
INSTITUTO TECNOLÓGICO SUPERIOR DE MISANTLA

Evaluación térmica del block
utilizado en techos de la República
Mexicana

TESIS

Que para obtener el título de
Ingeniero electromecánico

Presenta

Thania Guadalupe Lima Téllez

Asesores

Dr. Jesús Perfecto Xamán Villaseñor

M.C. Joel Maurilio Morales García

Misantla, Ver.

Marzo 2017

DEDICATORIAS

Mi tesis la dedico con todo el amor y cariño.

*A mis padres que con tanto esfuerzo lograron que cumpliera mi sueño, **María de la luz Téllez Lizárraga** y **José Manuel Armenta y Hdez.** Por ser el pilar fundamental de todo lo que soy, en toda mi educación, tanto académica, como de la vida, por su incondicional apoyo a lo largo de mi vida, por darme una carrera universitaria para mi futuro.*

Todo lo que he logrado ha sido posible gracias a mis padres, ellos son mi fuente de inspiración y motivación para superarme día con día y así poder luchar para que la vida nos depare un futuro mejor.

*A mis hermanos **Salma Naomi**, **José Manuel** y **Cristian**. Aunque pareciera que siempre estamos en una batalla por cualquier cuestión, hay momentos en que la batalla cesa y nos unimos para lograr nuestros objetivos, ustedes son mi mano derecha, mis amigos y compañeros de este bonito viaje, si no estuvieran a mi lado mi vida sería completamente aburrida. Los motivo a mantener una visión de éxito en sus vidas mediante el esfuerzo y estudio continuo.*

*A mi tío **Alfonso Téllez Lizárraga** el hombre más fuerte y valiente que conozco, quien me ha enseñado que en esta vida no hay obstáculo que no se pueda superar, que las barreras que aparecen en la vida están ahí para saltarlas y no para frenarnos. Sin importar lo que pase me ha enseñado a valorar cada día que dios nos permite vivir y disfrutarlo como si fuera el ultimo. Y como dice el principito “solo con el corazón se puede ver bien; lo esencial es invisible a los ojos”.*

A mi familia en general, quisiera nombrarlos a cada uno de ustedes pero son muchos, pero eso no quiere decir que no me acuerde de cada uno, a todos los quiero mucho, ustedes han sido base de mi formación y han aportado grandes cosas a mi vida y me han ayudado a enfrentar la gran tarea de encarar a la sociedad.

“Lo que más deseo en esta vida, es ser el orgullo de mis padres y un buen ejemplo para mis hermanos “

AGRADECIMIENTOS

A mi madre **María de la luz Téllez Lizárraga** por siempre creer en mí y por apoyarme en todas mis decisiones, por alentarme a cumplir mis sueños sin importar que tan descabellados suenen. Eres una mujer que me hace llenar de orgullo, te amo y no va haber manera de devolverte todo lo que me das. Esta tesis es un logro más que llevo a cabo gracias a ti. Mis más sinceras gracias por la paciencia y amor que me has dado a lo largo de mi vida.

A mi padre **José Manuel Armenta y Hdez.** Por motivarme a estudiar una ingeniería, por los consejos que han sido gran ayuda para mi vida y crecimiento. Esta tesis es el resultado de lo que has enseñado en la vida ya que siempre has sido una persona honesta, entregada tu trabajo y un gran líder. Gracias por todo el sacrificio que ha implicado que cumpla mis sueños, por confiar en mí y darme la oportunidad de culminar esta etapa de mi vida.

A mi hermana **Salma Naomi** por ser mi mejor amiga y confidente, por tenerme paciencia y soportar mi carácter de hermana mayor. Gracias por todos los dibujos que me ayudaste a realizar a lo largo de mi carrera. Te amo Perry, mejor hermana dios no pudo haberme dado.

A mi hermano **José Manuel** por ser mi amigo y compañero de esta vida, gracias por alegrarme incluso en días difíciles, tus ocurrencias siempre me hacen reír. Gracias por tu apoyo en todo el desarrollo de mi carrera. Te amo ebe, nunca dejes de luchar por tus sueños.

A mi hermano **Cristian**, por ser parte importante de mi vida, porque gracias a ti tuve una infancia divertida y nunca me sentí sola. Nuestros padres nos hicieron hermanos y nosotros nos volvimos amigos. Te amo cris , nunca dejes de superarte.

Al Dr. **Jesús Perfecto Xamán Villaseñor**, por permitirme ser parte de su equipo a lo largo de mi estancia, por darse un espacio para asesórame en el desarrollo de mi tesis, por su conocimiento impartido y por darme la oportunidad de trabajar con él.

Al M.C **Joel Maurilo Morales García** por sus consejos para seguir estudiando, por su conocimiento impartido, por sus comentarios y orientación brindado en el desarrollo de mi tesis.

Al M.C **Vladimir Zagoya Juárez** por orientarme a realizar mi estancia en el CENIDET, por su conocimiento impartido, gracias por hacer sus clases tan amenas y por motivarme a seguir estudiando.

A todo el equipo del laboratorio de simulación numérica del CENIDET, por su ayuda en todo el desarrollo de este proyecto y por hacer tan agradable mi estancia.

RESUMEN

En este trabajo se realizó la evaluación del comportamiento térmico de un block con dimensiones de $40 \times 15 \text{ cm}^2$ y con dos huecos de $16 \times 10 \text{ cm}^2$, utilizado como componente de techos bajo condiciones climáticas de la ciudad de Mérida, Yucatán. La evaluación se realizó para el día más cálido y para el día más frío del año, se modelaron seis configuraciones distintas haciendo uso de películas reflectivas blanca, negra y aislamiento térmico. De las seis configuraciones se tomó una como referencia, la configuración que representa un techo convencional de la República Mexicana.

En el estudio se consideró convección dentro de los huecos y conducción en las partes sólidas del block. Las paredes verticales se consideraron adiabáticas, la pared superior se consideró transferencia de calor por convección y radiación, mientras que para la pared inferior se consideraron pérdidas por convección.

Adicionalmente, dentro de las actividades desarrolladas para lograr la comprensión del fenómeno de estudio, se analizaron las ecuaciones de conservación y se realizó un análisis dimensional del cual se obtuvo el número Nusselt, el número Reynolds, el número de Grashof y el número de Prandtl.

De la evaluación térmica del block se obtuvo que las configuraciones en las cuales se utilizó película negra mostraban un incremento de flujo de calor y de temperatura superficial al interior, mientras que las configuraciones con película blanca tienen un comportamiento contrario con una reducción de flujo de calor y de temperatura al interior en un día cálido. Por lo que se puede concluir, que al realizar el estudio para la ciudad de Mérida, Yucatán donde se presentan altas temperaturas la mayoría del año y lo que se busca es una reducción de flujo de calor al interior de una vivienda, la configuración más adecuada para este tipo de clima resulto la configuración que utiliza película blanca y aislamiento térmico.

ABSTRACT

In this work the evaluation of the thermal behavior of a block with dimensions of $40 \times 15 \text{ cm}^2$ and with two holes of $16 \times 10 \text{ cm}^2$, used as a component of roofs under climatic conditions of the city of Merida, Yucatan. The evaluation was performed for the warmest day and for the coldest day of the year, six different configurations were modeled, making use of reflective films white, black and thermal insulation. Of the six configurations one was taken as reference, the configuration that represents a conventional roof of the Mexican Republic.

In the study, convection was considered inside the holes and conduction in the solid parts of the block. Vertical walls were considered adiabatic, the top wall was considered convection heat transfer and radiation, while for the bottom wall were considered convection losses.

Additionally, within the activities developed to achieve the understanding of the phenomenon of study, the conservation equations were analyzed and a dimensional analysis from which the Nusselt number, the Reynolds number, the Grashof number and the Prandtl number were obtained.

From the thermal evaluation of the block it was obtained that the configurations in which black film was used showed an increase of heat flow and surface temperature of the interior, while the white film configurations have opposite behavior with a reduction of heat flow and indoor temperature on a warm day. From what can be concluded, that when doing the study for the city of Mérida, Yucatán where high temperatures occur most of the year, and what is sought is a reduction of heat flow into a house, the configuration most suitable for this type of climate resulted the configuration using white film and thermal insulation.

ÍNDICE

DEDICATORIAS.....	III
AGRADECIMIENTOS.....	IV
RESUMEN	V
ABSTRACT	VI
CAPÍTULO 1. ESTADO DEL ARTE.....	1
1.1 INTRODUCCIÓN.....	2
1.1.2 Antecedentes	6
1.3 PROBLEMA A RESOLVER.....	9
1.4 OBJETIVOS.....	9
1.4.1 Objetivo general.....	9
1.4.2 Objetivos específicos	9
1.5 JUSTIFICACIÓN	10
1.6 ALCANCE	10
1.7 ESCRITURA DE LA TESIS	10
1.8 FUNDAMENTOS TEÓRICOS.....	11
1.8.1 Termodinámica	11
1.8.1.1 Sistema termodinámico	11
1.8.1.3 Paredes diatérmicas.	11
1.8.2 Mecánica de fluidos	12
1.8.3 Transferencia de calor	12
1.8.4 Radiación solar	14
1.8.5 Arquitectura bioclimática.....	15
1.8.6 Dinámica de fluidos computacionales	17
1.8.7 Ecuación general convección-difusión	22
1.8.8 Condición inicial y de frontera.....	22
CAPÍTULO 2. MODELO FÍSICO Y MODELO MATEMÁTICO DE UN BLOCK HUECO	24
2.1 MODELO FÍSICO.....	25
2.1.1 Modelo físico de un block de dos huecos con loza (B-L-G).....	27

2.1.2 Modelo físico de un block de dos huecos con loza y película reflectiva blanca o negra (B-L-B/W).....	28
2.1.3 Modelo físico de un block de dos huecos con aislante térmico y loza (B-A-L). ..	28
2.1.4 Modelo físico de un block de dos huecos con aislante térmico, loza y película reflectiva negra o blanca (B-A-L-B/W).....	29
2.2 CONSIDERACIONES.....	30
2.3 MODELO MATEMÁTICO	31
CAPÍTULO 3. ANALISIS DIMENSIONAL Y ECUACIONES DE CONSERVACIÓN	32
3.1 ANÁLISIS DIMENSIONAL.....	33
3.1.1 Análisis dimensional	33
3.2 ECUACIONES DE CONSERVACIÓN.....	37
3.2.1 Ecuación de masa.....	37
3.2.2 Ecuación de conservación de momento	41
3.2.3 Ecuación de conservación de la energía	44
CAPÍTULO 4. FAMILIARIZACIÓN CON EL COMPILADOR FORTRAN Y COMPILACIÓN DE CODIGOS.....	49
4.1 FAMILIARIZACIÓN CON EL COMPILADOR FORTRAN Y EL VISUALIZADOR TECPLOT.....	50
4.2 COMPILACIÓN DE CÓDIGOS COMPUTACIONALES PARA LA TRANSFERENCIA DE CALOR EN UN BLOCK PARA CLIMA CÁLIDO.....	53
4.3 ELABORACIÓN DE GRÁFICOS DE LOS RESULTADOS OBTENIDOS DEL PROBLEMA DE TRANSFERENCIA DE CALOR CONJUGADA EN UN BLOCK PARA CLIMA CÁLIDO DE MÉXICO.....	55
CAPÍTULO 5. RESULTADOS.....	57
5.1 PARÁMETROS DE ESTUDIO.....	58
5.2 COMPORTAMIENTO TERMICO DEL BLOCK CON DOS HUECOS.....	60
5.2.1 Día cálido	60
5.2.2 Día frío.....	68
5.3 RESUMEN Y COMPARACIÓN DE RESULTADOS	77
CAPÍTULO 6. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.....	79
6.1 CONCLUSIONES.....	79
6.2 RECOMENDACIONES	80
FUENTES DE INFORMACIÓN	81

CAPÍTULO 1. ESTADO DEL ARTE

En este capítulo se presenta el problema a resolver así como la importancia que tiene el tema tanto en aspectos sociales como ecológicos, posteriormente se presenta la revisión bibliográfica realizada con respecto al presente proyecto de investigación. Adicionalmente se presentan los objetivos por los cuales se pretende realizar este trabajo así como el alcance esperado al concluir la realización del proyecto.

Finalmente se presentan los fundamentos teóricos que hacen referencia al proyecto.

1.1 INTRODUCCIÓN

El hombre desde siempre ha buscado la manera de refugiarse, ya sea de la lluvia o del sol, sea del calor o del frío y por eso uno de sus primeros refugios fue la cueva, conforme paso el tiempo el hombre comenzó a edificar sus propias viviendas buscando el mayor confort térmico.

Las características de una vivienda dependen de muchos factores como son el clima, materiales disponibles y técnicas de construcción. El clima es parte del medio ambiente y afecta la refrigeración y(o) calefacción al interior de la vivienda y por lo tanto también afecta el comportamiento y el nivel de confort de sus habitantes. Debido a ello el hombre comenzó a desarrollar sistemas para calentar, enfriar, ventilar sus viviendas y edificios sin importar las grandes cantidades de energía que estos sistemas pueden llegar a consumir. Como consecuencia de este derroche de energía y uso de combustibles fósiles se está produciendo el cambio climático global de nuestro planeta. El cambio climático es un problema que enfrenta la vida actual ya que eleva la temperatura de nuestro planeta y por más pequeña que sea, el cambio en la temperatura altera la frecuencia de fenómenos climatológicos y hace más devastadores los desastres naturales también daña comunidades y ecosistemas desequilibrando la vida actual en la tierra. Se podría decir que el cambio climático en nuestro planeta es un proceso normal pero el problema es que este se ha desarrollado rápidamente por la acumulación de gases de efecto invernadero en la atmósfera, y estos son emitidos debido a las necesidades de las actividades humanas.

El tema de gases de efecto invernadero se refiere a un conjunto de gases que atrapan el calor e impiden su salida al espacio exterior, estos gases transmiten el calor a la atmósfera y esto provoca que incremente la temperatura, mientras mayor sea la cantidad de gases en la atmósfera, mayor es la energía que estos son capaces de atrapar ocasionando mayor cantidad de calor en el planeta. Los distintos gases de los que estamos hablando son: Dióxido de carbono (CO_2), metano(CH_4), óxido nitroso(N_2O), vapor de agua (H_2O), ozono (O_3) entre otros clorofluorocarbonos (CFC) y otros compuestos colorados.

Dióxido de carbono, es el más importante y más conocido de los gases mencionados anteriormente, es el que más contribuye al efecto invernadero ya que es responsable del 60% del efecto invernadero, en los países industrializados llega a más del 80%, este es producido por uso de combustibles fósiles (petróleo, el gas, carbón entre otros) y por el cambio de uso de la tierra (deforestación) (Díaz, 2014).

Existen diversas opciones para disminuir las emisiones de los gases de efecto invernadero sin dejar de cubrir la demanda de servicios energéticos, como alternativa está el remplazo de los combustibles fósiles, el uso de las energías renovables.

Las energías renovables se producen de manera continua y son inagotables a una escala humana, y como lo dice su nombre estas se renuevan continuamente, al contrario los combustibles fósiles que son agotables ya que existen determinadas cantidades de ellos. Las energías renovables si se utilizan de manera adecuada pueden aportar múltiples beneficios como contribuir al desarrollo social y económico, favorecer el acceso a la energía, reducir las emisiones de gases de efecto invernadero. Lo que se busca con las energías renovables es eliminar la dependencia del uso de los combustibles fósiles. Las principales formas de energía renovables son: energía solar, hidráulica, geotérmica, eólica, y las energías procedentes del mar (Schallenberg, et al., 2008).

En particular, la energía solar térmica consiste en el aprovechamiento de la energía que procede del sol para transferirla a un fluido que generalmente es agua o aire, una de las aplicaciones de la energía solar térmica es la capacidad de generar energía eléctrica y existen dos sistemas para producirla, el de alta concentración y el de baja concentración. El de baja concentración se puede encontrar en colectores solares que se instalan en los tejados de las casas, estos pueden cubrir necesidades básicas como calentar agua o dotar calefacción a las habitaciones. En los sistemas de alta concentración se encuentra las grandes plantas solares termoeléctricas, el funcionamiento de esta es similar al de una central térmica pero con la diferencia de que en vez de utilizar carbón o gas, utiliza energía solar.

La energía hidráulica es producida en una central hidroeléctrica que genera electricidad haciendo uso de la energía potencial del agua embalsada en una presa situada a más alto nivel que la central. Esta es una fuente de energía limpia, sin residuos y fácil de almacenar.

La energía geotérmica se produce por el calor interno de la tierra se concentra en el subsuelo en lugares conocidos como reservas geotermales, puede producir energía limpia de forma indefinida, esta energía se puede aprovechar de manera directa para calefacción de hogares, para secar madera, para deshidratar vegetales y de manera indirecta puede usarse para generar electricidad, generalmente la fuerza del vapor se usa para mover una turbina capaz de mover un generador eléctrico.

La energía eólica es la energía que se obtiene del viento, consiste en convertir la energía que produce el movimiento de las palas de un aerogenerador impulsadas por el viento en energía eléctrica este es uno de los recursos energéticos más antiguos explotados por el ser humano. Esta energía no emite sustancias tóxicas ni contaminantes al aire.

Energía del mar o energía marina es aquella que viene transportada por las olas del mar por las mareas o por la diferencia de temperatura que existe entre las distintas capas del mar, el movimiento del agua almacena energía cinética que permite la generación de

electricidad. El movimiento del agua es constante e inagotable por eso se considera esta energía renovable sea inagotable.

En nuestro país aproximadamente el 30% del total de consumo de energía eléctrica corresponde a los sectores residencial, comercial y de servicios esto es a lo que se le conoce como energía en edificaciones. Hoy en día las edificaciones aportan aproximadamente la tercera parte de las emisiones totales de gases de efecto invernadero y al ser tan alto el gasto energético la intención es que la construcción de nuevas edificaciones utilice los recursos naturales de forma racional, aprovechen la energía solar, disminuyan el consumo de agua y reduzcan el consumo de energía eléctrica. En otras palabras la intención es lograr la eficiencia energética en edificaciones haciendo uso de la arquitectura bioclimática. (Rojas, et al. 2010; Cortes, 2008).

La arquitectura bioclimática acondiciona una edificación con el fin de obtener el máximo confort térmico utilizando al mínimo las energías no renovables, donde el sol es la principal fuente de energía.

En México se sufre cada vez más los efectos del calentamiento global y es algo inevitable no se puede solucionar al 100% pero si buscar la manera que estos efectos no se sigan desarrollando tan rápido y o disminuir los efectos mediante el uso de energías renovables. Por todo lo antes mencionado esta investigación desempeña un papel importante en el estudio del ahorro de energéticos, como son la electricidad que se utiliza en climatización artificial utilizada en las edificaciones residenciales ya sea de calefacción o aire acondicionado.

Las edificaciones se componen de muros y techos, estos son contruidos de distintos materiales, los muros pueden ser de madera, metal, ladrillo, aunque existen paredes más modernas que mejoran la eficiencia y el nivel de confort. Los techos pueden estar contruidos también de distintos materiales como son tejas de asfalto, madera, metal, goma, de concreto y arcilla. En los materiales utilizados en techos podemos encontrar el block hueco que se caracteriza por proporcionar aislante térmico, debido a que cuentan con cavidades de aire dentro de ellos que ayudan a disipar el calor.

El techo es un conjunto de elementos que conforman la parte superior de una edificación, es quien la cubre y la cierra, por esta razón es un componente esencial de la edificación que protegerá al resto de los elementos, debido a esto el techo queda más expuesto a los efectos climáticos como la radiación solar, la lluvia o la nieve.

Los techos se calientan al absorber la luz solar, por lo que en techos oscuros pueden llegar a calentarse mucho. En climas cálidos un techo puede aportar hasta 50% de la carga

térmica y en climas fríos sirve como vía para la pérdida de calor. Cuando se habla de la carga térmica nos referimos a la cantidad de calor que debe ser extraída de un sitio que se va a refrigerar para reducir o mantener una temperatura deseada.

Los techos se pueden clasificar de la siguiente manera:

Techo de chapa (lámina), es un material muy ligero que puede ser manejado fácilmente y esto hace que su colocación sea realizada en poco tiempo, la desventaja que tiene este tipo de material no es muy buen aislador a la temperatura, y esto hace que en verano pueda hacer mucho calor y en invierno mucho frío, otra desventaja que se puede mencionar es que al ser muy liviano este material los vientos fuertes pueden llegar a volarlas si no se colocan correctamente.

Techo prefabricado, estos están hechos para que se puedan colocar manualmente, se caracterizan por ser muy livianos llegan a pesar de 30 kilos, lo cual permite que sean colocados de manera rápida y su transporte es fácil, es un techo muy económico.

Techo de teja, este tipo de techo puede ser de distintos materiales como son cobre, vidrio, metal, hormigón entre otros, puede llegar a ser muy caro, sin embargo, es mucho más resistente y es buen aislante térmico ya que en invierno retiene el calor y en verano mantiene los ambientes frescos.

Falsos techos, estos techos son utilizados para tapar techos viejos que ya se encuentren arruinados, están contruidos de placas y redes metálicas.

Techo catedral, estos están unidos a las vigas y a la parte de arriba de la casa, normalmente suelen tener problemas con el tema del aislamiento.

Cobertizo, son muy parecidos a los techos de catedral, pero su ángulo de inclinación es menor, este permite una buena ventilación y aislamiento porque es construido como un ático.

Coves, estos techos normalmente se colocan en casas muy lujosas ya que es muy caro, en la parte donde se une el techo con las paredes tiene una terminación redonda tipo cóncava.

Abovedado, estos techos son amplios ya que desde las paredes hasta el techo se forma un arco gracias a unas vigas que son espaciales para este tipo de techos.

Existen tecnologías que pertenecen a la arquitectura bioclimática y al utilizarlas en los distintos techos pueden contribuir a reducir la ganancia de calor dentro de la vivienda, entre esas tecnologías podemos mencionar algunas como son los techos aislados, techos inundados, techos verdes y techos reflejantes. Los techos reflejantes o también conocidos

como techos frescos, tienen un recubrimiento reflejante en la superficie exterior, reflejando así la radiación solar y conservando la superficie del techo más fresca.

Los techos reflejantes son una tecnología nueva por lo tanto hay muy poca información y la mayoría de estudios se han realizado en Estados Unidos, en la revisión bibliográfica se mostraron algunos estudios que ya se han realizado sobre el tema. Hay mucho campo de estudio que explorar sobre este tema por lo cual en este presente trabajo se realizara una evaluación térmica a un techo compuesto de block utilizando la tecnología antes mencionada (recubrimiento o película reflejante).

A continuación se presentan las fichas técnicas que se realizaron de la revisión bibliográfica.

1.1.2 Antecedentes

En esta sección se presenta la revisión bibliográfica de trabajos relacionados con la transferencia de calor en techos de edificaciones compuestos por blocks huecos.

Al-Hazmy. (2005), estudió la transferencia de calor considerando la convección y conducción a través de ladrillos de construcción huecos, para evaluar la configuración adecuada de aislamiento del ladrillo a temperaturas de Arabia Saudita. Se consideraron tres diferentes configuraciones para el ladrillo de construcción. En la primera configuración se considera un ladrillo completamente sólido sin huecos. La segunda configuración representa el caso extremo en el que se desvanece la parte sólida del material quedando tres huecos en su interior. Mientras que en el tercer caso los huecos se llenan parcialmente con material aislante de poliestireno. Considerando la aproximación de Boussinesq se resuelven las ecuaciones gobernantes de masa, momento y energía mediante el software de CFD FLUENT. Entre los resultados, al comparar el tercer caso con respecto al primero y al segundo, se reduce la velocidad de transferencia de calor en 26 y 6% respectivamente. El efecto intercelular de la convección natural demuestra ser un efecto significativo que no puede ser ignorado cuando se considera la resistencia térmica de estructuras de construcción huecas. Para la modelación de un día caluroso típico de verano, el uso de barras sólidas de poliestireno reduce la transferencia de calor en 25% en techos de edificaciones compuestos por blocks huecos.

