41.32 hasta 265.66 W/m² y diversos tamaños relativos de la protuberancia. Los rangos del coeficiente de convección varían entre 3 y 10 m² °C/W siendo mayores en la región de entrada. Muestran la correlación $Nu = 0.617 Ra^{0.316}$ y mencionan que es aplicable aguas abajo donde se generan turbulencias causadas por las protuberancias, mientras que aguas arriba los resultados son los mismos que para una placa plana.

Ramanathan y Kumar (1991) presentan resultados numéricos del flujo convectivo natural entre dos placas paralelas verticales dentro de una cavidad grande. Las condiciones del canal son de temperatura constante, mientras que en la placa son de flujo de calor constante. El estudio fue realizado para distintos números de Prandtl y relaciones de aspecto del canal. Los resultados concuerdan bien con los de otros trabajos para relaciones de aspecto grandes, pero no ocurre lo mismo para relaciones de aspecto pequeñas debido a que se toma en cuenta la difusión debida a la energía térmica. Los resultados muestran correlaciones para predecir la temperatura máxima y el número de Nusselt promedio sobre la placa como funciones del número de Rayleigh y la relación de aspecto. Se muestra también una correlación de la temperatura máxima del canal sobre la placa, que incluye el efecto del número de Prandtl para relaciones de aspecto grandes.

Naylor, *et al.*, (1991), presentaron un estudio numérico de la convección libre, laminar bidimensional, entre placas verticales isotérmicamente simétricas que incluyen los efectos del flujo de entrada. Las formas elípticas de las ecuaciones de movimiento son resueltas usando condiciones de flujo de entrada novedosas. Los resultados son presentados para $Pr = 0.7$, $50 \leq Gr \leq 5 \times 10^2$ y relaciones de aspecto de L/b de 10, 17 y 24. Se observan fenómenos de separación del flujo en la entrada. Comparaciones con la aproximación en capa límite muestran que la solución elíptica es necesaria para dar precisión en los parámetros locales cerca de la entrada del canal. El número de Nusselt promedio en la placa es 1.802 mediante la solución elíptica y 1.9 mediante la solución parabólica.

Martín, *et al.*, (1991) presentaron el problema de la convección natural bidimensional a través de un canal vertical formado por placas paralelas isotérmicas, para números de Rayleigh pequeños ($0 < Ra \leq 0.5$), donde el flujo es completamente desarrollado y el número de Nusselt es directamente proporcional al número de Rayleigh. En el análisis no se consideró el efecto conductivo. Los resultados muestran las correlaciones generales para el número de Nusselt y los casos límite en que $Ra \rightarrow 0$ y $Ra \rightarrow \infty$.

Huang, *et al.*, (1995) realizaron un trabajo sobre el flujo por convección y la transferencia de calor en un canal vertical que es calentado; presentan los números Reynold y los Nusselt medidos en las placas paralelas del canal; Abu-Mulaweh *et al* dieron a conocer la medición y estimación de un flujo laminar por convección natural a su paso por una placa vertical, que es calentada uniformemente

y a temperatura constante. Exponen la velocidad del flujo en la capa límite y la distribución de la temperatura; Kawai *et al* presentaron los resultados de la convección natural y la transferencia de calor entre placas paralelas y verticales, cuando varían el espacio entre las placas para lograr el régimen de capa límite laminar. Por último, Sarma *et al* presentaron la convección natural laminar en un canal vertical con calentamiento periódico de un muro; los autores se enfocan al movimiento del volumen de aire. La solución se basa en series de Fourier, gobernado el fenómeno por la ecuación de momento; el flujo y la transferencia de calor son determinados para diferentes valores del número Grashof.

Mohamad (1996), presenta el estudio realizado a un calentador solar de aire en el cual intenta reducir las pérdidas de calor en el colector y maximizar el intercambio de calor del colector al aire. Emplea dos vidrios, uno como protección del ambiente y el otro para efecto invernadero. La eficiencia del colector resultó ser mayor que la de un colector normal en un 75 %. Aún cuando las ecuaciones que emplea para simular el prototipo experimental son en estado estacionario, considera para la variación del flujo una ecuación en función del tiempo.