Baig y Antar (2008), realizaron un estudio numérico para calcular la pérdida de calor (valor de R) en un block con huecos para diferente número de huecos llenados con aire y distintos diseños de cavidades. Se utilizaron 5 distintas configuraciones, variando la posición de los huecos, distancia, tamaño y razón de aspecto entre ellos. El valor de R del caso 1 (modelo base) es de $0.47 \text{ K m}^2 / \text{W}$, al compararlo con el caso 2 se observa un decremento en la transferencia de calor del 13.5% y de 17.65% con respecto al caso 3. Incrementar el

número de cavidades es efectivo para reducir el flujo de calor sin comprometer su resistencia estructural. Debido a que los diseños no son reportados en la literatura abierta, los resultados numéricos son validados calculando el número de Nusselt utilizando los diseños de otros investigadores. Disminuyendo el espesor del material sólido, decrece el puente térmico y se evita pérdidas por conducción innecesarias, además utilizando huecos de una alta razón de aspecto (caso 3 contra caso 2) y menor ancho provoca una disminución de la transferencia de calor por convección.

Zukowski y Hease (2010), realizaron un estudio numérico-experimental para estudiar blocks huecos llenados con perlita como aislante. Se analizó un block de 24.8cm x 30 cm con 12 huecos rectangulares. El estudio se realizó mediante un aparato experimental para obtener el calor específico, conductividad térmica y densidad del block para tres distintas temperaturas, evaluado en intervalos de 60s; posteriormente con la información obtenida del estudio experimental se simuló en el software Fluent. Los resultados obtenidos del modelo experimental y el modelo numérico son similares con diferencias relativamente pequeñas de menos de 0.5°C; al comparar el valor de la conductividad térmica del block sólido (0.410 W/mK) con el block con perlita (0.046 W/mK) se observaron mejores resultados. Se obtuvieron datos básicos para poder simular el block hueco llenado con perlita como aislante, el block llenado con perlita es hasta 50% más ligero que el block sólido.

Oluwde et al. (2012), estudiaron la conducción de calor a través de ladrillos de construcción convencionales y entrelazados ambos con cavidades, se tomó la ubicación de las cavidades como ordenadas y escalonadas. Para el análisis de la transferencia de calor por conducción se desarrolló un algoritmo MATLAB. Las cavidades fueron asumidas en vacío, es decir no hubo transferencia de calor dentro de ellas y los ladrillos fueron sometidos a una temperatura ambiente de 40°C para estudiar la variación de temperatura desde el exterior al interior. Para el caso de los ladrillos con cavidades ordenadas se obtuvo que, con dos agujeros la temperatura había reducido de 40 a 26.22°C en un ladrillo convencional y en un ladrillo entrelazado la temperatura se redujo a 26.88°C. Con cuatro agujeros la temperatura se redujo aún más, 25.43°C para un ladrillo convencional y 25.3 °C para un ladrillo entrelazado. Con un arreglo de 8 agujeros no se mostró aumento apreciable en la resistencia térmica. Para el caso de ladrillos con cavidades escalonadas se observó que, con cuatro cavidades en un ladrillo entrelazado se redujo la temperatura a 25°C pero para un ladrillo convencional la temperatura fue de 25.45°C. Como conclusión, se obtuvo que incrementar el número de cavidades hasta cuatro es favorable ya que disminuye el flujo de calor dentro de un edificio, por lo tanto el aislamiento térmico mejora. Por otro lado, incrementar a ocho agujeros no es muy favorable ya que el aumento de la resistencia

térmica es mínimo además un arreglo de ocho agujeros puede poner en peligro la resistencia mecánica del ladrillo.

A.K. Sharma et. al. (2013), estudiaron la factibilidad de los cálculos de 1-D y 2-D para la transferencia de calor por conducción en una losa con insertos de diferentes materiales tales como espuma, estera de goma, materiales granulares y cerámica. Se usó estos materiales con el fin de aumentar la resistencia a la transferencia de calor. Realizaron una comparación entre los enfoques de 1-D y 2-D para cuantificar el porcentaje de error en los cálculos en las losas compuestas de diferentes formas de inserción, las formas y tamaño de la inserción varían según la aplicación. Para el estudio se consideraron 5 formas geométricas (cuadrado, diamante, círculo, hexágono1 y hexágono2 (con diferente orientación)). Para el análisis unidimensional se basaron en la ley de Fourier, y calcularon la conducción de calor, suponiendo el flujo de calor solo a lo largo de una dirección particular a través de cada una de las geometrías y obtuvieron expresiones en estado permanente para cada una de ellas. De este análisis se obtuvo que para todas las formas la transferencia de calor disminuye con el aumento de volumen de la intrusión y se encontró el siguiente orden. Diamante < hexágono2 < círculo < hexágono1 < cuadrado. El círculo, hexágono, y hexágono2 permitieron casi la misma transferencia de calor. Para el análisis de dos dimensiones el cálculo lo realizaron utilizando FLUENT 6.3. En este cálculo se encontró casi la misma transferencia de calor para todas las formas excepto el diamante, de este se obtuvo que ofrece la máxima resistencia térmica. Al comparar los dos enfoques, se propuso que el enfoque 1-D ofrece una predicción satisfactoria hasta que la fracción de volumen de la intrusión siga siendo menos que el 20% para las inserciones hexagonales y circulares.

Ait-Taleb et al. (2014) realizaron un estudio numérico de la transferencia de calor conjugada (conducción, radiación y convección) en un bloque hueco con seis cavidades, dos en dirección vertical y tres en dirección horizontal, se consideraron dos situaciones: calentamiento desde arriba y desde abajo, las paredes laterales verticales del extremo de la estructura se tomaron como adiabáticas. Para el estudio se utilizó la aproximación de Boussinesq y el transporte convectivo se consideró en régimen laminar y en dos dimensiones para todo el intervalo de parámetros considerados. El modelo matemático se resolvió mediante la técnica de diferencia finita basada en el enfoque de volumen de control y se usó el algoritmo SIMPLE para el acople de las ecuaciones de masa y momento. Las dos situaciones se compararon con un estudio anterior que realizaron Abdelbaki and Zrikem (Abdelbaki, Zrikem, 1999) a un block hueco con una celda de aire en la dirección vertical. La situación de calentamiento desde abajo para $\Delta T = 20^\circ\text{C}$ tuvo un comportamiento pseudo-lineal de flujo de calor y el flujo de calor fue inferior a la encontrada en el estudio

(Abdelbaki, Zrikem, 1999), el valor de la conductancia determinado para este caso fue de $U'_{b2} = 2.478 W m^{-2} k^{-1}$ en comparación con el de una sola celda que fue de $U'_{b1} = 4.115 W m^{-2} k^{-1}$. Para el caso de calentamiento desde arriba para $\Delta T = 20^\circ C$, la transferencia de calor es casi lineal y se realiza principalmente por conducción y radiación, su conductancia térmica es de $U'_{a2} = 2.437 W m^{-2} k^{-1}$ en comparación con el caso del block de una sola celda que fue de $U'_{a1} = 3.92 W m^{-2} k^{-1}$. Con base en los resultados, los autores encontraron que es mejor el bloque hueco con dos celdas de aire, ya que permite una reducción considerable de la transferencia de calor.

Conclusión de la revisión bibliográfica

De acuerdo a la revisión bibliográfica de los estudios realizados, se observó que se han realizado diversos estudios en blocks huecos utilizados como componentes de techos, considerando distintos aspectos como el llenado de los huecos con materiales aislantes, la forma en que se une un block con otro block, el comportamiento higrotérmico, considerando condiciones de frontera, propiedades termofísicas, considerando la configuración de las cavidades y comparación de diferencias entre resultados del análisis en 1D y el análisis en 2D.

En los trabajos realizados en la literatura se analizan problemas resueltos de manera experimental, de manera teórica e incluso se han desarrollado códigos para la solución.

1.3 PROBLEMA A RESOLVER

El problema que se presenta en las edificaciones es la búsqueda de confort térmico y el fin de este proyecto es brindar una alternativa que use la arquitectura bioclimática para proporcionar confort térmico sin utilizar equipos de acondicionamiento ya que el uso de estos aparatos genera emisiones de CO_2 que contribuyen al calentamiento global.

1.4 OBJETIVOS

1.4.1 Objetivo general

Evaluar la transferencia de calor del Block usado en techos de edificaciones, considerando condiciones de clima de la República Mexicana.

1.4.2 Objetivos específicos

1. Plantear un modelo físico y hacer un análisis adimensional
2. Plantear las ecuaciones gobernantes del modelo físico (modelo matemático)
3. Seleccionar un clima cálido representativo de la República Mexicana
4. Compilación de códigos computacionales para la transferencia de calor en un block.
5. Realizar gráficos de resultados obtenidos del problema de transferencia de calor conjugada en un block.
6. Obtener relaciones para los parámetros de la evaluación térmica

1.5 JUSTIFICACIÓN

Actualmente las edificaciones representan el sector que más energía consume, como resultado las edificaciones generan un tercio de las emisiones de CO_2 en el planeta. Uno de los mayores causantes del gran consumo energético son los equipos de climatización utilizados para el acondicionamiento de espacios, por lo tanto se debe conservar y racionalizar el uso de la energía en edificaciones, por un lado con el aumento de la eficiencia de los equipos de climatización y por otro lado es con las mejoras en el diseño y la implementación de diferentes medidas en las edificaciones.

El techo es el componente más expuesto a los efectos climáticos y en climas cálidos, este puede contribuir hasta con un 50% de la carga térmica ya que la superficie exterior del techo expuesta a fluctuaciones más grandes de temperatura dependiendo de su material con el que esté construido, que para nuestro caso realizaremos la evaluación térmica del Block como componente de un techo con y sin película reflectiva para posteriormente realizar gráficos de resultados del problema de transferencia de calor.

1.6 ALCANCE

Evaluación térmica de un block para techos con condiciones de un clima representativo de la República Mexicana. Los fenómenos considerados para la evaluación serán de convección y conducción en dos dimensiones.

Se seleccionara un clima representativo de la República Mexicana para dos días característicos del año. Se realizara el estudio paramétrico con la condición climatológica seleccionada, dimensión del block, tipo de recubrimientos y aislante. Finalmente, mediante fluxes de calor y temperatura se llevará acabo el análisis para realizar una propuesta de techo.

1.7 ESCRITURA DE LA TESIS

En el capítulo 2 de este trabajo se presenta el modelo físico de block ya que es necesario describir el tipo de block que será analizado ya que existen muchos en el mercado. En el modelo físico se describe la transferencia de calor conjugada que se presenta en el fenómeno, así como las consideraciones que se tomaron para este estudio. Dentro de este capítulo también se describe el modelo matemático que son las ecuaciones diferenciales parciales que gobiernan el modelo analizar y las condiciones de frontera para el block de dos huecos. En el capítulo 3, se presenta el análisis dimensional realizado donde se identifican los números dimensionales que interfieren en el fenómeno, así también se presenta un análisis a las ecuaciones de conservación de masa, momento y energía. Para poder realizar este trabajo de investigación fue necesario realizar compilación de códigos computacionales por lo cual en el capítulo 4 se describe la familiarización con el compilador FORTRAN así como la descripción de la compilación de los códigos utilizados, por último

se describe la elaboración de gráficos de temperatura y flujos de calor. En el capítulo 5 se realiza el análisis y discusión de los resultados mediante gráficas y tablas. Al analizar los resultados, en el capítulo 6 se describen las conclusiones a las que se llegó en cuanto al uso del block con dos huecos, el efecto de películas reflectivas y aislamiento térmico utilizados en techos de la República Mexicana.

1.8 FUNDAMENTOS TEÓRICOS

Esta sección, que se desarrolla a continuación, permite conocer las terminologías que hacen referencia al proyecto, se definen cada uno de los términos con el fin de tener mejor entendimiento del desarrollo de este trabajo de investigación.

Primero se definen conceptos generales de Termodinámica, Mecánica de fluidos y Transferencia de calor.

Posteriormente se definen conceptos específicos que hacen referencia al proyecto.

1.8.1 Termodinámica

La termodinámica es una herramienta que interpreta fenómenos naturales desde el punto de vista de las relaciones de materia y energía. La termodinámica estudia el intercambio de energía en sus distintas formas, la energía se puede considerar como la capacidad de causar cambios. La termodinámica también estudia la interacción con los equipos, las propiedades de la materia y el uso racional de la energía.

1.8.1.1 Sistema termodinámico.

Se llama sistema termodinámico a la región del universo separada del entorno por una superficie cerrada, real o imaginaria, a través de la que se relaciona mediante intercambios de materia o energía, la región que separa al sistema del resto del universo físico se le conoce como frontera, la frontera está constituida por las paredes del recipiente que contiene al sistema o su superficie exterior, aunque también la frontera de un sistema puede ser representada por alguna condición matemática.

1.8.1.2 Paredes adiabáticas.

Las paredes adiabáticas son aquellas que no permiten que en un sistema exista ganancia o pérdida de calor. Como ejemplo se puede mencionar a los aislantes térmicos.

1.8.1.3 Paredes diatérmicas.

Las paredes diatérmicas son aquellas que permiten que en un sistema exista ganancia o pérdida de calor. Como ejemplo se puede mencionar a los metales.

1.8.1.4 Sistema abierto.

Un sistema abierto es aquel en el cual existen intercambios de materia o de energía con sus alrededores.

1.8.1.5 Sistema aislado.

Un sistema aislado es aquel que no puede tener ninguna interacción ya sea energía o materia con sus alrededores.

1.8.1.6 Sistema cerrado.

Un sistema cerrado es aquel que tiene paredes impermeables al paso de la materia, esto quiere decir que no intercambia materia con sus alrededores.

1.8.2 Mecánica de fluidos

La mecánica de fluidos es la ciencia que estudia el comportamiento de los fluidos ya sea en reposo o en movimiento, cuando se habla de fluidos estos pueden ser líquidos o gases. El conocimiento y la comprensión de los principios y conceptos básicos de la Mecánica de Fluidos son esenciales para analizar cualquier sistema en el cual un fluido sea el medio de trabajo.

1.8.2.1 Fluido.

Un fluido se define como una sustancia que cambia de forma de manera instantánea, ante un esfuerzo de corte por mínimo que este sea, un esfuerzo de corte se define como la fuerza por unidad de área o tensión. Un fluido tiene dos propiedades importantes que es necesario diferenciar, la masa y el peso. Masa es la propiedad de un cuerpo de fluido que se mide por su inercia o resistencia a un cambio de movimiento, es una medida de la cantidad de fluido y el peso es la cantidad que pesa un cuerpo es decir la fuerza con la que el cuerpo es atraído hacia la tierra debido a la acción de la gravedad.

Otras propiedades del fluido son la densidad y el peso específico, la densidad se define como la cantidad de masa por unidad de volumen de una sustancia y el peso específico como la cantidad de peso por unidad de volumen de una sustancia. La propiedad de un fluido que ofrece resistencia al movimiento relativo de sus moléculas es la viscosidad.

1.8.2.2 Fluido newtoniano.

Un fluido newtoniano es un fluido cuya viscosidad puede considerarse constante en el tiempo y al aplicarle una fuerza de corte, la tasa de deformación es directamente proporcional a la fuerza aplicada.

1.8.2.3 Fluido no newtoniano.

Un fluido newtoniano es a aquel cuya viscosidad varía con la temperatura y presión, pero no con la variación de velocidad. En un fluido no newtoniano, el esfuerzo de corte no es proporcional a la deformación.

1.8.3 Transferencia de calor

La transferencia de calor es aquella ciencia que predice el intercambio de energía entre cuerpos materiales, como resultado de una diferencia de temperaturas, la energía se transfiere de la región de mayor temperatura a la de menor temperatura. El concepto de

temperatura se define como una medida de calor de un cuerpo. La transferencia de calor también trata de predecir la velocidad a la que se realiza este intercambio de energía bajo ciertas condiciones. El calor se define como la energía cinética que tienen en total los átomos o moléculas de una sustancia o cuerpo.

Existen 3 formas de transferencia de calor, las cuales son conducción, convección y radiación, observar figura 1.1.

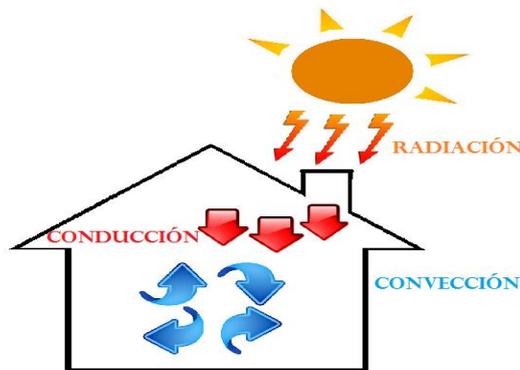


Figura 1.1 Mecanismos de transferencia de calor.

1.8.3.1 Conducción

La conducción de calor es el mecanismo de transferencia de calor que existe entre dos cuerpos sólidos que están en contacto directo y se encuentran a distintas temperaturas. A la capacidad en la que un cuerpo sólido puede transferir el calor se le conoce como conductividad térmica.

1.8.3.2 Convección.

La convección es el mecanismo de transferencia de calor que existe entre un fluido y un sólido siempre y cuando exista diferencia de temperaturas, el fluido puede ser un gas o un líquido. Si el intercambio de calor se da solo debido a la diferencia de temperaturas se puede decir que es convección natural y si para que este intercambio de calor exista se necesita ayuda externa para que el fluido este en movimiento se le conoce como convección forzada. La convección es el mecanismo más complejo de transferencia de calor.

A pesar de la complejidad de la transferencia de calor por convección, la velocidad de transferencia de calor por convección es proporcional a la diferencia de temperatura, y se expresa convenientemente mediante la ley de refrigeración de Newton (2.1).

$$Q_{conv} = h A_s (T_s - T_{\infty}) \quad (1.1)$$

Donde: h es el coeficiente de transferencia de calor convectivo en $\frac{W}{m^2 \cdot C}$ o $\frac{BTU}{h \cdot ft^2 \cdot ^\circ f}$, A_s es el área superficial a través de la cual tiene lugar la transferencia de calor por convección, T_s es la temperatura superficial y T_{∞} es la temperatura del fluido.

El coeficiente de transferencia de calor de convección h no es una propiedad del fluido. Es un parámetro determinado experimentalmente cuyo valor depende de todas las variables que influyen en la convección, tales como la geometría, la naturaleza del movimiento del fluido, la propiedad del fluido y la velocidad del fluido.

El mecanismo de transferencia de calor por convección, se rige por la ley de Fourier. Esta ley establece que la tasa de transferencia de calor, q , en cualquier dirección, n , por unidad de área medida normal a n viene dada por:

$$Q = -k \partial T / \partial n \quad (1.2)$$

Donde k es el coeficiente de conductividad, que es una propiedad del fluido.

1.8.3.3 Radiación.

Todos los cuerpos sin importar cuál es su temperatura emiten energía desde sus superficies a esta energía se le conoce como energía radiante y es transportada por ondas electromagnéticas, debido a esto la energía radiante puede transmitirse aun en el vacío. La emisión de esta energía de manera continua por un cuerpo se le conoce como radiación. Este mecanismo de transferencia de calor no necesita contacto entre superficies para que suceda.

En la evaluación térmica del block se involucran las tres formas de transferencia de calor teniendo como caso de estudio la transferencia de calor conjugada.

1.8.4 Radiación solar

El sol es la primera fuente de radiación conocida por el hombre desde sus inicios, se conoce como radiación solar al conjunto de ondas electromagnéticas que son emitidas por el sol, la radiación que llega a la tierra está en unidad de irradiancia W/m^2 , en la figura 1.2 se observa la intensidad de radiación que llega a la tierra teniendo un rango de $275 W/m^2$ como máximo y $75 W/m^2$ como mínimo. Se puede ver que México se encuentra dentro de un rango alto con $225 W/m^2$.

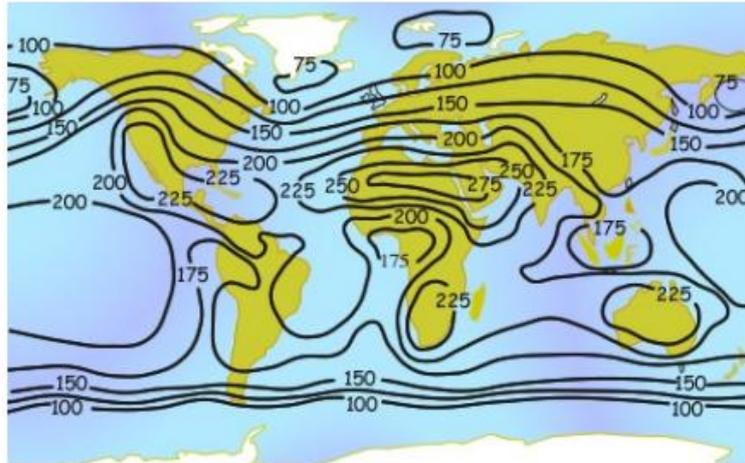


Figura 1.2 Intensidad de radiación que llega a la tierra [Recuperado de http://catarina.udlap.mx/u_dl_a/tales/documentos/lic/uscanga_s_m/capitulo2.pdf]

Es importante conocer las diferentes componentes de la radiación solar ya que en muchos trabajos e investigaciones se emplean distintas componentes o distintos datos de radiación como son radiación directa, radiación difusa y radiación global. La radiación llega en un 100% al tope de la atmosfera pero solo una parte alcanza llegar directamente a la superficie de la tierra sin ser absorbida ni dispersada y a esta radiación se le conoce como directa, otra parte de la radiación es dispersada por la atmosfera como radiación difusa por la superficie de la tierra, la radiación difusa se presenta cuando los rayos solares penetran la atmosfera, la suma de la radiación directa y la radiación difusa dan como resultado la radiación global o total sobre una superficie horizontal. Para este proyecto se utilizara la radiación solar global como parámetro para el análisis.

1.8.5 Arquitectura bioclimática

Como se mencionó en la introducción la arquitectura bioclimática acondiciona una vivienda o una edificación de tal manera que esta esté en confort térmico utilizando al mínimo las energías no renovables, con el fin de reducir los gases de efecto invernadero utilizando recursos renovables como es la energía solar, el agua, el viento etc. La arquitectura bioclimática no es una tecnología nueva ya que desde sus inicios el hombre construyo sus viviendas de tal manera que las condiciones climáticas no afectaran el confort térmico de su interior, entonces las viviendas eran construidas de acuerdo al clima, conforme la tecnología avanzo las viviendas dejaron de ser construidas de acuerdo a las condiciones climáticas pues ya existían ventiladores, aire acondicionados, calefactores entre otros que proporcionan condiciones de confort al interior de la vivienda, después de años del uso descontrolado de estos equipos ahora se busca que las construcciones tengan una arquitectura bioclimática.

1.8.5.1 Clasificación de elementos bioclimáticos

La arquitectura bioclimática se clasifica en elementos pasivos y en elementos activos, su clasificación dependerá de cómo absorban, conviertan y distribuyan la energía solar, en la figura 1.3 se muestra la clasificación de estos elementos.