Kabeel (1997), presenta un estudio en el cual observa el comportamiento del flujo de aire al variar el área transversal del plato absorbedor de calor. Empleó un plato cuya sección transversal es de forma rectangular y otro de forma triangular. Encontró que la temperatura del flujo de aire se incrementa en el plato con geometría triangular y es óptimo en valores de 50 a 60 grados. Emplea ecuaciones en estado estable.

Buzzoni *et al* (1998), realizaron un estudio aplicado a la convección natural en un Muro Trombe, pero empleando dos canales formados por el vidrio y una delgada placa de metal como colector. El modelo analítico empleado en estado transitorio es resuelto por el método de diferencias finitas y sus resultados son comparados con los obtenidos mediante la experimentación de otros autores, con aproximaciones satisfactorias.

Guohui Gan (1998), realizó un estudio de la ventilación natural en verano empleando un programa de computadora (de dinámica de fluidos) para la simulación del comportamiento del muro Trombe el cual corroboró con la similitud presentada con los resultados de otros modelos experimentales. Por medio del programa estudió el comportamiento del sistema al variar la distancia entre el vidrio y el muro, la altura del muro, tipo de vidrio y aislante del muro. En sus resultados menciona que conforme se aumenta la temperatura del muro, su altura y espesor, el flujo de aire de ventilación aumenta. En su modelo que esta en estado estable no contempla el almacenamiento de calor por considerarlo un valor despreciable.

Rodríguez *et al* (2000), tomando como base un calentador de aire montado en un muro vertical orientado al sur para ventilación de una escuela en Portugal, realizaron el estudio analítico para conocer el comportamiento del flujo de aire al variar la geometría de la placa almacenadora y las condiciones climáticas, considerando que el flujo de aire inducido es turbulento y bidimensional. El modelo empleado es para estado transitorio.

Khedari *et al* (2002), realizaron un estudio sobre la convección natural en un canal inclinado. Determinaron relaciones del número de Nusselt y Reynolds en función del número de Rayleigh y de la altura y ancho del canal ($((s/L)R_a \text{sen}30^\circ)$).

H. D. Ammari (2003), desarrollo un modelo analítico aplicado a un calentador solar de aire, en el cual, el flujo de aire circulaba por el interior de la placa almacenadora mediante canales. El modelo se encuentra en estado estacionario pero involucra algunas ecuaciones en estado transitorio. Estudió su comportamiento al incrementar la altura de la placa almacenadora, espacio entre placas (vidrio y almacenadora). Encontró que empleando una placa acanalada se obtenía un comportamiento térmico mas adecuado para la transferencia de calor con el aire.

2.2. Análisis de los antecedentes

No se han realizado estudios en los cuales se pueda observar el comportamiento del flujo de aire generado en el canal al variar su abertura de entrada del aire así como el de salida del canal, solo se presenta su comportamiento al variar las condiciones ambientales, forma de la sección transversal y materiales del elemento almacenador.

Han estudiado como se incrementa o disminuye la temperatura del aire a la salida del canal formada por el vidrio y el muro almacenador, al modificar las propiedades térmicas del elemento almacenador, pero no han evaluado como responde la temperatura del cuarto a climatizar al modificar estas propiedades.

En los modelos analíticos encontrados, se considera la temperatura del aire a la salida del canal pero no contemplan el comportamiento de la temperatura del aire en el interior de la edificación a ventilar (la consideran igual a la temperatura ambiental) y la mayoría ni el almacenamiento de calor que se tiene en la placa o muro. Este último lo desprecian por ser pequeño o consideran que el aire se lleva todo el calor de la placa.

Tampoco se ha establecido un potencial de ahorro de energía originado por el empleo de estos sistemas y sustitución de los sistemas de climatización artificial.