Los sistemas solares activos aprovechan la energía solar mediante el uso de sistemas mecánicos o eléctricos.

Los sistemas solares pasivos aprovechan al máximo la energía solar con ayuda de las características de la construcción de la vivienda utilizando al mínimo o no utilizando los sistemas mecánicos.

Este proyecto entra en la clasificación de sistema pasivo ya que el análisis corresponde a un techo fresco con película reflectiva compuesto de block.

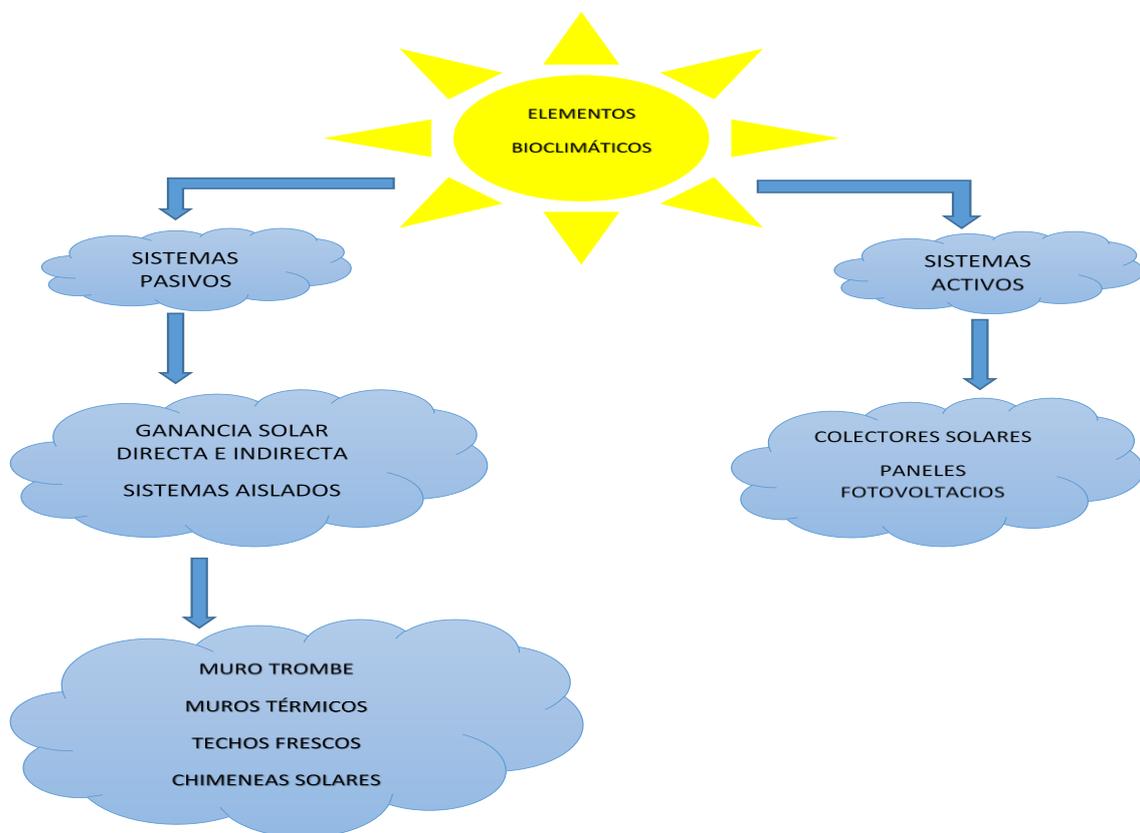


Figura 1.3 Clasificación de los elementos bioclimáticos

1.8.6 Dinámica de fluidos computacionales

1.8.6.1 Antecedentes de CFD

En el campo científico se utilizan diferentes métodos de estudio y estos se pueden clasificar en métodos teóricos y métodos experimentales. Estos métodos tienen ventajas y desventajas y esto afectara o beneficiara dependiendo del problema que se va analizar. Si el problema de estudio que se va a resolver es de manera particular y se cuenta con equipo y recurso económico el método experimental aplicaría, si lo que se quiere es analizar un problema de manera general, en menor tiempo y a bajo costo, el método teórico seria el adecuado.

Cuando se requiere analizar problemas de transferencia de calor, mecánica de fluidos y transferencia de masa se utiliza un método teórico el cual involucra la solución de ecuaciones diferenciales parciales. Un método teórico permite que se obtengan resultados de manera más general. El método teórico se divide en dos categorías: el método analítico que en cual se involucra la solución de integrales, funciones especiales entre otras, cabe mencionar que darle solución a problemas muy complejos o no lineales, llega a ser muy difícil por lo cual no es una opción muy práctica. Los métodos numéricos, los cuales dan una serie de valores que se aproximan a la solución que se quiere, dentro de esta categoría se encuentran los siguientes métodos: el método de diferencias finitas, de volumen finito y de elemento finito.

1.8.6.2 Método de diferencias finitas

El método de diferencias finitas es el método más antiguo aplicado para la solución numérica de ecuaciones diferenciales parciales. Este método es el más fácil de usar para la solución de problemas con geometrías sencillas. El inicio de este método es una ecuación diferencial de una variable ϕ , esta variable se describe por medio de puntos sobre el nodo de una malla y en cada nodo de la malla, la ecuación es aproximada re-emplazando las derivadas parciales por aproximaciones finitas utilizando series de Taylor o polinomios ajustados, los cuales son usados para obtener aproximaciones de diferencias finitas para la primera y segunda derivada de ϕ con respecto a las coordenadas. El resultado es una ecuación algebraica para ϕ en cada nodo de la malla, donde el valor de la variable en el nodo genérico y en ciertos nodos vecinos aparece como incógnitas. Este método se comienza a complicar cuando quiere ser aplicado a mallas irregulares otra desventaja es que es un método no conservativo esto quiere decir que la conservación de masa no se cumple a menos que se tenga cuidado con ello. (Xamán y Gijón Rivera 2016)

1.8.6.3 Método de volúmenes finitos

El método de volumen finito permite discretizar y resolver numéricamente ecuaciones diferenciales, originalmente fue desarrollado como una forma especial de la formulación en

diferencias finitas. También se puede considerar como un método alternativo a los de diferencias finitas y elementos finitos. En este método se considera una malla de discretización y en cada punto de esta malla se construye un número finito de volúmenes de control. Para poder expresar valores de variables en las superficies de los volúmenes de control en términos de valores nodales se necesita utilizar una interpolación. Para cada volumen de control se obtiene una ecuación algebraica, en la cual aparecen valores de los nodos vecinos. La malla solo define las fronteras de los volúmenes de control y por esta razón este método es aplicable para cualquier tipo de malla.

El método de volumen finito consiste de los siguientes pasos.

- 1.-Integración de las ecuaciones gobernantes de flujo de fluidos sobre todos los VC del dominio de solución.
- 2.-Discretización de las ecuaciones que las convierte de integrales a ecuaciones algebraicas.
- 3.-solucion de las ecuaciones algebraicas por un método iterativo.

La formulación de volúmenes finitos permite tener resultados más exactos conforme los volúmenes de control se aproximen al infinito, es decir, al continuo. (Xamán y Gijón Rivera 2016)

1.8.6.4 Influencia de las computadoras

Con el desarrollo de las computadoras de altas velocidades y de mayor capacidad se ha aumentado significativamente el uso de los métodos numéricos en el campo científico y tecnológico resolviendo así problemas más complejos a bajo costo y en menor tiempo. Existen problemas complejos que no se pueden resolver de manera analítica y resolverlos de manera experimental sería demasiado caro si no se cuenta con el equipo. Por esta razón surge la necesidad de resolver estos problemas numéricamente. Se puede decir que gracias al desarrollo de las computadoras se han consolidado las técnicas numéricas.

Con la aplicación de las técnicas numéricas surge el concepto de *Dinámica de fluidos computacionales (CFD)*. CFD consiste en la utilización de las computadoras como herramientas para resolver numéricamente las ecuaciones de movimiento de fluidos con el fin de aplicarlas a problemas de la vida real. CFD surge con el propósito de reemplazar los sistemas de ecuaciones diferenciales parciales por un sistema de ecuaciones algebraicas que puedan ser resueltas utilizando una computadora.

1.8.6.5 Aplicaciones

En las diversas áreas donde se analizan fluidos CFD puede ser muy útil, se puede analizar desde el vuelo de un ave, el agua que fluye de una tubería hasta el movimiento del aire

dentro de una cavidad. CFD es utilizado en diversos sectores de la industria como son la alimenticia, aeronáutica, aeroespacial, automovilística, eléctrica, nuclear entre otras áreas. Las aplicaciones de CFD se presentan de manera amplia, sin embargo, el área de aplicación depende principalmente del interés del usuario. En la figura 1.4 se observan aplicaciones de CFD.



Figura 1.4. Aplicaciones de CFD [Recuperado de <https://www.mentor.com/products/mechanical/industries/automotive-transportation/>]

1.8.6.6 Ventajas y desventajas

Las ventajas más importantes que tiene CFD es que a través de su uso se pueden estudiar muchos fenómenos que con ningún otro método se pueden observar, otra de sus ventajas es que se pueden predecir las propiedades del fluido con detalle siempre y cuando se tenga el modelo matemático correcto. También con el uso de CFD se pueden resolver problemas de manera rápida evitando así realizar experimentos costosos.

Las desventajas de CFD son: 1) para poder utilizar CFD se requiere que los usuarios tengan una amplia experiencia y formación especializada con el tema. 2) se consume recursos de hardware y software que requieren inversiones iniciales y 3) se puede llegar a tener fenómenos muy complejos que tienen alto consumo de recursos computacionales. Sin embargo, para tener éxito con el uso de CFD se requiere experiencia y un profundo conocimiento de la física de flujos de fluidos y fundamentos de algoritmos numéricos (Versteeg et al. 2008).

La dinámica de fluidos computacionales se integra por tres principales disciplinas que son Ingeniería (mecánica de fluidos) que se encarga del estudio del movimiento y reposo de los fluidos, Matemáticas que describe las ecuaciones gobernantes de la dinámica de fluidos y las ciencias computacionales que se encargan de resolver las ecuaciones

matemáticas mediante un lenguaje de programación (C, FORTRAN, etc.). En la figura 1.5 se observa un mapa conceptual donde se observan las disciplinas que integran CFD.

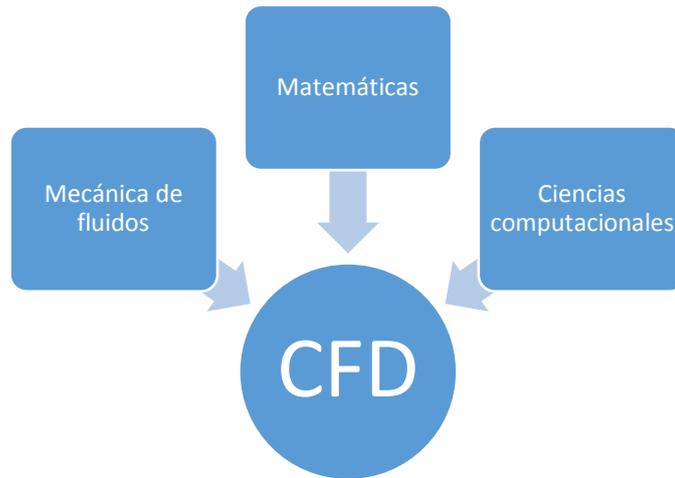


Figura 1.5 Disciplinas que integran CFD

1.8.6.7 Estructura de CFD

Para la solución de un problema con la aplicación de CFD consiste en 3 partes fundamentales que son: Pre-proceso, Solver, y Post-proceso. En la figura 8 se observa la estructura general de CFD.



Figura 1.6. Estructura general de CFD

Pre-proceso

El pre-proceso es la etapa de preparación de datos de entrada en un código resolución. Si se va utilizar un software comercial el pre- proceso es más sencillo y por lo general solo se lleva unas semanas o pocos meses de entrenamiento para que se pueda realizar esta etapa.

Pero en cambio si se va a desarrollar e implementar un software esta tarea resulta ser más complicada y puede llevar varios meses o años la comprensión de esta etapa. Para el pre-proceso se tiene que seguir los siguientes pasos:

- 1) Establecer un modelo físico: un modelo físico se define como la representación gráfica de lo que en realidad se quiere representar y se utiliza para definir un problema mostrando su comportamiento bajo ciertas circunstancias. En la figura 1.7 se observa un modelo físico de un techo convencional con recubrimiento en el cual se observa su comportamiento de acuerdo a los métodos de transferencia de calor que presenta (Hernández, 2015).

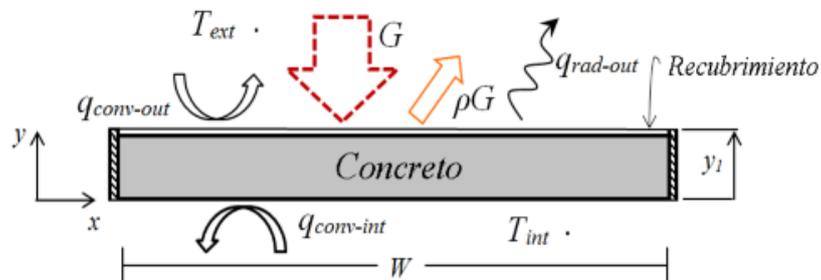


Figura 1.7 Modelo físico de un techo (Hernández, 2015)

- 2) Establecer un modelo matemático: un modelo matemático se define como la ecuación o conjunto de ecuaciones que describe el modelo físico en determinada situación. En este punto se tendrá hacer uso de un modelo disponible o desarrollar uno para el fenómeno que se desea estudiar. En el modelo matemático se tienen que establecer condiciones de frontera y la condición inicial.
- 3) Generar una malla numérica: Una malla numérica se define como el conjunto de puntos discretos llamados nodos que son distribuidos en el dominio de estudio o de un modelo físico. La malla numérica se utiliza en la solución numérica de las ecuaciones diferenciales parciales.

Solver

Esta etapa se concentra en la solución del problema, es la etapa en la que se resuelve el método matemático utilizando una computadora, aquí es donde intervienen los conceptos de análisis numéricos, fundamentos de matemáticas, desarrollo de algoritmos y software. Para el desarrollo de software esta etapa se realiza en dos pasos:

- 1) Proceso de discretización: la discretización numérica se define como la sustitución de las ecuaciones diferenciales parciales que describen el modelo físico por un conjunto de ecuaciones algebraicas utilizando algún método numérico como el volumen finito, diferencias finitas etc.
- 2) Solución del sistema de ecuaciones algebraicas. Es este punto se tiene que implementar un método de inversión de matrices para el sistema de ecuaciones resultante de la discretización. La programación se puede realizar en un compilador C o en FORTRAN.

Post-proceso

En esta etapa se realizan gráficos o simulaciones utilizando un visualizador, esta etapa es muy importante para comprender los resultados y el comportamiento del fenómeno lo que llevara a conclusiones exitosas. En un visualizador se pueden observar mallas numéricas, mapas de contornos de iso-líneas, campos de velocidades etc.

1.8.7 Ecuación general convección-difusión

Las ecuaciones de conservación (masa, momento y energía) describen los fenómenos bajo estudio de CFD, además de obedecer el principio de conservación generalizado; esto permite que las ecuaciones de conservación puedan ser representadas en una sola expresión general, la cual es la *ecuación genera de convección difusión bidimensional*.

$$\underbrace{\frac{\partial(\rho\phi)}{\partial t}}_{\text{Término temporal}} + \underbrace{\frac{\partial(\rho u * \phi)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho v * \phi)}{\partial y}}_{\text{Términos Convectivos}} = \underbrace{\frac{\partial}{\partial x} \left(\Gamma \frac{\partial \phi}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\Gamma \frac{\partial \phi}{\partial y} \right)}_{\text{Términos Difusivos}} + \underbrace{S}_{\text{Término Fuente}}$$

(1.3)

La ecuación 1.3 se compone del término temporal, el cual representa la variación de la variable con respecto al tiempo; los términos convectivos representan el transporte de la variable de un punto a otro del dominio por medio de la velocidad del flujo; los términos difusivos representan el flujo de la variable a nivel molecular debido a las corrientes difusivas y el término fuente representa la generación o destrucción de la variable en el interior del volumen de control.

1.8.8 Condición inicial y de frontera

Los problemas de flujo de fluidos, transferencia de calor y masa computacional están definidos en términos de las condiciones de frontera y de la condición inicial; si no se define de esta manera la ecuación diferencial correspondiente tendrá numerosas soluciones. En el desarrollo y uso de CFD es importante especificar correctamente estas condiciones porque el resultado de la variable de interés depende fuertemente de la información matemática establecida en la frontera.

1.8.8.1 Condición de Dirichlet (Condición de Primera Clase)

La condición de frontera de primera clase es la más común encontrada en CFD. Esta se basa en establecer un valor de la variable ϕ en la frontera, y puede ser una función dependiente del tiempo y/o espacio, o solo un valor constante.

$$\phi = \phi_{\text{frontera}} \quad (1.4)$$

1.8.8.2 Condición de Neumann (Condición de Segunda Clase)

En esta condición se frontera se impone un gradiente de la variable φ en dirección normal a la frontera igual a una función del tiempo y/o espacio, aunque también es posible tener el gradiente igual a un valor constante.

$$\left. \frac{\partial \varphi}{\partial n} \right|_{\text{frontera}=f(x_n)} \quad (1.5)$$

1.8.8.3 Condición de Robín (Condición de Tercera Clase)

Esta condición de frontera es una combinación de la condición de primera clase y la de segunda clase, esta establece la frontera se rige por una ecuación diferencial parcial de primer orden no homogénea,

$$a \cdot \frac{\partial \varphi_{\text{frontera}}}{\partial n} + b \cdot \varphi_{\text{frontera}} = f(x_n) \quad (1.6)$$

Donde a y b son constantes diferentes de cero. Este tipo de ecuaciones son aplicadas para el caso de fronteras convectivas, entonces $a = \text{conductividad térmica } (\lambda)$, $b = \text{coeficiente convectivo } (h)$ y $f(x_n) = h\varphi_{\text{medio}}$.

Al sustituir las condiciones la ecuación queda:

$$\lambda \frac{\partial \varphi_{\text{frontera}}}{\partial n} = h(\varphi_{\text{medio}} - \varphi_{\text{frontera}}) \quad (1.7)$$

CAPÍTULO 2. MODELO FÍSICO Y MODELO MATEMÁTICO DE UN BLOCK HUECO

En este capítulo se presenta y describe el modelo físico del block hueco utilizado en techos con películas reflectivas y aislamiento térmico. Como parte de este capítulo se describe el modelo matemático que representa las ecuaciones gobernantes del sistema analizar.

2.1 MODELO FÍSICO

En la República Mexicana existen 3 tipos de clima según INEGI que son cálido, seco y templado estos se dividen en subgrupos, dentro del cálido se encuentra el cálido subhúmedo y cálido húmedo, en el caso del clima seco se divide en seco y muy seco y para el clima templado se divide en templado subhúmedo y templado húmedo haciendo un total de 6 climas, en la figura 2.1 se muestra un mapa de la República Mexicana donde se observan los diferentes grupos y subgrupos de climas.

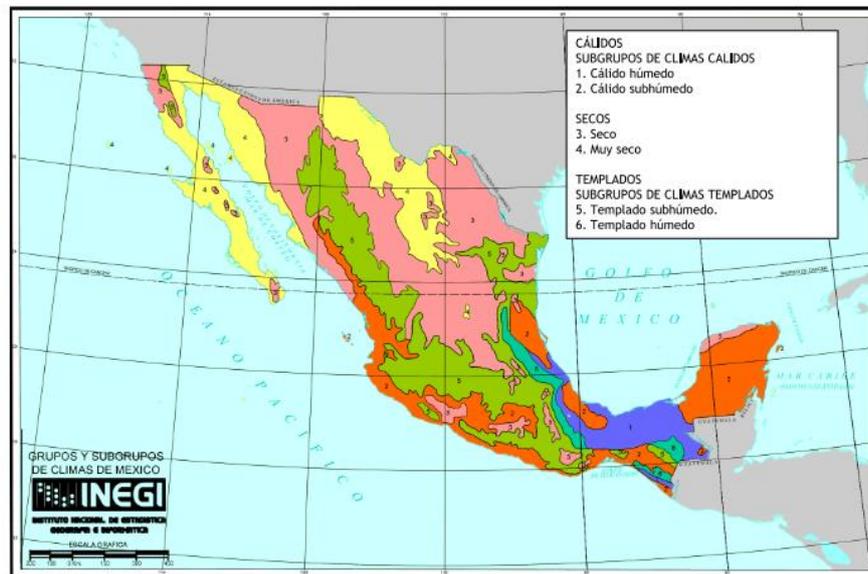


Figura 2.1 Climas de la República Mexicana según INEGI

El clima seleccionado para estudiar el comportamiento térmico del block fue el cálido-subhúmedo que es representativo de la Ciudad de Mérida Yucatán. La Ciudad de Mérida Yucatán se caracteriza por ser una de las Ciudades con más altas temperaturas, teniendo una temperatura media anual superior a los 26°C , en mayo se presentan las temperaturas más altas entre los 38.6 y 43.16°C y en enero las bajas entre los 9 y los 11.8°C . Al ser una Ciudad en la cual la mayoría del tiempo las temperaturas son altas se propone que los techos de las casas sean compuestos por block huecos ya que estos debido a sus cavidades de aire funcionan como aislamiento térmico evitando así que el calor pase del exterior al interior de la casa. En la figura 2.2 se muestra el modelo físico de una casa que tiene un techo compuesto por blocks huecos.

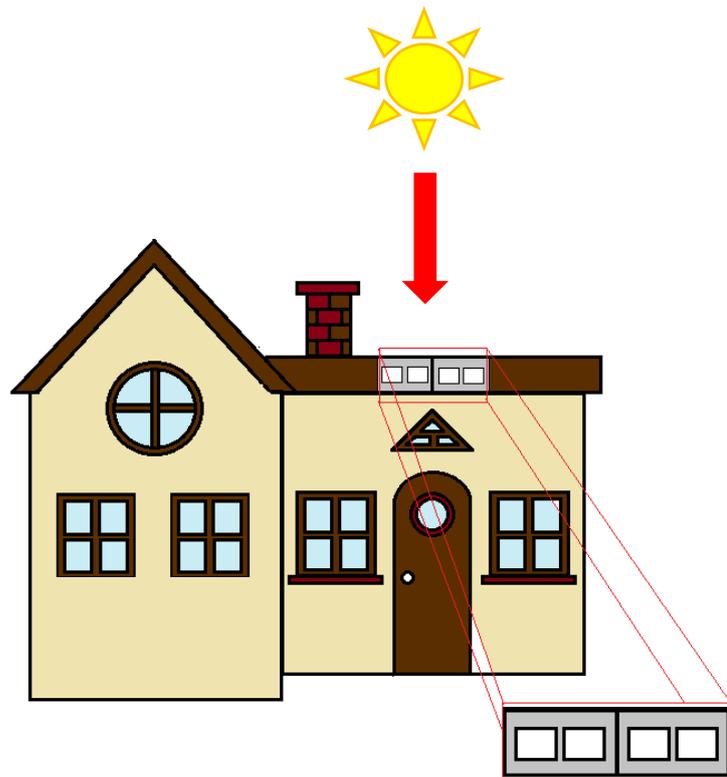


Figura 2.2 Modelo físico de una casa con techo compuesto de blocks huecos.

El modelo físico que se utilizara para el proyecto es el modelo de un solo block con dos huecos simétricos, este se analizara tomándolo del centro del techo de una casa, no se tomaran en cuenta las contribuciones de los blocks adyacentes considerando que el techo de una casa es más grande que un solo block. En la figura 2.3 se muestran las dimensiones del block hueco.

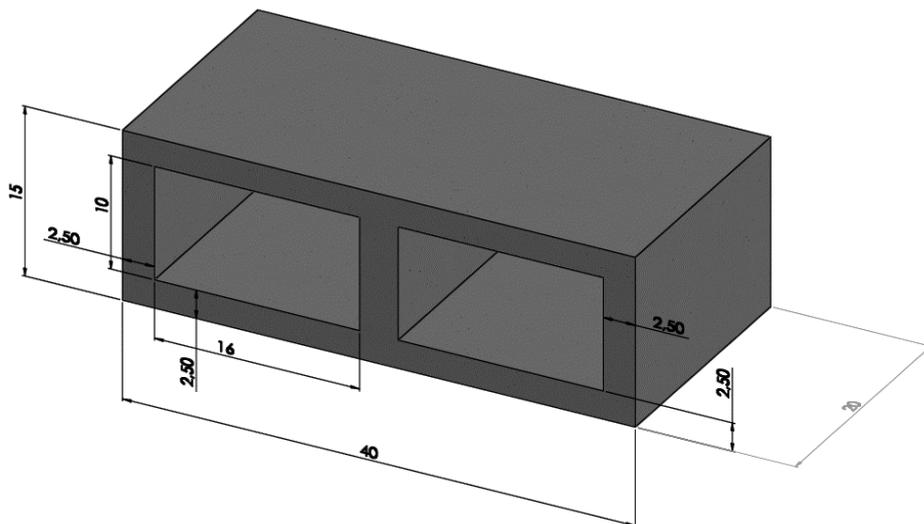


Figura 2.3 Dimensiones de un block con dos huecos.

Para mayor entendimiento del modelo físico se realizaron 4 modelos del block considerando las configuraciones del block (B-L-G, B-L-B/W, B-A-L-G, B-A-L-B/W) en los cuales se apreciara los distintos métodos de transferencia de calor que interfieren en el sistema.

2.1.1 Modelo físico de un block de dos huecos con loza (B-L-G).

En el modelo físico que se muestra en la figura 2.4 se observa un block con loza de 5cm de espesor que simula un techo convencional de una casa de la República Mexicana esta configuración es la que se tomara como referencia para realizar el análisis. En el modelo físico se observan los distintos métodos de transferencia de calor que interfieren en el modelo. En la parte superior del block se considera la transferencia de calor por radiación y convección por parte del ambiente exterior a la superficie del block, se considera transferencia de calor por conducción en las partes sólidas del block y en los huecos del block se considera transferencia de calor por convección. Las paredes del block se consideran aisladas ya que no se tomaran en cuenta las contribuciones de los blocks adyacentes. También existe transferencia de calor por convección de la superficie interna del block hacia el aire habitación afectando así su temperatura interior.

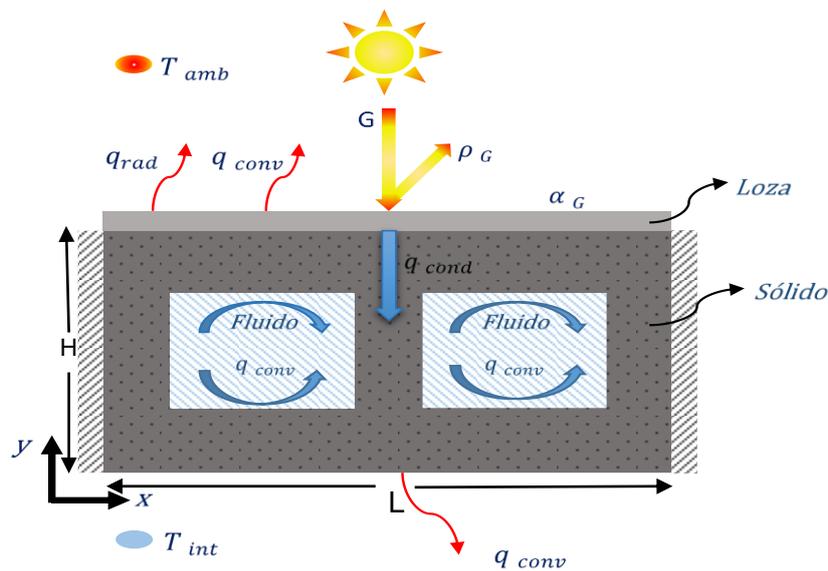


Figura 2.4 Modelo físico de un block de dos huecos con loza.

2.1.2 Modelo físico de un block de dos huecos con loza y película reflectiva blanca o negra (B-L-B/W).

El modelo físico que se presenta en la figura 2.5 corresponde a un block con loza y película reflectiva, se tomara para el análisis película blanca y película negra. El comportamiento de la transferencia de calor se considera de igual manera que en la configuración anterior.

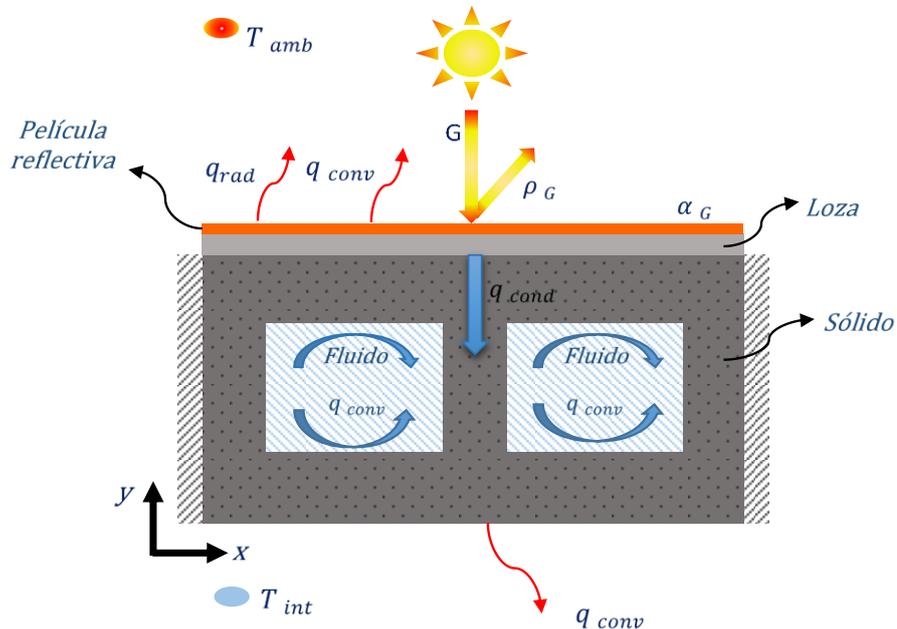


Figura 2.5 Modelo físico de un block de dos huecos con loza y película reflectiva.

2.1.3 Modelo físico de un block de dos huecos con aislante térmico y loza (B-A-L).

El modelo físico de un block de dos huecos con aislante térmico y loza se presenta en la figura 2.6 Para esta configuración se consideran los mismos fenómenos de transferencia de calor pero en comparación a las otras dos configuraciones en esta existe una disminución de la transferencia de calor del exterior a la superficie del block debido al aislante térmico de poliestireno expandido de 2.5 cm de espesor que es componente de esta configuración, el aislante térmico como se observa en el modelo físico se encuentra entre el block y la loza.

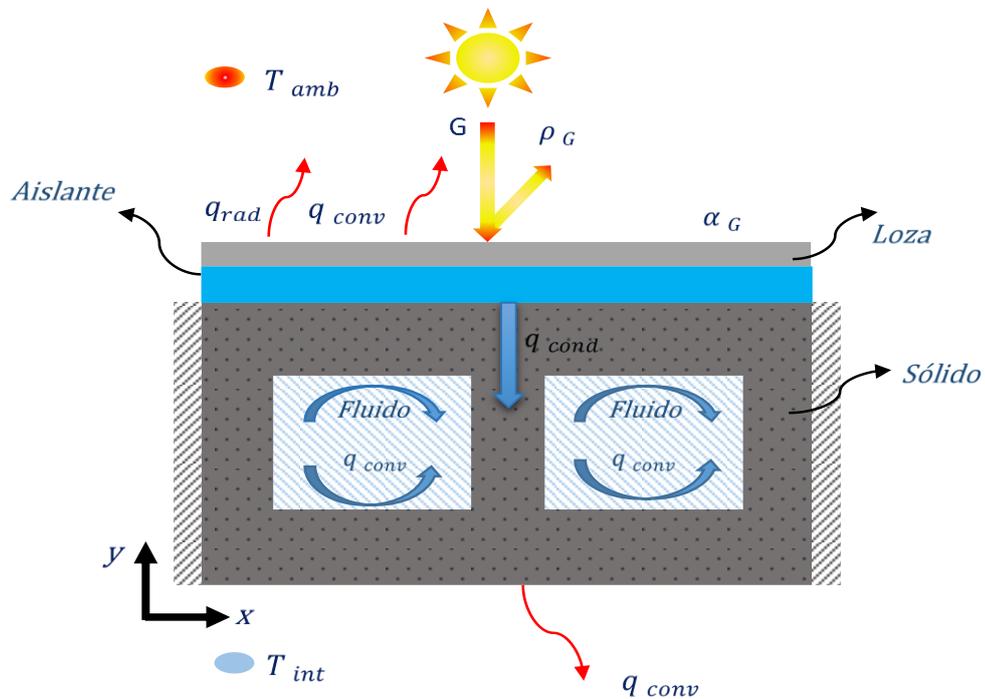


Figura 2.6 Modelo físico de un block de dos huecos con aislante térmico y loza.

2.1.4 Modelo físico de un block de dos huecos con aislante térmico, loza y película reflectiva negra o blanca (B-A-L-B/W).

En la figura 2.7 se muestra el modelo físico de un block de dos huecos con aislante térmico, loza y película reflectiva negra o blanca. Esta configuración presenta el mismo comportamiento de la transferencia de calor que las configuraciones antes mencionadas pero a diferencia de ellas, en esta configuración se esperan mejores resultados debido al uso de la película reflectiva y del aislante térmico.

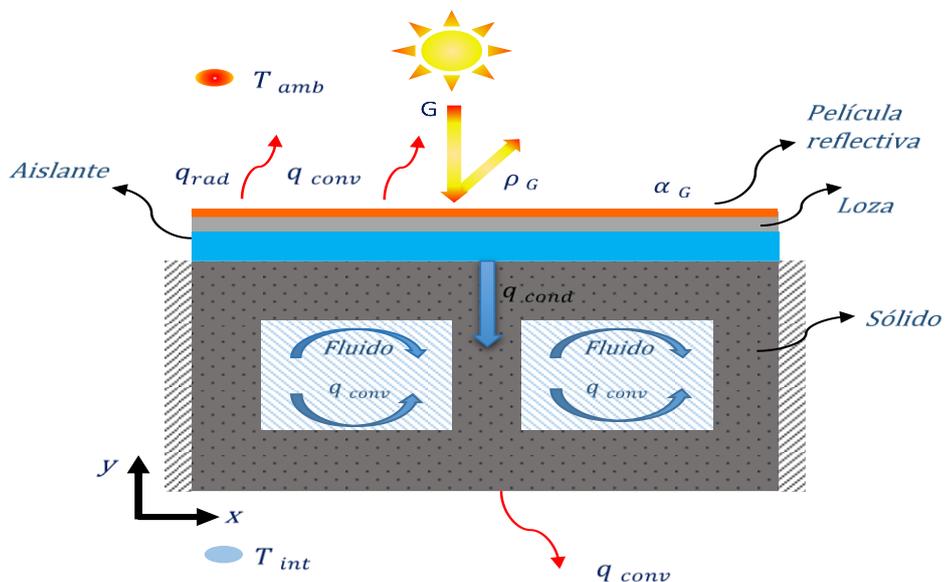


Figura 2.7 Modelo físico de un block de dos huecos con aislante, loza y película reflectiva.

2.2 CONSIDERACIONES

- Para el análisis del block se considera transferencia de calor conjugada donde interfieren los métodos de convección y conducción, la radiación interfiere pero solo en el exterior del techo y se tomara como una condición de frontera.
- En los huecos del block se considera aire como un fluido newtoniano en régimen de flujo laminar.
- Las partes solidas del block se consideran como un medio homogéneo y sin generación de calor.
- El análisis se realizó en dos dimensiones para un solo block.
- Se consideró el block como si fuese tomado del centro del techo, entonces se supone que las paredes laterales son adiabáticas ya que la mayor parte del calor proviene de la superficie exterior y de la superficie interior del block.
- Se considera el uso de aislante térmico en la parte superior del block para algunas configuraciones
- Se considera el uso de la película reflectiva en la parte superior del block para algunas configuraciones y su espesor es despreciable.

2.3 MODELO MATEMÁTICO

Se considera el análisis de la transferencia de calor conjugada para el análisis del problema, considerando conducción y convección en el block, este tiene las paredes laterales aisladas. En el block existen pérdidas de calor por radiación y convección de la superficie externa del block hacia el exterior y solo pérdidas por convección de la superficie interna del block hacia el interior de la habitación. Las ecuaciones de conservación de masa, energía y de momento que describen el fenómeno de transferencia de calor por convección de este problema se presentan a continuación.

Ecuación de conservación de masa

$$\frac{\partial(\rho u_i)}{\partial x_i} = 0 \quad (2.1)$$

Ecuación de conservación de momento

$$\frac{\partial(\rho u_i u_j)}{\partial x_j} = -\frac{\partial P}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\mu \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) \right] - \rho g_i \beta (T - T_\infty) \quad (2.2)$$

Ecuación de conservación de energía

$$\frac{\partial(\rho u_i T)}{\partial x_i} = \frac{1}{C_p} \frac{\partial}{\partial x_i} \left(\lambda \frac{\partial T}{\partial x_i} \right) \quad (2.3)$$

Condiciones de frontera térmicas

$$\left. \frac{\partial T}{\partial x} \right|_{x=0} = 0 \quad 0 < Y < H \quad (2.4)$$

$$\left. \frac{\partial T}{\partial x} \right|_{x=l} = 0 \quad 0 < Y < H \quad (2.5)$$

$$-\lambda \left. \frac{\partial T}{\partial y} \right|_{y=0} = h[T - T_{ext}] \quad 0 \leq X \leq L \quad (2.6)$$

$$\lambda \left. \frac{\partial T}{\partial y} \right|_{y=H} = h[T - T_{ext}] + \varepsilon \sigma [T^4 - T_{sky}^4] + \alpha G \quad 0 \leq X \leq L \quad (2.7)$$

CAPÍTULO 3. ANALISIS DIMENSIONAL Y ECUACIONES DE CONSERVACIÓN

En este capítulo se presenta el análisis dimensional y el análisis de las ecuaciones de conservación de masa, energía y de momento, con el fin de tener un mayor entendimiento del fenómeno presente en este trabajo de investigación.

3.1 ANÁLISIS DIMENSIONAL

Uno de los objetivos de este trabajo de investigación fue describir algunos métodos analíticos y numéricos típicos para determinar h (coeficiente convectivo). Existen muchos casos de gran importancia práctica en los cuales no es posible obtener soluciones teóricas aproximadas y en estos casos la predicción de transferencia de calor debe basarse en estudios experimentales previos, para que estos resultados experimentales sean de mayor utilidad deben ser representados en términos de variables generales, Una forma de determinar estas variables "generales" es mediante la aplicación del análisis dimensional. El coeficiente de transferencia de calor, h , es la variable a buscar.

3.1.1 Análisis dimensional

Como parte principal de este trabajo de investigación, se realizó un análisis dimensional representativo del modelo físico, Para este caso el coeficiente de transferencia de calor convectivo h dependerá de:

- La conductividad K del fluido
- La viscosidad μ del fluido
- El calor específico c_p del fluido
- Densidad ρ del fluido
- Tamaño de las cavidades l
- Fuerzas de flotación $g\beta(T - T_\infty)$
- La velocidad U del fluido

Por lo tanto

$$h = f [K, \mu, c_p, \rho, l, g\beta(T - T_\infty), U] \quad (3.1)$$

Que puede escribirse como

$$F [h, K, \mu, c_p, \rho, l, g\beta(T - T_\infty), U] = 0 \quad (3.2)$$

La teoría del análisis dimensional indica que las variables dimensionales están formadas por los productos de potencias de algunas de las variables dimensionales originales. Por esta razón, las variables adimensionales generalizadas se denominan a menudo productos adimensionales y se indican con el símbolo π . Por lo tanto, las cuatro variables adimensionales requeridas en el presente problema serán denotadas por π_1, π_2, π_3 , y π_4 .

Hay 8 variables dimensionales implicadas en el fenómeno de estudio, 4 se seleccionaron como principales Las variables principales deben seleccionarse de manera que cada producto adimensional caracterice una característica distinta del flujo.

- $\pi (1)=[h, K, \mu, \rho, l]$ (3.3)

- $\pi (2)=[U, K, \mu, \rho, l]$ (3.4)

- $\pi (3)=[g\beta(T-T_{\infty}), K, \mu, \rho, l]$ (3.5)

- $\pi (4)=[c_p, K, \mu, \rho, l]$ (3.6)

Se realiza el análisis dimensional para cada una de las variables de:

$$\pi (1)=[h, K, \mu, \rho, l]$$

h

$$h = \frac{Q}{A \Delta T} \left(\frac{w}{2} \right)$$

$$W = \frac{\text{joule}}{\text{seg.}} = \frac{N.m}{\text{seg.}} = \frac{kg.m}{s^2} \left(\frac{m}{s} \right) = \frac{kg.m^2}{s^3}$$

Por lo tanto

$$h = \frac{\frac{kg.m^2}{s^3}}{\frac{m}{k}} = \frac{kg}{s^3 k}$$

$$h = \frac{M}{t^3 T}$$

$$h = [M t^{-3} T^{-1}]$$

k

$$k = \frac{Q}{A \frac{\Delta T}{\Delta X}} = \frac{\frac{kg.m^2}{s^3}}{\frac{k}{m}} = \frac{kg.m}{s^3 k}$$

$$k = [M L t^{-3} T^{-1}]$$

μ

$$\mu = [M L^{-1} t^{-1}]$$

ρ

$$\rho = [M L^{-3}]$$

l

$$l = L$$

Una vez que se tienen variables principales conocidas, las π 's tendrán la siguiente forma:

$$\pi_1 = [h, K^{a1}, \mu^{b1}, \rho^{c1}, l^{d1}]$$

$$M L t T = [(M t^{-3} T^{-1}), M L t^{-3} T^{-1} a1 (M L^{-1} t^{-1})^{b1}, (M L^{-3})^{c1}, L^{d1}]$$

$$M L t T = M^{(1+a1+b1+c1)} L^{(a1-b1-3c1+d1)} t^{(-3-3a1-b1)} T^{(-1a1)}$$

Igualando exponentes para cada dimensión básica

$$\text{Para } M \quad 1 + a1 + b1 + c1 = 0$$

Para L $a_1 - b_1 - 3c_1 + d_1 = 0$

Para t $-3 - 3a_1 - b_1 = 0$

Para T $-1a_1 = 0$

Por sustitución obtenemos el valor de las variables

$a_1 = -1$

$b_1 = 0$

$c_1 = 0$

$d_1 = 1$

$\pi_{1_1} = [h, K^{-1}, \mu^0, \rho^0, l^1]$

$\pi_{1_1} = [h, K^{-1}, l^1]$

El número adimensional que se obtiene es el *Número de Nusselt*

$\pi_{1_1} = \left[\frac{h l}{k}\right] Nu \tag{3.7}$

Se realiza el análisis dimensional para cada una de las variables de:

$\pi_2 = [U, K, \mu, \rho, l]$

U

$\dot{m} = \rho V A$

$V = \frac{\dot{m}}{\rho A} = \frac{\frac{kg}{s}}{\frac{kg}{m^3} m^2} = \frac{m}{s}$

$U = [L t^{-1}]$

K

$K = [ML t^{-3} T^{-1}]$

μ

$\mu = [M L^{-1} t^{-1}]$

ρ

$\rho = [M L^{-3}]$

l

$l = L$

$\pi_2 = [U, K^{a_2}, \mu^{b_2}, \rho^{c_2}, l^{d_2}]$

$ML t T = [(L t)^{-1} (ML t^{-3} T^{-1})^{a_2} (M L^{-1} t^{-1})^{b_2}, (M L^{-3})^{c_2}, (L^{d_2})]$

$ML t T = M^{(a_2+b_2+c_2)} L^{(1+a_2-b_2-3c_2+d_2)} t^{(-1-3a_2-b_2)} T^{(-a_2)}$

Igualando exponentes para cada dimensión básica

Para M $a_2 + b_2 + c_2 = 0$

Para L $1 + a_2 - b_2 - 3c_2 + d_2 = 0$

Para t $-1 - 3a_2 - b_2 = 0$

Para T $-a_2 = 0$

Por sustitución obtenemos el valor de las variables

$a_2 = 0$

$b_2 = -1$

$c_2 = 1$

$d_2 = 1$

$\pi_2 = [U, K^0, \mu^{-1}, \rho^1, l^1]$

$\pi_2 = [U, \mu^{-1}, \rho^1, l^1]$

Del resultado se obtiene el número *adimensional Reynolds*:

$\pi_2 = \left[\frac{U \rho l}{\mu} \right] \tag{3.8}$

Se realiza el análisis dimensional para cada una de las variables de:

$\pi_3 = [g \beta (T_w - T_f) K \mu \rho \ell]$

g

$g = \frac{m}{s^2} = \frac{\ell}{t^2} = \frac{L}{t^2} = L * t^{-2}$

β

$\beta = \frac{1}{k} = \frac{1}{T} = T^{-1} K = \frac{Q_x}{A \frac{\Delta T}{\Delta x}} = \frac{kg * m^2}{s^3} = \frac{kg * m^2 * m}{s^3 * m^2 * k} = \frac{kg * m}{s^3 * k} = \frac{M * L}{t^3 * T} = M * L * t^{-3} T^{-1}$

μ

$\mu = \frac{kg}{m * s} = \frac{M}{L * t} = M * L^{-1} * T^{-1}$

ρ

$\rho = \frac{kg}{m^3} = \frac{M}{L^3} = M * L^{-3}$

ℓ

$\ell = m = L$

$\pi_3 = [L * t^{-2} * T^{-1} M * L^{-1} * T^{-1} M * L * t^{-3} * T^{-1} M * L^{-3} L]$

El número adimensional que se obtiene es *Grashof*:

$\pi_3 = \frac{g \beta (T_w - T_f) \ell^3}{\nu^2} \text{ Gr} \tag{3.9}$

Se realiza el análisis dimensional para cada una de las variables de:

$$\pi_4 = [c_p, K, \mu, \rho, l]$$

c_p

$$c_p: Q = m c_p \Delta T = \frac{w}{\frac{kg}{s} * k} = \frac{\frac{N * m}{s}}{\frac{kg}{s} * k} = \frac{\frac{kg * mm}{s^2}}{\frac{kg}{s} * k} = \frac{kg * m^2 s}{s^3 * kg * k} = \frac{m^2}{s^2} = \frac{L^2}{t^2 T^{-1}} = [L^2 t^{-2} T^{-1}]$$

K

$$K = [ML t^{-3} T^{-1}]$$

μ

$$\mu = [M L^{-1} t^{-1}]$$

ρ

$$\rho = [M L^{-3}]$$

l

$$l = L$$

$$ML = [(L^2 t^{-2} T^{-1})(ML t^{-3} T^{-1})^{a_4} (M L^{-1} t^{-1})^{b_4} (M L^{-3})^{c_4} (L)^{d_4}]$$

El número adimensional que se obtiene es el *Número de Prandtl*:

$$\pi_4 = c_p k^{-1} M^1 \tag{3.10}$$

3.2 ECUACIONES DE CONSERVACIÓN

Para la representación del fenómeno físico se requiere un modelo matemático, en general para representar fenómenos en los cuales se interfiere dinámica de fluidos, transferencia de calor se usan las ecuaciones de continuidad, momento, energía y transporte de masa. Como parte de este trabajo se realizó el análisis de las ecuaciones de conservación, estas ecuaciones implican una geometría tridimensional y la velocidad puede variar en tres dimensiones haciendo que el flujo sea tridimensional [$v(x, y)$ en rectangular o $v(r, \theta, z)$ en coordenadas cilíndricas].

3.2.1 Ecuación de masa

El enunciado que representa la ecuación se describe de la siguiente forma:

[El flujo másico que sale de la superficie de control]

$$+ [La relación de cambio de la masa dentro del volumen de control] = 0$$

Coordenadas rectangulares

En la figura 3.1 se representa el volumen de control diferencial en coordenadas rectangulares.

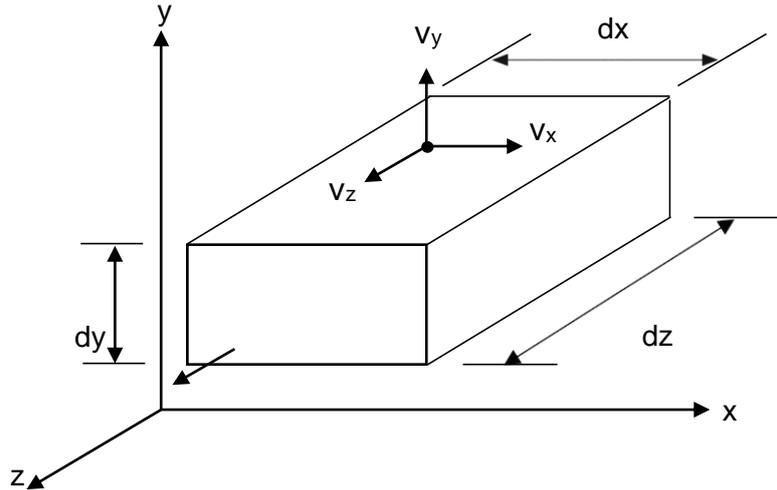


Figura 3.1 Volumen de control diferencial en coordenadas rectangulares

El volumen de control es $dv = dx, dz, dy$

La densidad se representa con ρ

La velocidad se expresa como $\vec{v} = i V_x + j V_y + \hat{K} V_z$ (3.11)

$$\sum \dot{m}_i (out) + \frac{d}{dt}(dm) = 0 \quad (3.12)$$

$$\Sigma(\vec{\rho} \cdot \vec{dA}) + \frac{d}{dt}(\rho dv) = 0 \quad (3.13)$$

$$\int_{sc} \vec{\rho} \cdot \vec{dA} + \frac{d}{dt}(\rho dx dy dz) = 0 \quad (3.14)$$

Para evaluar el primer término se usa la serie de Taylor para así evaluar las seis caras o superficies de control del elemento diferencial de la figura 3.1.

Del análisis de las caras se obtiene:

I. Superficie derecha para ρ y V_x

$$\begin{aligned} \rho \Big|_{x + \frac{dx}{2}} &= \rho + \frac{d\rho}{dx} \left(\frac{dx}{2} \right) \\ v_x \Big|_{x + \frac{dx}{2}} &= v_x + \frac{dv_x}{dx} \left(\frac{dx}{2} \right) \end{aligned} \quad (3.15)$$

II. Superficie izquierda para ρ y V_x

$$\rho \Big|_{x - \frac{dx}{2}} = \rho - \frac{d\rho}{dx} \left(\frac{dx}{2} \right)$$

$$vx \left| x - \frac{dx}{2} = vx - \frac{dvx}{dx} \left(\frac{dx}{2} \right)$$

III. Superficie inferior para ρ y Vy

$$\rho \left| y - \frac{dy}{2} = \rho - \frac{d\rho}{dy} \left(\frac{dy}{2} \right)$$

$$v \left| y - \frac{dy}{2} = vy - \frac{dvy}{dy} \left(\frac{dy}{2} \right)$$

(3.17)

IV. Superficie frontal para ρ y Vz

$$\rho \left| z + \frac{dz}{2} = \rho + \frac{d\rho}{dz} \left(\frac{dz}{2} \right)$$

$$v \left| z + \frac{dz}{2} = vz + \frac{dvz}{dz} \left(\frac{dz}{2} \right)$$

(3.18)

V. Superficie posterior para ρ y Vz

$$\rho \left| z - \frac{dz}{2} = \rho - \frac{d\rho}{dz} \left(\frac{dz}{2} \right)$$

$$v \left| z - \frac{dz}{2} = vz - \frac{dvz}{dz} \left(\frac{dz}{2} \right)$$

(3.19)

VI. Superficie superior para ρ y Vy

$$\rho \left| y + \frac{dy}{2} = \rho + \frac{d\rho}{dy} \left(\frac{dy}{2} \right)$$

$$v \left| y + \frac{dy}{2} = vy + \frac{dvy}{dy} \left(\frac{dy}{2} \right)$$

(3.20)

De la ecuación 3.14, tomando el primer termino

$$\int \rho v \cdot dA = \left\{ \left[\rho + \frac{d\rho}{dx} \left(\frac{dx}{2} \right) \left[vx + \frac{dvx}{dx} \left(\frac{dx}{2} \right) \right] dydz - \left[p - \frac{dp}{dx} \left(\frac{dx}{2} \right) \left[vx - \frac{dvx}{dx} \left(\frac{dx}{2} \right) \right] \right] dydz \right. \right. \\ \left. \left. + \left[\rho + \frac{d\rho}{dy} \left(\frac{dy}{2} \right) \left[vy + \frac{dvy}{dy} \left(\frac{dy}{2} \right) \right] dx dz - \left[p - \frac{dp}{dy} \left(\frac{dy}{2} \right) \left[vy - \frac{dvy}{dy} \left(\frac{dy}{2} \right) \right] \right] \right. \right. \\ \left. \left. + \left[\rho + \frac{d\rho}{dz} \left(\frac{dz}{2} \right) \left[vz + \frac{dvz}{dz} \left(\frac{dz}{2} \right) \right] dx dy - \left[p - \frac{dp}{dz} \left(\frac{dz}{2} \right) \left[vz - \frac{dvz}{dz} \left(\frac{dz}{2} \right) \right] \right] dx dy \right\} \quad (3.21)$$

$$\int \rho v \cdot dA = \frac{d(\rho vx) dx dy dz}{dx} + \frac{d(\rho vy) dx dy dz}{dy} + \frac{d(\rho vz) dx dy dz}{dz} = 0 \quad (3.22)$$

$$\int \rho v \cdot dA + d \left(\frac{\rho dx dy dz}{dt} \right) = 0 \quad (3.23)$$

Entonces la ecuación en coordenadas rectangulares queda como:

$$\left[\frac{d\rho}{dt} + d \frac{d(\rho vx)}{dx} + d \frac{d(\rho vy)}{dy} + d \frac{d(\rho vz)}{dz} \right] dx dy dz \quad (3.24)$$

Si

$$vx = u$$

$$vy = v$$

$$vz = w$$

La ecuación anterior se puede expresar como:

$$\left[\frac{d\rho}{dt} + d \frac{d(\rho u)}{dx} + d \frac{d(\rho v)}{dy} + d \frac{d(\rho w)}{dz} \right] dx dy dz \quad (3.25)$$

Por unidad de volumen la ecuación anterior queda:

$$\frac{dp}{dt} + \frac{d(\rho \mu_i)}{dx_j} \quad (3.26)$$

Para:

$$j = x, y, z$$

$$i = u, v, w$$

La ecuación de conservación de masa por unidad de volumen en su forma general queda representada de la siguiente manera:

$$\frac{dp}{dt} + \Delta \cdot (\overline{\rho v}) = 0$$

(3.27)

Se realizó la transformación de coordenadas rectangulares a coordenadas cilíndricas y a esféricas.

La ecuación de conservación de masa en coordenadas cilíndricas (r, θ, z) queda representada por:

$$\frac{d\rho}{dt} + \frac{1}{r} \frac{d(\rho vr)}{dr} + \frac{1}{r} \frac{d(\rho v\theta)}{d\theta} + \frac{1}{r} \frac{d(\rho vz)}{dz} = 0 \quad (3.28)$$

La ecuación de conservación de masa en coordenadas esféricas (r, θ, φ) queda representada por:

$$\frac{d\rho}{dt} + \frac{1}{r^2} \frac{d(\rho r^2 vr)}{dr} + \frac{1}{r \sin \theta} \frac{d(\rho v\theta \sin \theta)}{d\theta} + \frac{1}{r \sin \theta} \frac{d(\rho v\varphi)}{d\theta} = 0 \quad (3.29)$$

3.2.2 Ecuación de conservación de momento

La ecuación de momento es la representación matemática que describe el movimiento del fluido y esta puede obtenerse mediante la aplicación de la segunda ley de Newton, la cual establece que un pequeño elemento de volumen que se mueve con el fluido es acelerado por las fuerzas que actúan sobre él, es decir, *fuerzas del cuerpo + fuerzas de la superficie = masa total del sistema * aceleración del centro de masa*.

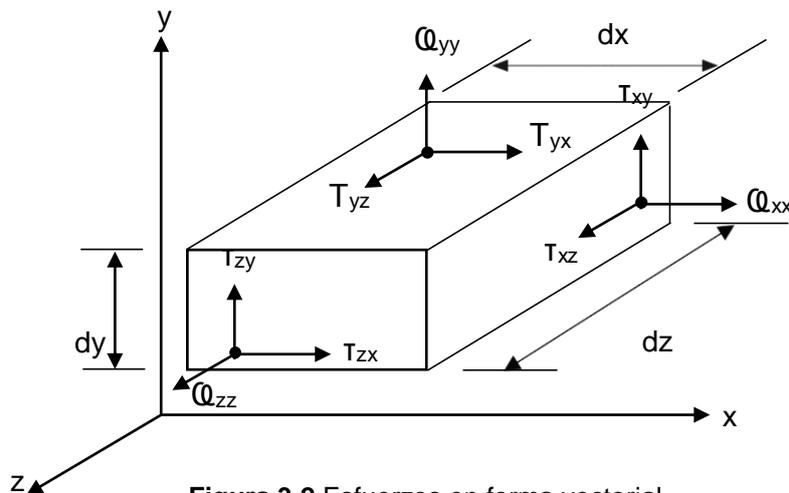


Figura 3.2 Esfuerzos en forma vectorial.

Se determinan las ecuaciones en cada superficie de control.

I. Superficie derecha

$$Dir x \varphi_{ij} \Big|_{x + \frac{dx}{2}} = \varphi_{xx} + \frac{d\varphi_{xx}}{dx} \left(\frac{dx}{2}\right)$$

$$Dir y \tau_{ij} \Big|_x + \frac{dx}{2} = \tau_{xy} + \frac{d\tau_{xy}}{dy} \left(\frac{dx}{2}\right)$$

$$Dir z \tau_{ij} \Big|_x + \frac{dx}{2} = \tau_{xz} + \frac{d\tau_{xz}}{dz} \left(\frac{dx}{2}\right) \quad (3.30)$$

$$dA \Big|_x + \frac{dx}{2} = dy dz \quad (3.31)$$

II. Superficie izquierda

$$Dir (-x) \varphi_{ij} \Big|_x - \frac{dx}{2} = \varphi_{xx} - \frac{d\varphi_{xx}}{dx} \left(\frac{dx}{2}\right)$$

$$Dir (-y) \tau_{ij} \Big|_x - \frac{dx}{2} = \tau_{xy} - \frac{d\tau_{xy}}{dy} \left(\frac{dx}{2}\right)$$

$$Dir(-z) \tau_{ij} \Big|_x - \frac{dx}{2} = \tau_{xz} - \frac{d\tau_{xz}}{dz} \left(\frac{dx}{2}\right) \quad (3.32)$$

III. Superficie superior.

$$Dir x \tau_{ij} \Big|_y + \frac{dy}{2} = \tau_{yx} + \frac{d\tau_{yx}}{dx} \left(\frac{dy}{2}\right)$$

$$Dir y \varphi_{ij} \Big|_y + \frac{dy}{2} = \varphi_{yy} + \frac{d\varphi_{yy}}{dy} \left(\frac{dy}{2}\right)$$

$$Dir z \tau_{ij} \Big|_y + \frac{dy}{2} = \tau_{yz} + \frac{d\tau_{yz}}{dz} \left(\frac{dy}{2}\right) \quad (3.33)$$

IV. Superficie inferior

$$Dir(-x) \tau_{ij} \Big|_y - \frac{dy}{2} = \tau_{yx} - \frac{d\tau_{yx}}{dx} \left(\frac{dy}{2}\right)$$

$$Dir (-y) \varphi_{ij} \Big|_y - \frac{dy}{2} = \varphi_{yy} - \frac{d\varphi_{yy}}{dy} \left(\frac{dy}{2}\right)$$

$$Dir (-z) \tau_{ij} \Big|_y - \frac{dy}{2} = \tau_{yz} - \frac{d\tau_{yz}}{dz} \left(\frac{dy}{2}\right)$$

$$dA \Big|_y + \frac{dy}{2} = dx dz \quad (3.34)$$

V. Superficie frontal

$$Dir x \tau_{ij} \Big|_z + \frac{dz}{2} = \tau_{zx} + \frac{d\tau_{zx}}{dx} \left(\frac{dz}{2}\right)$$

$$Dir y \tau_{ij} \Big|_z + \frac{dz}{2} = \tau_{zy} + \frac{d\tau_{zy}}{dy} \left(\frac{dz}{2}\right)$$

$$Dir z \varphi_{ij} \Big|_{z + \frac{dz}{2}} = \varphi_{zz} + \frac{d\varphi_{zz}}{dz} \left(\frac{dz}{2}\right) \quad (3.35)$$

$$dA \Big|_{z + \frac{dz}{2}} = dx dy \quad (3.36)$$

VI. Superficie posterior

$$Dir(-x) \tau_{ij} \Big|_{z - \frac{dz}{2}} = \tau_{zx} - \frac{d\tau_{zx}}{dx} \left(\frac{dz}{2}\right)$$

$$Dir(-y) \tau_{ij} \Big|_{z - \frac{dz}{2}} = \tau_{zy} - \frac{d\tau_{zy}}{dy} \left(\frac{dz}{2}\right)$$

$$Dir(-z) \varphi_{ij} \Big|_{z - \frac{dz}{2}} = \varphi_{zz} - \frac{d\varphi_{zz}}{dz} \left(\frac{dz}{2}\right) \quad (3.37)$$

Al realizar la deducción de la ecuación de conservación de momento se obtuvieron las ecuaciones en las direcciones x, y, z en su forma más compacta.

$$Dir x: Bx - \frac{d\rho}{dx} + \frac{1}{3} \left(\mu \frac{d}{dx} \nabla \cdot \vec{\nabla} + \mu \nabla^2 u \right) = \rho \frac{Du}{Dt} \quad (3.38)$$

$$Dir y: By - \frac{d\rho}{dy} + \mu \left(\frac{1}{3} \frac{d}{dy} \nabla \cdot \vec{\nabla} + \mu \nabla^2 v \right) = \rho \frac{Dv}{Dt} \quad (3.39)$$

$$Dir z: Bz - \frac{d\rho}{dz} + \mu \left(\frac{1}{3} \frac{d}{dz} \nabla \cdot \vec{\nabla} + \mu \nabla^2 w \right) = \rho \frac{Dw}{Dt} \quad (3.40)$$

Estas tres ecuaciones se pueden expresar en una sola expresión.

La ecuación general de movimiento en su forma vectorial $\rho/\mu = cte$, fluido newtoniano, por unidad de volumen queda como:

$$\boxed{B - \nabla \rho + \mu \left[\frac{1}{3} \nabla (\nabla \cdot \vec{\nabla}) + \nabla^2 \vec{v} \right] = \rho \frac{D\vec{v}}{Dt}} \quad (3.41)$$

La ecuación de conservación de movimiento en coordenadas rectangulares en términos de gradientes de velocidad para un fluido newtoniano con $\mu = cte, \rho = cte$, por unidad de volumen, tomando como única fuerza de cuerpo la gravedad.

$$Dir x: \rho g_x - \frac{d\rho}{dx} + \mu \left(\frac{d^2 v_x}{dx^2} + \frac{d^2 v_x}{dy^2} + \frac{d^2 v_x}{dz^2} \right) = \frac{\rho}{gc} \left(\frac{dv_x}{dt} + v_x \frac{dv_x}{dx} + v_y \frac{dv_x}{dy} + v_z \frac{dv_x}{dz} \right) \quad (3.42)$$

$$Dir y: \rho g_y - \frac{d\rho}{dy} + \mu \left(\frac{d^2 v_y}{dx^2} + \frac{d^2 v_y}{dy^2} + \frac{d^2 v_y}{dz^2} \right) = \frac{\rho}{gc} \left(\frac{dv_y}{dt} + v_x \frac{dv_y}{dx} + v_y \frac{dv_y}{dy} + v_z \frac{dv_y}{dz} \right) \quad (3.43)$$

$$\text{Dir } z: \rho g z - \frac{d\rho}{dz} + \mu \left(\frac{d^2 v_z}{dx^2} + \frac{d^2 v_z}{dy^2} + \frac{d^2 v_z}{dz^2} \right) = \frac{\rho}{gc} \left(\frac{dv_z}{dt} + v_x \frac{dv_z}{dx} + v_y \frac{dv_z}{dy} + v_z \frac{dv_z}{dz} \right) \quad (3.44)$$

Con las mismas consideraciones pero en coordenadas cilíndricas la ecuación de conservación de movimiento en las direcciones x, y, z queda de la siguiente forma:

Componente r

$$\begin{aligned} \rho g r - \frac{d\rho}{dr} + \mu \left[\frac{d}{dr} \left(\frac{1}{r} \frac{d}{dr} (rvr) \right) + \frac{1}{r^2} \frac{d^2 vr}{d\theta^2} - \frac{2}{r^2} \frac{dv\theta}{d\theta} + \frac{d^2 vr}{dz^2} \right] \\ = \frac{\rho}{gc} \left(\frac{dvr}{dt} + vr \frac{dvr}{dr} + \frac{v\theta}{r} \frac{dvr}{d\theta} - \frac{v\theta^2}{r} + v_z \frac{dvr}{dz} \right) \end{aligned} \quad (3.45)$$

Componente θ

$$\begin{aligned} \rho g \theta - \frac{d\rho}{d\theta} + \mu \left[\frac{d}{dr} \left(\frac{1}{r} \frac{d}{dr} (rv\theta) \right) + \frac{1}{r^2} \frac{d^2 v\theta}{d\theta^2} + \frac{2}{r^2} \frac{dvr}{d\theta} + \frac{d^2 v\theta}{dz^2} \right] \\ = \frac{\rho}{gc} \left(\frac{dv\theta}{dt} + vr \frac{dv\theta}{dr} + \frac{v\theta}{r} \frac{dv\theta}{d\theta} - \frac{vr v\theta}{r} + v_z \frac{dv\theta}{dz} \right) \end{aligned} \quad (3.46)$$

Componente z

$$\rho g z - \frac{d\rho}{dz} + \mu \left[\frac{1}{r} \frac{d}{dr} \left(r \frac{dv_z}{dr} \right) + \frac{1}{r^2} \frac{d^2 v_z}{d\theta^2} + \frac{d^2 v_z}{dz^2} \right] = \frac{\rho}{gc} \left(\frac{dv_z}{dt} + vr \frac{dv_z}{dr} + \frac{v\theta}{r} \frac{dv_z}{d\theta} + v_z \frac{dv_z}{dz} \right) \quad (3.47)$$

3.2.3 Ecuación de conservación de la energía

El principio de la conservación de la energía (primera ley de la termodinámica) durante un proceso puede expresarse como:

$$\begin{aligned} [\text{Energía total que entra a un sistema}] - [\text{Energía total que sale del sistema}] \\ = [\text{cambio en la energía total del sistema}] \end{aligned}$$

O bien puede expresarse:

$$\varepsilon_{in} - \varepsilon_{out} = \Delta \varepsilon_{system} \quad (3.48)$$

$$Q_{in} - W_{out} = \Delta \varepsilon_{system} \quad (3.49)$$

La ecuación 3.48 es conocida como balance de energía y se aplica a cualquier tipo de sistema que se lleva a cabo por medio de cualquier proceso.

El éxito de esta relación depende de dos cosas fundamentales:

1. Conocer y comprender las diferentes formas de energía.
2. Conocer y comprender las diferentes formas de transferencia de energía.

1. La energía puede existir en distintas formas como:

Energía interna, energía cinética, energía potencial, energía eléctrica, energía, magnética.

2. Formas de transferencia de energía

Transferencia de calor, transferencia de trabajo, transferencia de masa.

La energía total de un fluido que no está fluyendo (sistema cerrado) se representa con la siguiente ecuación.

$$\varepsilon = U + k\varepsilon + P\varepsilon \quad (3.50)$$

Donde:

$\varepsilon =$ Energía total del sistema cerrado

$U =$ Energía interna del sistema

$k\varepsilon =$ Energía cinética

$P\varepsilon =$ Energía potencial

Por unidad de masa

$$[e = u + ke + Pe] \left(\frac{kJ}{kg}\right) \quad (3.51)$$

Se realizó el balance del principio de la ecuación de conservación de energía para un incremento t .

$$\Delta\varepsilon = [\varepsilon_1(t + \Delta t) + \varepsilon_2(t + \Delta t)] - [\varepsilon_1(t) + \varepsilon_3(t)] \quad (3.52)$$

Sustituyendo el $\Delta\varepsilon$ en la ecuación 3.48 y dividiendo en Δt , se tiene:

$$\frac{Q_{in}}{\Delta t} - \frac{W_{out}}{\Delta t} = \frac{\varepsilon_1(t + \Delta t) - \varepsilon_1(t)}{\Delta t} + \frac{\varepsilon_2(t + \Delta t)}{\Delta t} - \frac{\varepsilon_3(t)}{\Delta t} \quad (3.53)$$

$Q_{in} - W_{out} =$ almacenamiento de energía + energía de salida – energía de entrada.

La ecuación anterior es una forma útil del principio de conservación de energía para problemas que involucran volúmenes finitos y se pueden expresar como:

$$Q_{in} - W_{out} = \frac{d \int_v e dm_{out}}{dt} + \int_v e dm v_{rel} dA \quad (3.54)$$

$$Q_{in} - W_{out} = \frac{d(\int_v e \rho dv)}{dt} + \int_v e (\rho v_{rel} dA) \quad (3.55)$$

Donde

$$e = (ek + eint)$$

El teorema de la divergencia nos permite expresar la ecuación anterior de la siguiente forma:

$$Q_{in} - W_{out} = d \left(\int_v e \rho dv \right) + \int_v \text{div} (e \rho v_{rel}) dV \quad (3.56)$$

$$Q_{in} - W_{out} = \left[\frac{d \int_v e \rho}{dt} + \int_v \text{div} (e \rho v_{rel}) \right] dV \quad (3.57)$$

$$Q_{in} - W_{out} = \left[\frac{d \int_v e \rho}{dt} + \int_v \text{div} (e \rho v_{rel}) \right] dV \quad (3.58)$$

Para un volumen infinitesimal la ecuación anterior queda:

$$\frac{Q_{in} - W_{out}}{dV} = \frac{d(e\rho)}{dt} + \text{div} (e\rho v_{rel}) \quad (3.59)$$

$$Q_{in} - W_{out} = \left[e \frac{d\rho}{dt} + \rho \frac{de}{dt} \right] + e d \frac{(\rho v_{rel})}{dx} + \rho v_{rel} \frac{de}{dx} + e \frac{d(\rho v_{rel})}{dy} + \rho v_{rel} \frac{de}{dy} + e d \frac{(\rho v_{rel})}{dz} + \rho v_{rel} \frac{de}{dz} = 0 \quad (3.60)$$

Se factorizan términos y la ecuación queda:

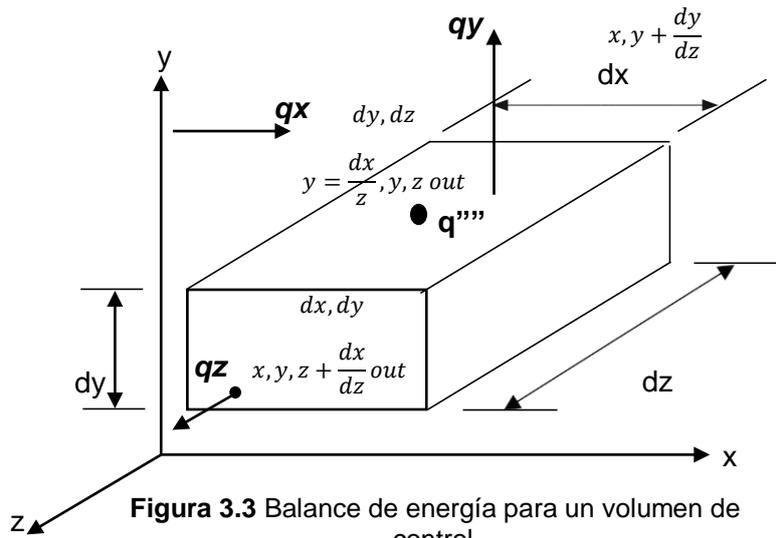
$$Q_{in} - W_{out} = e \left[\frac{d\rho}{dt} + d \frac{(\rho v_{rel})}{dx} + \frac{(\rho v_{rel})}{dy} + \frac{(\rho v_{rel})}{dz} \right] \quad (3.61)$$

$$\frac{Q_{in} - W_{out}}{dV} = \rho \left[\frac{de}{dt} + v_{rel} \cdot \nabla e \right] \quad (3.62)$$

$$\frac{De}{Dt} = \frac{de}{dt} + v_{rel} \cdot \nabla e \quad (3.63)$$

El balance del principio de la ecuación de conservación de energía para un incremento t queda representado por la ecuación:

$$\boxed{Q_{in} - W_{out} = \rho \frac{De}{Dt}} \quad (3.64)$$



De un balance de un fluido de energía para un volumen de control se obtuvo Q_{in} y W_{out} .

Q_{in}

$$\frac{Q_{in}}{dV} = \frac{dq_x}{dx} + \frac{dq_y}{dy} + \frac{dq_z}{dz} - q''' \quad (3.65)$$

$$\frac{Q_{in}}{dV} = \text{div}(\vec{q}) - q''' \quad (3.66)$$

Se sustituye esta ecuación en la ecuación de la energía y queda de la siguiente forma

$$\text{div}(\vec{q}) - q''' - \frac{W_{out}}{dV} = \rho \frac{De}{Dt} \quad (3.67)$$

$-W_{out}$

$$-W_{out} = \rho \frac{D}{Dt} \left(\frac{\bar{v}^2}{2} \right) - \rho \nabla \cdot \vec{v} + \mu \phi \quad (3.68)$$

Sustituyendo Q_{in} y $-W_{out}$ en la ecuación de la energía.

$$-\text{div}(\vec{q}) + \rho \frac{D}{Dt} \left(\frac{\bar{v}^2}{2} \right) - \rho \nabla \cdot \vec{v} + \mu \phi = \rho \frac{De}{Dt} \quad (3.69)$$

Despejando la energía se obtiene la ecuación de conservación de energía.

$$-\text{div}(\vec{q}) + q - \rho \nabla \cdot \vec{v} + \mu \phi = \rho \underbrace{\left[\frac{De}{Dt} \frac{D}{Dt} \left(\frac{\bar{v}^2}{2} \right) \right]}_{\frac{DI}{Dt}} \quad (3.70)$$

$$\rho \frac{DI}{Dt} = -\text{div}(\vec{q}) + q - \rho \nabla \cdot \vec{v} + \mu \phi^*$$

(3.71)

La ecuación de la energía también se puede presentar en términos de la entalpía

$$\rho \frac{DH}{Dt} - \frac{DP}{Dt} - \rho \nabla \cdot \vec{v} = -\nabla \cdot \vec{q} + q - \rho \nabla \cdot \vec{v} + \mu \phi$$

(3.72)

La ecuación de la conservación energía térmica en términos de la temperatura

$$\rho c_p \frac{DT}{dt} = \nabla \cdot (k \nabla T) + T B \frac{DP}{Dt} + q''' + \mu \phi$$

(3.73)

CAPÍTULO 4. FAMILIARIZACIÓN CON EL COMPILADOR FORTRAN Y COMPILACIÓN DE CODIGOS.

Para la realización de este trabajo fue necesario conocer el lenguaje de programación FORTRAN ya que en este lenguaje fueron realizados los códigos computacionales que se utilizaron para la evaluación térmica del block, en esta sección además de la familiarización con el lenguaje FORTRAN, se presenta el desarrollo de la compilación de los códigos computacionales.

Como parte final de este capítulo se presenta la elaboración de los gráficos de flux de calor y temperatura.

4.1 FAMILIARIZACIÓN CON EL COMPILADOR FORTRAN Y EL VISUALIZADOR TECPLOT

FORTRAN es un lenguaje de programación desarrollado en los 50 y aún se encuentra activamente utilizado, su nombre proviene de formula traductor en español traductor de fórmulas. Este lenguaje es utilizado principalmente en el ámbito de la computación científica y el cálculo numérico

Fortran es utilizado en su mayoría por la comunidad científica para la predicción numérica del tiempo, análisis de elementos finitos, dinámica de fluidos computacional, física computacional y química computacional.

Para escribir un programa en FORTRAN se puede utilizar cualquier editor de texto, el primer paso es escribir un código fuente y este debe llevar el sufijo de .for por ejemplo nombre.for, observar figura 4.1.

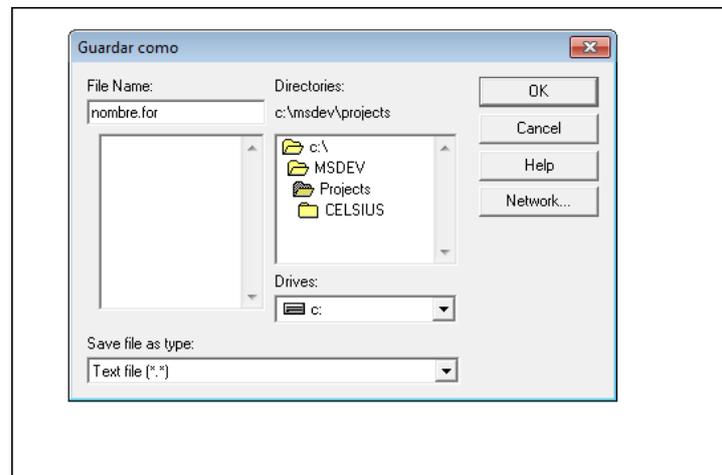


Figura 4.1 Nombre del programa en lenguaje FORTRAN.

Un programa en FORTRAN debe contener lo siguiente:

- Nombre del programa
- Declaración de las variables que se utilizarán en el programa
- El cuerpo del programa, donde se incluirán comandos específicos como por ejemplo el comando END que se utiliza para finalizar los programas.
- El programa puede contener subrutinas o funciones que realicen tareas específicas.

Algunas propiedades que se deben tomar en cuenta al programar en el lenguaje FORTRAN son:

- Todo lo que se escriba después de la letra C será tomado como comentario y se marcará de color verde
- Todas las etiquetas utilizadas dentro del programa serán marcadas de color rojo

- Los comandos estarán marcados de color azul
- La línea de programación será marcada de color verde
- Las líneas de cálculo serán marcadas de color negro
- El lenguaje FORTRAN no distingue letras mayúsculas de minúsculas por lo cual el carácter a y el carácter A son iguales para el lenguaje

En la figura 4.2 se observa un mapa conceptual de la estructura de un programa en lenguaje FORTRAN.

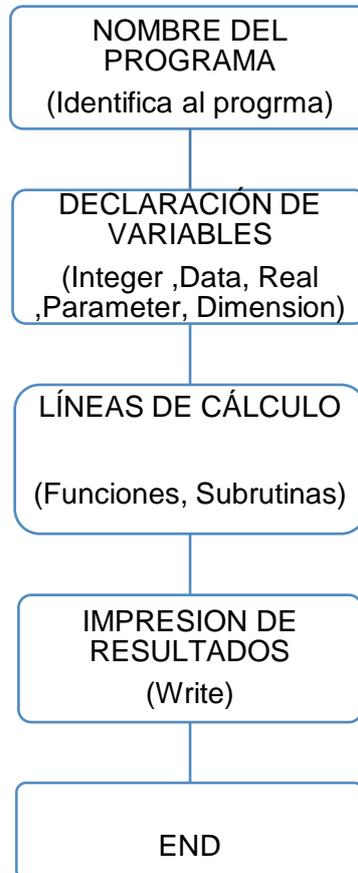


Figura 4.2 Mapa conceptual de la estructura de un programa en FORTRAN

Como parte de la familiarización con el lenguaje FORTRAN se realizó un ejercicio sencillo para comenzar (la suma de $x=5+A$ cuando $A=3$). Se declararon los números reales en notación científica y de doble precisión anteponiendo una D de la siguiente manera $x=5.0D+00$ y $A=3.0D+00$. La variable A se declaró como parámetro (PARAMETER (A=3.0D+00)).

Para la apertura de archivos se utiliza el comando Open, se declara dentro de un paréntesis el número de archivo seguido de la palabra File con el nombre del archivo y se cambia el .for por .dat, también se agrega el estatus de este archivo si en nuevo se agrega new, si

es un archivo que ya existe se agrega old, pero si es un archivo desconocido se agrega unknown. Ejemplo OPEN (1, FILE='nombre.dat', STATUS='unknown',access='sequential').

Para imprimir los resultados se utiliza el comando WRITE y dentro de un paréntesis se escribe el número de archivo y el formato de lectura o escritura. Ejemplo WRITE (1, 501). También se pueden imprimir los archivos en formato libre con el comando WRITE de la siguiente manera WRITE (*, *).

En la figura 4.3 se observa el código realizado en FORTRAN para la solución de la suma de $x=5+A$.

```
PROGRAM TEST1
IMPLICIT DOUBLE PRECISION (A-H,O-Z)
PARAMETER (A=3.0D+00)
C DIMENSION A(5,3)
C DATA (A=3.0D+00)
*****
CC APERTURA DE RESULTADOS
*****
OPEN (1,FILE='fil.dat',STATUS='unknown',access='sequential')
C OPEN (2,FILE='datos1.dat',STATUS='OLD',access='sequential')
C OPEN (3,FILE='fil.dat',STATUS='unknown',access='sequential')
*****
CC LINEAS DE CALCULO MATEMATICO
*****
X=5.0D+00+A
*****
CC IMPRIMIR RESULTADOS
*****
WRITE (1,501) A,X
WRITE (*,*) A,X
*****
CC FORMATO DE ESCRITURA
501 FORMAT (200 F 25.15)
CLOSE (1)
*****
CC FIN DE PROGRAMA
*****
END
```

Figura 4.3 Código $x=5+A$

Ya que se tiene el código escrito ahora se tiene que compilar para convertir el programa de código fuente a código máquina y así crear un ejecutable. El primer código es el que el compilador verifica que este bien escrito esto quiere decir que cumpla las reglas del lenguaje de programación de FORTRAN, después verifica que el código no contenga errores para después crear el archivo ejecutable.

Para poder observar gráficas o simulaciones de los resultados obtenidos es necesario utilizar un visualizador, el visualizador que se utilizó fue Tecplot. Tecplot es un programa que se utiliza para graficar y animar todas las simulaciones que se realicen, en él se pueden realizar gráficas XY, 2D y 3D.

En la figura 4.4 se observa una gráfica 3D que se realizó de un código de cálculo de coordenadas para X, Y, Z.

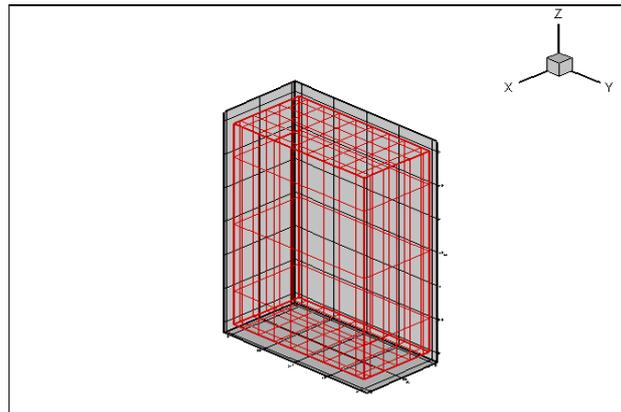


Figura 4.4 Grafico en 3D

4.2 COMPILACIÓN DE CÓDIGOS COMPUTACIONALES PARA LA TRANSFERENCIA DE CALOR EN UN BLOCK PARA CLIMA CÁLIDO.

Para la solución de la transferencia de calor en un block hueco se utilizaron códigos desarrollados en el CENIDET por el Profesor Jesús Perfecto Xamán Villaseñor en los cuales se modificaron parámetros específicos del problema, en la tabla 4.1 se muestran los parámetros que se modificaron.

Tabla 4.1. Parámetros específicos del problema

Parámetros al exterior de la habitación	Parámetros de la película reflectiva
Velocidad del viento al exterior	Reflectividad
Temperatura al exterior	Emisividad
G solar	

Los datos de parámetros al exterior de la habitación que se mostraron en la tabla 4.1 se modificaron para las 24 horas del día cálido y del día frío. Los datos de parámetros de la película reflectiva se modificaron para las películas de color gris, negro y blanco.

En la figura 4.1 se muestra la sección del código donde se modificaron los parámetros.

```

C IMPRIME INFORMACIÓN
PARAMETER (NIMPRIME=15)
PARAMETER (VARIABLEU=1, VARIABLEV=2, VARIABLEP=3, VARIABLET=4)
***** PARAMETROS CARACTERISTICOS DEL PROBLEMA *****
PARAMETER (VIS=1.817D-05, gravedad=9.81D+00, COND2=0.02563D+00)
C PARAMETROS DEL AIRE AL INTERIOR DE LA HABITACION
PARAMETER (hint1=6.13D+00, hint2=9.26D+00, Tint1=25.00D+00)
C PARAMETROS DEL AIRE AL EXTERIOR DE LA HABITACION
PARAMETER (Vext=3.4D+00, Text1=27.5D+00)
PARAMETER (REFLEC=0.33D+00, EMI=0.87D+00,
@ SIGMA=5.67D-08, GSOLAR=0.00D+00)
C TIPO REFLEC EMI
C CONCRETO 0.33 0.87
C NEGRO 0.05 0.88
C COMEX BLANCO 0.84 0.89

```

Figura 4.1 Parámetros al exterior de la habitación.

Se realizaron 6 simulaciones para cada hora del día cálido y 6 para cada hora del día frío de la Ciudad de Mérida, con las configuraciones que se mencionaron en el modelo físico (B-L-G, B-L-B, B-L-W, B-A-L-G, B-A-L-B, B-A-L-W). Las simulaciones se realizaron utilizando el compilador FORTRAN.

Cada simulación que se realizó tardo aproximadamente 1 hora en obtener los resultados necesarios para el análisis con aproximadamente 25000 y 32000 iteraciones, en la figura 17 se observa la pantalla de programación con el compilador FORTRAN, en el cual se observa que se llevaron a cabo 30715 iteraciones para obtener los resultados de una corrida.

```

Microsoft Developer Studio - EJERCICIO3 - (2 CAVITIES IN 2 MATERIALS CONV RADIAT.FOR)
File Edit View Insert Build Tools Window Help
nimprime
EJERCICIO3 - Win32 Debug
PROGRAM TWO CAVITIES 2 MATERIALS CONNECTIVE RADIATIVE
USE PORTLIB
IMPLICIT DOUBLE PRECISION (A-H, O-Z)
PARAMETER (NIMAX=250, NJMAX=250, ITERMAX=150000, EPSU=1D-9,
EPSV=1D-9, EPSF=1D-9, EPST=1D-9, EPSTR=1D-9,
DT=0.50D+00, DTR=8.0D+00)
C PARAMETROS GEOMÉTRICOS COMPUTACIONALES DEL BLOCK
PARAMETER (NX1
PARAMETER (NY1
PARAMETER (HX1
HX4
PARAMETER (HY1
PARAMETROS
PARAMETER (MYR
FACTORIYR=1.0D-
PARAMETER (MYR
*****
C SELECCIÓN DEL MET
** (SOLVER = LEL
** (SOLVER = LGS
PARAMETER (NSO
NSO
C NUMERO DE PAGADAS
PARAMETER (NPA
PARAMETER (NPA
C FACTORES DE RELAJACION

```

```

UMAX = 1.448374583830322E-002 UMAX = 2.131363985464648E-002
21.698688430649540 7.191359757488385 42.292671362173560
56.800000000000010
TIEMPO = 14.470566666666670
ITERR = 30715
ERRORP = 7.331061140313454E-014 ERRORU = 1.281768926757952E-014
ERRORV = 4.717355024848436E-014 ERRORT = 3.597647954734222E-010
ERRORTR = 1.000325429163771E-009
UMAX = 1.448374583939491E-002 UMAX = 2.13136398543488E-002
21.698688364311800 7.191359712296276 42.292671383402660
56.800000000000010
TIEMPO = 14.421083333333330
ITERR = 30715
ERRORP = 7.32786699678354E-014 ERRORU = 1.281186877981041E-014
ERRORV = 4.71525799227722E-014 ERRORT = 3.596022214231245E-010
ERRORTR = 9.998733380632833E-010
UMAX = 1.448374584048612E-002 UMAX = 2.131363985622338E-002
Pause - Please enter a blank line <to continue> or a DOS command.

```

Figura 4.2 Pantalla de programación con el compilador FORTRAN

Los datos que se obtuvieron con las simulaciones fueron flujos de calor al interior y al exterior del block, temperaturas en la superficie exterior del block y en la superficie interior del block.

En total se realizaron 288 simulaciones las cuales se llevaron a cabo en aproximadamente 1 mes. Las simulaciones se realizaron en el equipo -0-6 del laboratorio de simulación numérica del CENIDET con las siguientes características, procesador Intel® core™ i7-4790 cpu @ 3.60 GHz, con una memoria instalada (RAM) 32.0 GB y sistema operativo 64 bits.

4.3 ELABORACIÓN DE GRÁFICOS DE LOS RESULTADOS OBTENIDOS DEL PROBLEMA DE TRANSFERENCIA DE CALOR CONJUGADA EN UN BLOCK PARA CLIMA CÁLIDO DE MÉXICO

Para presentar los resultados obtenidos de la transferencia de calor conjugada en un block fue necesario utilizar un programa para realizar tablas y gráficas que ayudaran a realizar el análisis de los resultados.

Las gráficas se realizaron utilizando el programa OriginPro 8. OriginPro 8 es un programa informático orientado para ingenieros y científicos para el análisis de datos y para la realización de gráficas. Se pueden importar casi todos los formatos incluyendo hojas de cálculo de Excel y de texto sin formato. En la figura 4.3 se observa el logo del programa utilizado para realizar las gráficas.

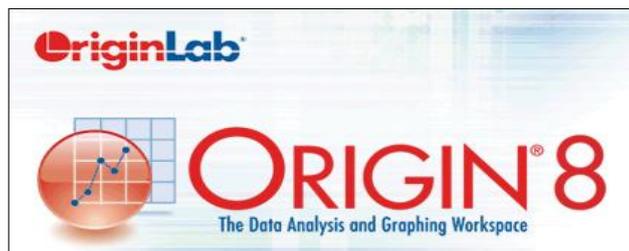


Figura 4.3 ORIGIN

Los análisis de datos que se pueden realizar en Origin incluyen estadísticas, procesamiento de señales, ajuste de curvas de análisis y pico. Las gráficas se pueden realizar en XY, 2D y 3D. En la figura 4.4 se observa una captura de pantalla de Origin 8 con una de las gráficas de temperaturas promedio realizada para los resultados.

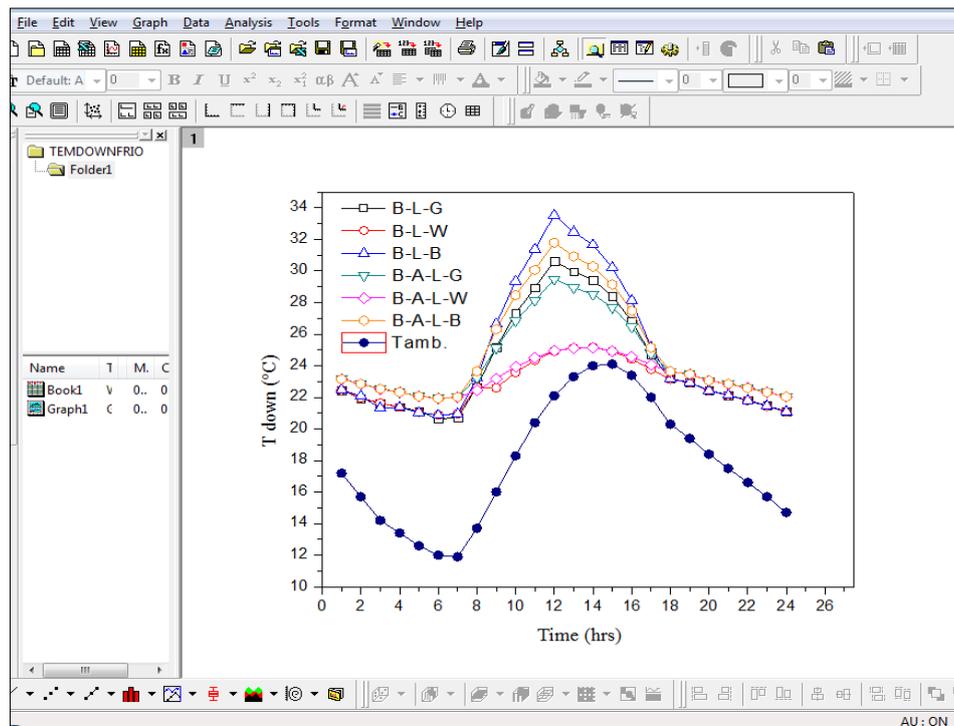


Figura 4.4 Captura de pantalla de Origin pro 8.

De los resultados obtenidos se calcularon temperaturas promedio al interior y al exterior como también flujos de calor promedio al interior y al exterior para poder realizar las tablas y las gráficas que se presentan en la sección de resultados.

Como parte del análisis se realizó el cálculo de las diferencias porcentuales que se agregó a las tablas de resultados. El cálculo de la diferencia porcentual se hizo para las 24 hrs del día cálido y del día frío para las configuraciones (B-L-B, B-LW, B-A-L-G, B-A-L-B, B-A-L-W) con respecto a la configuración que se tomó como referencia (B-L-G).

Ejemplo, la diferencia porcentual de la temperatura (33.34°C) que obtuvo la configuración B-L-B a las 9:00 hrs para el día cálido con respecto a la temperatura (31.28°C) de la configuración de referencia (B-L-G) a la misma hora queda representada de la siguiente forma:

$$Dif\ porcentual = \frac{33.34 - 31.28}{31.28} * 100$$

$$Dif\ porcentual = 6.60\%$$

Entonces se puede decir que la configuración B-L-B obtuvo una diferencia porcentual de 6.60% con respecto a la configuración de referencia (B-L-G).

CAPÍTULO 5. RESULTADOS

En esta sección presentan los resultados que se obtuvieron de las simulaciones realizadas del análisis de transferencia de calor conjugada (conducción, convección y radiación), para la evaluación térmica del block de dos huecos con distintas configuraciones para un clima cálido representativo de la república Mexicana. En los resultados se observa una comparación del comportamiento de las temperaturas al interior y al exterior del block, seleccionando así la configuración que brinde mayor confort térmico al interior de una habitación, al reducir o incrementar las ganancias de energía.

Los resultados se presentan en dos secciones, en la primera se muestran los resultados de temperaturas y flujo de calor para el día más cálido del año y en la segunda sección los resultados de temperatura y flujo de calor para el día más frío del año de la Ciudad de Mérida, Yucatán.

5.1 PARÁMETROS DE ESTUDIO

Dentro de los parámetros de estudio es importante mencionar que se eligió el block hueco como componente del techo debido a que este está compuesto de hormigón y funciona como un buen aislante térmico. El estudio se realizó para un block de 40 cm de largo por 15 cm de ancho con una loza de 5 cm de espesor, adicionalmente se utilizó para algunas configuraciones un aislante de poliestireno expandido de 2.5cm de ancho, las propiedades físicas de los materiales se muestran en la Tabla 5.1.

Tabla 5.1 Propiedades físicas de los materiales

Material	ρ (kg/m ³)	C_p (J/kg K)	λ (W/m K)
Block	2500	920	1.74
Loza	2240	880	1.7
Aislante	1050	1200	0.157

Las 6 configuraciones que se utilizaron para la evaluación del block se describen a continuación, block con loza en acabado gris , block con loza y película reflectiva blanca, block con loza y película reflectiva negra, block con aislante y loza acabado en gris , block con aislante, loza película reflectiva blanca, block con aislante, loza y película reflectiva negra. Las propiedades de las películas reflectivas y del acabado gris se pueden observar en la Tabla 5.2.

Tabla 5.2 Propiedades de películas reflectivas

Película	Reflectancia (ρ^*)	Emisividad (ϵ)
Gris	0.33	0.87
Blanca	0.84	0.89
Negra	0.05	0.88

El estudio se realizó para el clima de la ciudad de Mérida Yucatán del cual se tomaron datos del día más cálido y el día más frío del año 2015, para analizarlos las 24 horas del día. Los datos climáticos de la ciudad de Mérida que se utilizaron se presentan en la Tabla 5.3.

Se realizaron 6 simulaciones para cada hora del día cálido y 6 para cada hora del día frío de la Ciudad de Mérida, Yucatán con las configuraciones descritas en la sección de parámetros de estudio, cada simulación tardó aproximadamente 1 hora en obtener los resultados, en total se realizaron 288 simulaciones las cuales se llevaron a cabo en aproximadamente 1 mes. Para realizar las simulaciones se utilizó código desarrollado por

el Profesor Jesús Perfecto Xamán Villaseñor de CENIDET y se ocupó el equipo computer-0-6 del laboratorio de simulación numérica del CENIDET con las siguientes características, procesador Intel ® core ™ i7-4790 cpu @ 3.60 GHz, con una memoria instalada (RAM) 32.0 GB y sistema operativo 64 bits.

Tabla 5.3 Datos climáticos de la ciudad de Mérida, Yucatán (2015)

TIEMPO (hrs)	Día más cálido (28 de mayo)			Día más frío (12 de enero)		
	<i>V wind</i> (m/s)	Tamb (°C)	Gsol (w/m ²)	<i>V wind</i> (m/s)	Tamb (°C)	Gsol (w/m ²)
01:00	3.4	27.5	0	6	17.2	0
02:00	3	26.6	0	5.6	15.7	0
03:00	2.6	26.1	0	5	14.2	0
04:00	2.3	25.6	0	4	13.4	0
05:00	2.2	25.3	0	2.9	12.6	0
06:00	3.4	25.4	8	2.7	12	0
07:00	4.5	27.6	180	3.6	11.9	1
08:00	3.4	29.9	382	2.2	13.7	128
09:00	3.4	32.4	588	2	16	315
10:00	3.4	34.7	752	2.5	18.3	487
11:00	4.2	36.6	857	2.7	20.4	612
12:00	4	38.2	899	2.2	22.1	689
13:00	3.4	39.4	931	3.3	23.3	696
14:00	2.8	40.1	854	3.6	24	640
15:00	3.4	40.4	721	3.3	24.1	498
16:00	3.2	40	536	2.9	23.4	330
17:00	3.4	39	355	3.6	22	150
18:00	2.3	37.5	148	4.3	20.3	4
19:00	1.3	35.8	4	4.5	19.4	0
20:00	0.9	34.2	0	2.3	18.4	0
21:00	0.3	32.7	0	2	17.5	0
22:00	0.2	31.1	0	1.5	16.6	0
23:00	0.2	29.5	17.2	1	15.7	0
24:00	0.5	28	0	0.6	14.7	0

En la tabla 5.4 se muestran las configuraciones con la respectiva nomenclatura que se utilizara en el desarrollo de este reporte de resultados.

Tabla 5.4 Nomenclatura de las configuraciones

<i>CONFIGURACIONES</i>	<i>NOMENCLATURA</i>
Block con loza en acabado gris	B-L-G
Block con loza y película reflectiva blanca	B-L-W
Block con loza y película reflectiva negra	B-L-B
Block con aislante y loza en acabado gris	B-A-L-G
Block con aislante, loza y película reflectiva blanca	B-A-L-W
Block con aislante, loza y película reflectiva negra	B-A-L-B

5.2 COMPORTAMIENTO TERMICO DEL BLOCK CON DOS HUECOS

En esta sección se muestran los resultados del análisis de la transferencia de calor conjugada para el día más cálido y el día más frío del año.

5.2.1 Día cálido

Se analizaron las temperaturas de todo el año 2015 para la Ciudad de Mérida Yucatán, estas se obtuvieron del programa Meteonorm y se buscó la temperatura más alta registrada, la cual fue de 40.4 °C para el día 28 de mayo del 2015.

Temperaturas

En la figura 5.1 se muestran los resultados del comportamiento de las temperaturas promedio al interior del block en un día cálido para cada una de las configuraciones bajo estudio. Para el análisis se eligió como referencia la configuración B-L-G (sin aislante ni película reflectiva y con un acabo color gris que es muy común en techos convencionales de la República Mexicana). La temperatura promedio de esta configuración es de 28.6 °C, al compararla con la configuración B-L-B se observa que alcanza una temperatura promedio de 29.6 °C siendo mayor de la temperatura de la configuración de referencia en un 1.1°C. Esto debido a que su propiedad de reflectancia es muy baja (0.05) en comparación a la propiedad de reflectancia de la película gris (0.33). En la figura también se observa que la configuración B-L-W obtuvo una temperatura promedio de 26.6 °C siendo esta la temperatura más baja de esas configuraciones debido a las propiedades de la película reflectiva blanca ya que esta tiene una reflectancia de (0.84), reflejando así gran cantidad de calor.

Para las configuraciones en las cuales se utilizó aislante las temperaturas fueron las siguientes, la configuración B-A-L-G alcanzo una temperatura promedio de 27.8 °C en comparación con la configuración B-L-G que obtuvo una reducción de 0.8 °C debido al aislamiento. La configuración B-A-L-B presento una temperatura promedio de 28.6 °C siendo esta mayor a la anterior configuración debido a las propiedades reflectivas de la película negra pero en comparación con la configuración B-L-B sin aislante la temperatura se redujo 1°C , siendo la temperatura igual que la obtenida en la configuración de referencia.

En la configuración B-A-L-W la temperatura promedio que presento fue de 26.2 °C siendo esta la más baja en comparación de las temperaturas anteriores, disminuyendo 2.4 °C en comparación con la configuración de referencia.

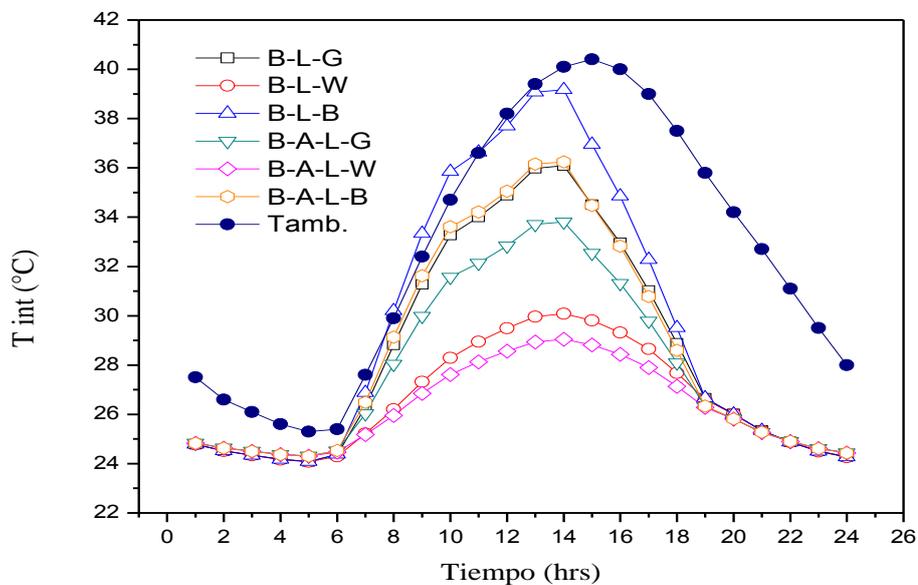


Figura 5.1 Comportamiento de las temperaturas promedio al interior del block para un día cálido.

En la tabla 5.5 se observan los resultados de las temperaturas de cada hora para las configuraciones sin aislante, así como también se muestran las diferencias porcentuales con respecto a la configuración de referencia. En la tabla 5.6 se muestran los resultados para las configuraciones con aislante.

En la tabla 5.5 se observa que la configuración de referencia B-L-G tiene una temperatura máxima de 36.09°C a las 14:00 hrs, en la configuración B-L-B se observa que a la misma hora esta alcanza una temperatura de 39.17°C incrementándose la temperatura 3.08°C esto debido a las propiedades que tiene la película negra, la diferencia porcentual que presenta esta configuración con respecto a la referencia es de 8.51%. En el caso de la

configuración B-L-W esta alcanzo una temperatura de 30.08 °C a la misma hora y se observa que la temperatura disminuyo 6.01°C teniendo una diferencia porcentual de 16.66%.

Tabla 5.5 Resultados del análisis de las temperaturas en las distintas configuraciones sin aislante al interior de un block en un día cálido

TIEMPO (hrs)	B-L-G (°C)	B-L-W (°C)	%	B-L-B (°C)	%
01:00	24.79	24.78	0.05	24.78	0.02
02:00	24.53	24.51	0.06	24.52	0.03
03:00	24.35	24.33	0.06	24.34	0.03
04:00	24.18	24.16	0.06	24.17	0.03
05:00	24.09	24.08	0.04	24.09	0.01
06:00	24.36	24.30	0.26	24.38	0.08
07:00	26.31	25.22	4.12	26.88	2.17
08:00	28.82	26.20	9.09	30.20	4.78
09:00	31.28	27.32	12.64	33.34	6.60
10:00	33.27	28.30	14.96	35.85	7.75
11:00	34.00	28.95	14.87	36.64	7.75
12:00	34.89	29.49	15.49	37.70	8.04
13:00	35.98	29.96	16.72	39.07	8.59
14:00	36.09	30.08	16.66	39.17	8.51
15:00	34.51	29.81	13.62	36.95	7.08
16:00	32.95	29.32	11.04	34.86	5.78
17:00	31.03	28.65	7.66	32.28	4.04
18:00	28.88	27.68	4.17	29.52	2.20
19:00	26.65	26.60	0.19	26.67	0.06
20:00	26.02	26.01	0.04	26.01	0.02
21:00	25.35	25.33	0.05	25.34	0.02
22:00	24.88	24.87	0.05	24.87	0.02
23:00	24.51	24.49	0.06	24.50	0.03
24:00	24.28	24.26	0.07	24.27	0.03

Tabla 5.6 Resultados de las temperaturas en las distintas configuraciones con aislante al interior de un block en un día cálido

TIEMPO (hrs)	B-A-L-G (°C)	%	B-A-L-B (°C)	%	B-A-L-W (°C)	%
01:00	24.83	0.17	24.83	0.18	24.83	0.17
02:00	24.64	0.46	24.64	0.45	24.63	0.43
03:00	24.50	0.62	24.50	0.63	24.50	0.61
04:00	24.37	0.79	24.37	0.80	24.37	0.78
05:00	24.31	0.92	24.31	0.90	24.30	0.87
06:00	24.51	0.61	24.53	0.71	24.47	0.45
07:00	26.03	1.05	26.49	0.69	25.18	4.30
08:00	28.03	2.74	29.13	1.07	25.96	9.94
09:00	29.98	4.14	31.62	1.10	26.84	14.17
10:00	31.56	5.15	33.61	1.00	27.62	16.99
11:00	32.13	5.51	34.21	0.62	28.13	17.28
12:00	32.83	5.91	35.05	0.46	28.56	18.15
13:00	33.70	6.34	36.15	0.48	28.94	19.56
14:00	33.81	6.33	36.24	0.41	29.04	19.54
15:00	32.54	5.70	34.48	-0.09	28.82	16.49
16:00	31.31	4.99	32.82	-0.40	28.43	13.73
17:00	29.78	4.02	30.78	-0.80	27.90	10.08
18:00	28.09	2.74	28.60	-0.98	27.14	6.05
19:00	26.32	1.24	26.34	-1.18	26.28	1.38
20:00	25.81	0.81	25.82	-0.79	25.81	0.81
21:00	25.28	0.27	25.28	-0.28	25.27	0.30
22:00	24.90	0.08	24.90	0.08	24.90	0.07
23:00	24.61	0.42	24.61	0.43	24.61	0.41
24:00	24.44	0.67	24.44	0.66	24.43	0.63

En la tabla 5.6 se observan los resultados para las configuraciones con aislantes, como se puede observar la configuración B-A-L-G alcanzo una temperatura máxima de 33.81°C a la misma hora que la configuración de referencia teniendo una disminución de 2.27°C y una diferencia porcentual de 6.33%, la disminución de la temperatura se debe a la capa de aislante de esta configuración.

En la configuración B-A-L-B se observa que alcanzo una temperatura máxima de 36.24 °C teniendo una diferencia de 0.15°C y una diferencia porcentual de 0.41% con respecto a la temperatura del block de referencia, pero comparándola con la configuración B-L-B sin aislante se observó una disminución de 2.93°C. La configuración B-A-L-W alcanzo una temperatura máxima de 29.04 °C, disminuyendo 7.05°C y con una diferencia porcentual de 19.54% con respecto a la configuración de referencia.

A continuación en la figura 5.2 se muestran los resultados del comportamiento de las temperaturas al exterior del block en el día cálido. La configuración de referencia B-L-G alcanzo una temperatura exterior máxima de 65.70 °C, para la configuración B-L-B la temperatura máxima alcanzada fue de 76.96 °C teniendo un aumento de 11.26°C, este aumento se debe a las propiedades físicas de la película negra, la configuración B-L-W mostro una disminución de 22.04°C teniendo una temperatura máxima de 43.66°C, esta disminución de calor se debe a las propiedades físicas de la película blanca que hacen que refleje la mayor cantidad de energía.

Para las configuraciones en las cuales se utilizó aislante, las temperaturas fueron las siguientes, la configuración B-A-L-G alcanzo una temperatura máxima de 66.45 °C se observa que la temperatura se incrementó 0.75°C con respecto a la de referencia, esto se debe a que el aislamiento térmico funciona como una barrera al flujo de calor, reteniendo la mayor cantidad de energía reflejándose en el aumento de temperatura sobre la superficie. En la configuración B-A-L-B la temperatura máxima fue de 77.87 °C

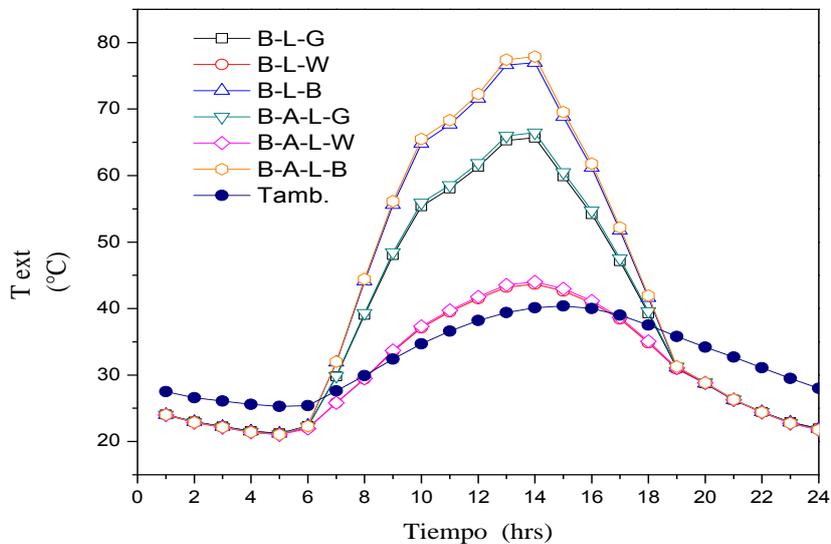


Figura 5.2 Comportamiento de las temperaturas promedio al exterior del block para un día cálido.

Fluxes de calor día cálido

En la figura 5.3 se observa el comportamiento de los fluxes de calor promedio en la superficie interna del block en todas las configuraciones con aislante y sin aislante. El flux de calor máximo se presenta a las 14:00 hrs del día cálido presentándose el flux mayor en la configuración B-L-B con un flux de $86.84 \text{ (} \frac{W}{m^2}\text{)}$. Para obtener las ganancias de flux de calor para todas las configuraciones se realizó una integración numérica por el método del trapecio, al realizar esta integración se observa que la configuración de referencia B-L-G tiene una ganancia de $600.41 \text{ (} \frac{Wh}{m^2}\text{)}$, la configuración B-L-B tiene una ganancia en el flux de $750.42 \text{ (} \frac{Wh}{m^2}\text{)}$ en comparación con la de referencia esta configuración tiene un aumento de $150.01 \text{ (} \frac{Wh}{m^2}\text{)}$ esto se debe a sus propiedades, ya que la reflectancia de la película negra es muy baja entonces absorbe la mayoría de la energía que recibe, la ganancia en el flux de la configuración B-L-W es de $313.04 \text{ (} \frac{Wh}{m^2}\text{)}$ en comparación con la configuración de referencia se observa que hay una disminución de $287.37 \text{ (} \frac{Wh}{m^2}\text{)}$ debido a que la reflectancia de la película blanca es alta y por lo tanto rechaza la mayor cantidad de energía que recibe.

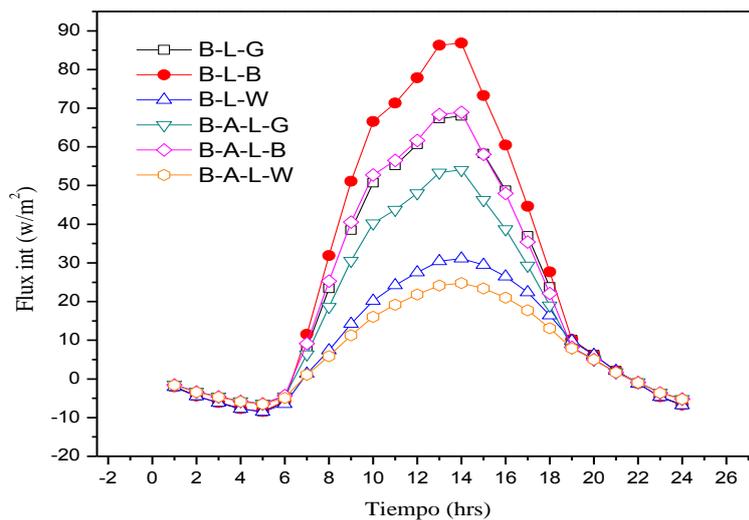


Figura 5.3 Comportamientos del flux de calor promedio en la superficie interna del block en un día cálido

Para las configuraciones con aislante los resultados con respecto a la ganancia de flux quedaron de la siguiente manera, en la configuración B-A-L-G se obtuvo una ganancia en el flux de calor de $475.24 \text{ (} \frac{Wh}{m^2}\text{)}$ siendo este menor al presentado en la configuración de referencia teniendo una disminución de $125.17 \text{ (} \frac{Wh}{m^2}\text{)}$ esto se debe al aislante ya que

funciona como una barrera al flujo de calor, la configuración B-A-L-B presenta una ganancia de 594 (wh/m^2) y por último la configuración B-A-L-W presentó una ganancia de 247.33 (wh/m^2).

Tabla 5.7 Resultados del análisis del flux de calor promedio al interior del block para las distintas configuraciones sin aislante en un día cálido.

TIEMPO (hrs)	B-L-G (w/m^2)	B-L-W (w/m^2)	%	B-L-B (w/m^2)	%
01:00	-1.96	-2.07	5.82	-2.02	2.92
02:00	-4.38	-4.51	2.90	-4.44	1.46
03:00	-6.03	-6.16	2.27	-6.09	1.14
04:00	-7.60	-7.74	1.91	-7.67	0.96
05:00	-8.43	-8.52	1.10	-8.45	0.23
06:00	-5.92	-6.52	9.99	-5.74	3.13
07:00	8.01	1.36	82.97	11.52	43.75
08:00	23.42	7.37	68.55	31.88	36.08
09:00	38.47	14.23	63.00	51.13	32.91
10:00	50.71	20.21	60.15	66.52	31.18
11:00	55.19	24.19	56.17	71.34	29.25
12:00	60.65	27.52	54.63	77.83	28.34
13:00	67.31	30.43	54.79	86.26	28.15
14:00	68.01	31.15	54.20	86.84	27.69
15:00	58.28	29.46	49.45	73.25	25.69
16:00	48.76	26.46	45.73	60.43	23.93
17:00	36.94	22.38	39.41	44.63	20.82
18:00	23.80	16.42	31.00	27.69	16.33
19:00	10.12	9.81	3.05	10.22	0.99
20:00	6.25	6.18	1.14	6.22	0.58
21:00	2.13	2.05	3.61	2.09	1.82
22:00	-1.11	-1.22	10.20	-1.16	4.75
23:00	-4.55	-4.68	2.84	-4.62	1.43
24:00	-6.68	-6.83	2.20	-6.76	1.10
q(t)	600.41 (wh/m^2)	313.04 (wh/m^2)		750.42 (wh/m^2)	

En la tabla 5.7 se muestran los resultados del análisis del flux de calor promedio para todas las horas al interior del block para las configuraciones sin aislante, también se muestran las diferencias porcentuales para cada una de ellas. La configuración de referencia B-L-G alcanza un flux máximo de 68.01 (W/m^2) a las 14:00 hrs, la configuración B-L-B presenta un flux máximo de 86.84 (W/m^2) a la misma hora teniendo un aumento de 18.83 (W/m^2) y una diferencia porcentual de 27.69% con respecto a la configuración de referencia, la configuración B-L-W tiene un flux máximo de 31.15 (W/m^2) se observa una disminución de 36.86 (W/m^2) y una diferencia porcentual de 54.20%.

Tabla 5.8 Resultados del análisis del flux de calor promedio al interior del block para las distintas configuraciones con aislante en un día cálido.

TIEMPO (hrs)	B-A-L-G (W/m^2)	%	B-A-L-W (W/m^2)	%	B-A-L-B (W/m^2)	%
01:00	-1.49	23.71	-1.57	19.68	-1.54	21.51
02:00	-3.32	24.30	-3.41	22.13	-3.36	23.21
03:00	-4.56	24.33	-4.66	22.65	-4.61	23.49
04:00	-5.75	24.34	-5.86	22.93	-5.80	23.64
05:00	-6.38	24.36	-6.49	23.06	-6.43	23.71
06:00	-4.46	24.64	-4.91	17.19	-4.33	26.98
07:00	6.35	20.73	1.08	86.50	9.13	13.93
08:00	18.61	20.57	5.85	75.01	25.31	8.06
09:00	30.54	20.61	11.31	70.61	40.57	5.47
10:00	40.24	20.64	16.05	68.35	52.76	4.04
11:00	43.72	20.79	19.18	65.25	56.48	2.33
12:00	48.05	20.77	21.82	64.02	61.63	1.63
13:00	53.39	20.68	24.16	64.11	68.37	1.57
14:00	54.02	20.57	24.77	63.57	68.93	1.35
15:00	46.24	20.66	23.40	59.86	58.09	0.34
16:00	38.72	20.60	21.02	56.88	47.96	1.64
17:00	29.33	20.60	17.78	51.88	35.43	4.10
18:00	18.97	20.29	13.09	44.99	22.07	7.29
19:00	8.11	19.85	7.86	22.31	8.19	19.06
20:00	5.03	19.61	4.97	20.56	5.00	20.09
21:00	1.72	19.17	1.66	22.12	1.69	20.65
22:00	-0.87	21.22	-0.96	13.81	-0.92	17.49

23:00	-3.54	22.38	-3.63	20.24	-3.58	21.30
24:00	-5.15	22.93	-5.26	21.29	-5.21	22.10
q(t)	475.24 (Wh/m^2)		247.33 (Wh/m^2)		594 (Wh/m^2)	

En la tabla 5.8 se observan los resultados del análisis de flux de calor promedio para todas las horas al interior del block en un día cálido para las configuraciones con aislante. La configuración B-A-L-G alcanzo un flux máximo de $54.02 (W/m^2)$ para las 14:00 hrs teniendo una disminución de $13.99 (W/m^2)$ y una diferencia porcentual de 20.57 % con respecto a la configuración de referencia, la configuración B-A-L-B obtuvo un flux máximo de $68.93 (W/m^2)$ se observa que a pesar de tener una película negra el aumento con respecto a la configuración de referencia es mínima siendo de $0.92 (W/m^2)$ con una diferencia porcentual de 1.35% por otro lado la configuración B-A-L-W presento un flux de $24.77 (W/m^2)$ observándose una disminución de $43.24 (W/m^2)$ y una diferencia porcentual de 63.57% con respecto a la configuración de referencia.

5.2.2 Día frío

Se analizaron las temperaturas de todo el año 2015 para la Ciudad de Mérida Yucatán, estas se obtuvieron del programa Meteonorm y se buscó la temperatura más baja registrada, la cual fue de 11.9 °C para el día 12 de enero del 2015.

Temperaturas

En la figura 5.4 se muestran los resultados del comportamiento de las temperaturas promedio al interior del block en un día frío para cada una de las configuraciones bajo estudio. La configuración B-L-G se tomó como referencia debido a que es la configuración con características que un techo convencional de la República Mexicana presenta, esta configuración alcanzo una temperatura promedio al interior de 24.13 °C en las configuraciones en las cuales se utilizó película reflectiva para la configuración B-L-B el resultado de la temperatura promedio al interior fue de 24.87 °C siendo está muy similar a la configuración de referencia con un aumento en la temperatura de 0.74 °C , la configuración B-L-W obtuvo una temperatura promedio de 22.78 °C teniendo una disminución en la temperatura de 1.35 °C debido a las propiedades de la película reflectiva blanca que hacen que la mayor parte de la energía sea rechazada.

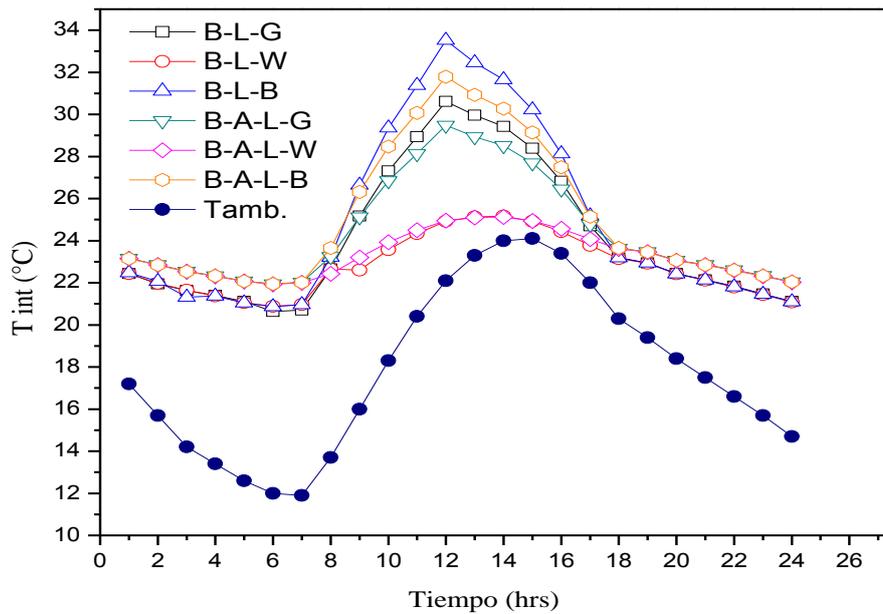


Figura 5.4 Comportamiento de las temperaturas promedio al interior del block para un día frío.

En las configuraciones en las cuales se utilizó aislante las temperaturas promedios fueron las siguientes, para la configuración B-A-L-G la temperatura promedio que se obtuvo fue de 24.42 °C siendo esta temperatura similar a la configuración B-L-B y observándose un incremento mínimo en la temperatura en comparación con la temperatura que obtuvo la configuración de referencia, esto debido a que llega poca radiación y no logra observar un cambio significativo. La temperatura promedio que obtuvo la configuración B-A-L-B fue de 25.01°C teniendo un aumento ya que debido a las propiedades de la película negra absorbe la mayoría de energía que recibe del exterior. La temperatura que obtuvo la configuración B-A-L-W fue de 23.32°C, en los resultados obtenidos para las configuraciones con aislante se observa un incremento en las temperaturas con respecto a las configuraciones sin aislante y esto se debe a que el aislante absorbe la energía reteniendo así la temperatura al interior del block.

En la tabla 5.9 se observan los resultados de las temperaturas promedio al interior del block en un día frío para todas las horas en las configuraciones sin aislante, así como también se observan las diferencias porcentuales para cada una de ellas con respecto a la configuración de referencia.

Las temperaturas máximas de las configuraciones sin aislante fueron las siguientes, la configuración B-L-G obtuvo una temperatura máxima de 30.62 °C a las 14:00 hrs, la configuración B-L-B a esa misma hora presentó una temperatura máxima de 33.53 °C observándose un aumento de 2.91°C y una diferencia porcentual de 9.5%. La configuración B-L-W presentó una temperatura máxima de 25.17 °C observándose una

reducción en la temperatura de 5.55°C con respecto a la configuración de referencia y obteniendo una diferencia porcentual de 14.49% estos resultados se deben a las propiedades de la película blanca.

Tabla 5.9 Resultados de las temperaturas en las distintas configuraciones sin aislante al interior de un block en un día frío.

TIEMPO (hrs)	B-L-G (°C)	B-L-W (°C)	%	B-L-B (°C)	%
01:00	22.44	22.44	0.02	22.48	0.22
02:00	21.95	21.97	0.11	22.08	0.57
03:00	21.63	21.64	0.05	21.31	1.47
04:00	21.40	21.37	0.12	21.37	0.16
05:00	21.11	21.06	0.26	21.05	0.30
06:00	20.64	20.88	1.18	20.87	1.14
07:00	20.71	20.96	1.21	20.96	1.22
08:00	22.65	22.65	0.00	23.21	2.48
09:00	25.17	22.60	10.20	26.65	5.88
10:00	27.31	23.58	13.68	29.36	7.48
11:00	28.94	24.34	15.90	31.38	8.43
12:00	30.62	24.93	18.58	33.53	9.50
13:00	29.96	25.12	16.13	32.46	8.37
14:00	29.43	25.17	14.49	31.66	7.56
15:00	28.39	24.92	12.23	30.22	6.44
16:00	26.82	24.43	8.91	28.13	4.88
17:00	24.70	23.77	3.76	25.18	1.94
18:00	23.18	23.14	0.17	23.19	0.02
19:00	22.95	22.93	0.07	22.94	0.03
20:00	22.44	22.42	0.09	22.43	0.05
21:00	22.14	22.12	0.10	22.13	0.05
22:00	21.84	21.79	0.20	21.81	0.15
23:00	21.47	21.45	0.13	21.46	0.07
24:00	21.11	21.08	0.15	21.10	0.07

En la tabla 5.10 se observan los resultados de la temperatura en las configuraciones con aislante, las temperaturas fueron las siguientes, la configuración B-A-L-G presento una temperatura máxima de 29.48°C y una diferencia porcentual con respecto a la referencia de 3.73 % se observó una disminución en la temperatura de 1.14°C, la configuración B-A-

L-B presento una temperatura de 31.79 °C y una diferencia porcentual de 3.83% presentando un aumento en la temperatura de 1.17 °C con respecto a la referencia. La temperatura máxima de la configuración B-A-L-W fue de 25.13 °C y una diferencia porcentual de 14.60°C con respecto a la configuración de referencia, se observa una disminución de temperatura de 5.49°C.

Tabla 5.10 Resultados de las temperaturas en las distintas configuraciones con aislante al interior de un block en un día frío.

TIEMPO (hrs)	B-A-L-G (°C)	%	B-A-L-W (°C)	%	B-A-L-B (°C)	%
01:00	23.16	3.21	23.15	3.159	23.15	3.18
02:00	22.86	4.13	22.85	4.082	22.85	4.11
03:00	22.55	4.22	22.53	4.165	22.54	4.19
04:00	22.33	4.35	22.32	4.281	22.32	4.31
05:00	22.08	4.59	22.07	4.517	22.07	4.55
06:00	21.95	6.36	21.93	6.280	21.94	6.32
07:00	22.03	6.37	22.01	6.269	22.02	6.34
08:00	23.24	2.60	22.43	0.979	23.65	4.42
09:00	25.13	0.13	23.20	7.817	26.32	4.57
10:00	26.84	1.72	23.93	12.388	28.47	4.24
11:00	28.14	2.78	24.50	15.339	30.07	3.92
12:00	29.48	3.73	24.95	18.531	31.79	3.83
13:00	28.94	3.40	25.10	16.218	30.93	3.23
14:00	28.52	3.10	25.13	14.606	30.28	2.89
15:00	27.69	2.45	24.94	12.162	29.15	2.66
16:00	26.45	1.39	24.57	8.394	27.49	2.49
17:00	24.77	0.29	24.08	2.505	25.14	1.79
18:00	23.65	1.99	23.62	1.868	23.65	2.01
19:00	23.47	2.29	23.46	2.239	23.47	2.26
20:00	23.07	2.81	23.06	2.745	23.06	2.78
21:00	22.86	3.24	22.85	3.172	22.85	3.21
22:00	22.61	3.54	22.59	3.455	22.60	3.50
23:00	22.34	4.02	22.32	3.930	22.33	3.98
24:00	22.05	4.44	22.03	4.334	22.04	4.39

En la figura 5.5 se muestran los resultados obtenidos de las temperaturas promedio para la superficie exterior del block en un día frío para todas las configuraciones con y sin aislante. La temperatura máxima exterior que presenta la configuración de referencia es de 45.64 °C, la configuración con película negra B-L-B obtuvo una temperatura máxima de 56.31 °C se observa un aumento en la temperatura de 10.67°C este aumento se debe a las propiedades de la película negra, por otro lado la película blanca mostro un buen resultado disminuyendo 20.03 °C teniendo una temperatura de 25.61 °C gracias a las propiedades físicas de la película blanca que hacen que esta refleje la mayor cantidad de energía que recibe del exterior.

Para las configuraciones en las cuales se utilizó aislante los resultados de temperaturas fueron los siguientes, la configuración B-A-L-G obtuvo una temperatura máxima de 46.09°C observándose un aumento mínimo en la temperatura de 0.45°C con respecto a la configuración de referencia, la configuración B-A-L-B mostro una temperatura máxima de 56.96°C siendo esta similar a la configuración B-L-B, la configuración B-A-L-W obtuvo una temperatura de 25.62 °C mostrando un comportamiento similar a la configuración B-L-W, las configuraciones con aislante presentan un pequeño aumento en la temperatura y esto se debe a que el aislante funciona como barrera reteniendo la temperatura al interior del block.

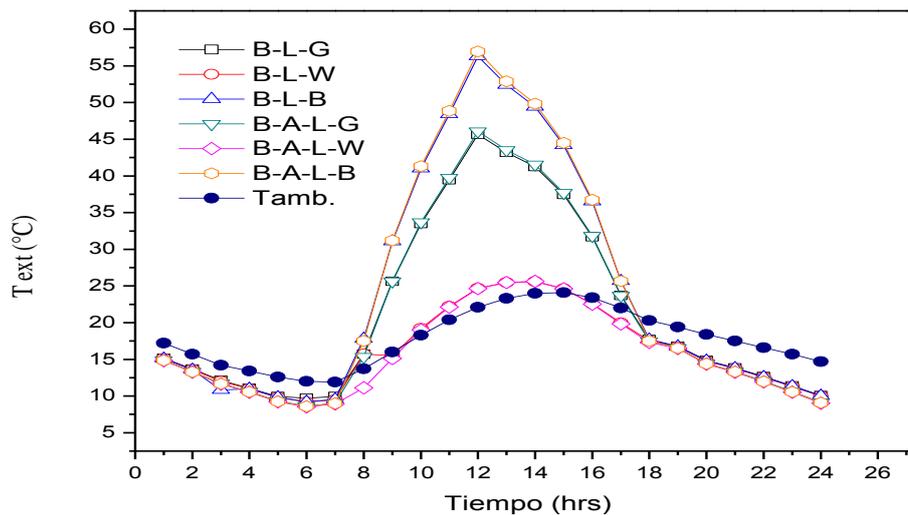


Figura 5.5 Comportamiento de las temperaturas promedio al exterior del block para un día frío.

Fluxes de calor día frío

En la figura 5.6 se observa el comportamiento de los fluxes de calor promedio en la superficie interna del block en todas las configuraciones con aislante y sin aislante para un día frío. El flux de calor máximo se observa a las 12:00 hrs en la configuración B-L-B con un flux máximo de $52.28 \text{ (} \frac{W}{m^2} \text{)}$. Para obtener las ganancias flux de calor para todas las configuraciones se realizó una integración numérica por el método del trapecio, al realizar esta integración se observa que la configuración de referencia B-L-G tiene una ganancia en el flux de calor de $574.53 \text{ (} \frac{Wh}{m^2} \text{)}$. La configuración B-L-B presento una ganancia en el flux de calor de $668.98 \text{ (} \frac{Wh}{m^2} \text{)}$ teniendo un aumento de $94.45 \text{ (} \frac{Wh}{m^2} \text{)}$ con respecto a la configuración de referencia. La configuración con película blanca B-L-W obtuvo una ganancia en el flux de $467.32 \text{ (} \frac{Wh}{m^2} \text{)}$ teniendo una disminución de $107.21 \text{ (} \frac{Wh}{m^2} \text{)}$ con respecto a la referencia. Se observa que la configuración con mayor ganancia de energía con respecto a la configuración de referencia es en la cual se utiliza película negra, esto es debido a las propiedades físicas de la película negra.

Las configuraciones en las cuales se utilizó aislante presentaron los siguientes resultados, la configuración B-A-L-G presento una ganancia de flux de calor de $431.74 \text{ (} \frac{Wh}{m^2} \text{)}$ teniendo una disminución de $142.79 \text{ (} \frac{Wh}{m^2} \text{)}$ con respecto a la configuración de referencia, esto se debe a que el aislante sirve como barrera y evita que parte del calor que recibe del exterior pase al interior del block. La configuración B-A-L-B presento una ganancia de flux de $509.04 \text{ (} \frac{Wh}{m^2} \text{)}$ con una disminución $65.49 \text{ (} \frac{Wh}{m^2} \text{)}$ con respecto a la configuración de referencia. La configuración B-A-L-W presento una ganancia de $355.40 \text{ (} \frac{Wh}{m^2} \text{)}$ teniendo una disminución en la ganancia del flux de $219.13 \text{ (} \frac{Wh}{m^2} \text{)}$ con respecto a la configuración de referencia, esto a pesar de tener aislante ya que al tener película blanca absorbe la gran mayoría de energía que recibe del exterior.

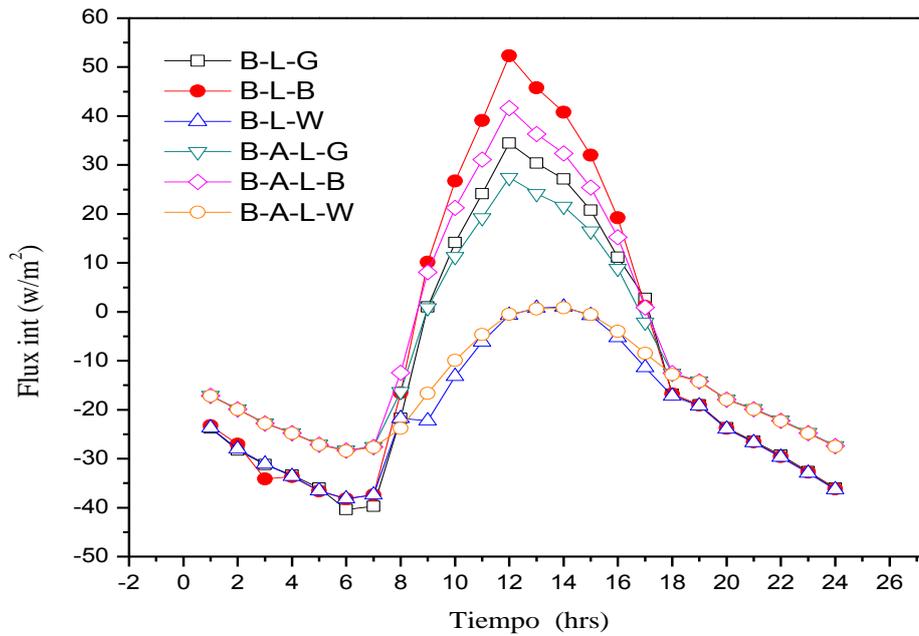


Figura 5.6 Comportamiento del flux de calor promedio en la superficie interna del block en un frío. En la tabla 5.11 se muestran los resultados de los flux de calor promedio al interior de un block para las distintas configuraciones sin aislante en un día frío, también se muestran las diferencias porcentuales con respecto a la configuración de referencia para cada una de las configuraciones. La configuración de referencia B-L-G presento un flux de calor máximo de $34.45 \text{ (W/m}^2\text{)}$ a las 12:00 hrs, la configuración con película negra B-L-B presento un flux de calor máximo $52.28 \text{ (W/m}^2\text{)}$ teniendo una diferencia de $17.83 \text{ (W/m}^2\text{)}$ con respecto a la configuración estándar y una diferencia porcentual de 51.78%, mientras que la configuración con película blanca B-L-W presento una diferencia porcentual de 96.26% con respecto a la referencia teniendo un flux de calor máximo de $1.02 \text{ (W/m}^2\text{)}$.

Tabla 5.11 Resultados del análisis del flux de calor promedio al interior del block para las distintas configuraciones sin aislante en un día frío.

TIEMPO (hrs)	B-L-G (W/m^2)	B-L-W (W/m^2)	%	B-L-B (W/m^2)	%
01:00	-23.74	-23.69	0.19	-23.29	1.89
02:00	-28.24	-28.01	0.79	-27.07	4.13
03:00	-31.18	-31.08	0.30	-34.13	9.47
04:00	-33.34	-33.57	0.70	-33.64	0.92
05:00	-36.00	-36.52	1.43	-36.60	1.65
06:00	-40.41	-38.14	5.60	-38.23	5.40
07:00	-39.74	-37.41	5.85	-37.41	5.87
08:00	-21.74	-21.74	0.00	-16.53	23.95
09:00	1.03	-22.22	2257.53	10.11	881.50
10:00	14.18	-13.18	192.94	26.72	88.35
11:00	24.14	-6.13	125.37	39.09	61.91
12:00	34.45	-0.65	101.89	52.28	51.78
13:00	30.39	0.76	97.50	45.76	50.58
14:00	27.16	1.02	96.26	40.80	50.25
15:00	20.79	-0.74	103.55	32.00	53.91
16:00	11.17	-5.26	147.12	19.19	71.84
17:00	2.77	-11.37	509.74	1.11	60.12
18:00	-16.82	-17.18	2.15	-16.78	0.27
19:00	-19.01	-19.15	0.77	-19.08	0.39
20:00	-23.71	-23.91	0.82	-23.81	0.41
21:00	-26.46	-26.67	0.80	-26.56	0.40
22:00	-29.28	-29.69	1.40	-29.58	1.00
23:00	-32.65	-32.91	0.79	-32.78	0.40
24:00	-36.01	-36.30	0.80	-36.15	0.40
q(t)	574.53 (Wh/m^2)	467.32 (Wh/m^2)		668.98 (Wh/m^2)	

Las configuraciones en las cuales se utilizó aislante obtuvieron los siguientes resultados mostrados en la tabla 5.12, la configuración B-A-L-G presento un flux de calor máximo de 27.45 (W/m^2) observándose una diferencia de 8 (W/m^2) con respecto a la configuración de referencia y teniendo una diferencia porcentual de 27.45%, la configuración B-A-L-B

presento un flux de calor máximo de $41.63 \text{ (} \frac{W}{m^2} \text{)}$ teniendo una diferencia de $7.18 \text{ (} \frac{W}{m^2} \text{)}$ con respecto a la configuración de referencia y una diferencia porcentual de 20.85%, la configuración B-A-L-W presento un flux máximo de $0.81 \text{ (} \frac{W}{m^2} \text{)}$ y una diferencia porcentual de 97.03%.

Tabla 5.12 Resultados del análisis del flux de calor promedio al interior del block para las distintas configuraciones con aislante en un día frío.

TIEMPO (hrs)	B-A-L-G (°C)	%	B-A-L-B (°C)	%	B-A-L-W (°C)	%
01:00	-17.08	28.05	-17.13	27.85	-17.18	27.65
02:00	-19.84	29.75	-19.89	29.57	-19.94	29.38
03:00	-22.72	27.13	-22.78	26.94	-22.84	26.76
04:00	-24.72	25.83	-24.79	25.64	-24.85	25.45
05:00	-27.02	24.94	-27.10	24.73	-27.18	24.52
06:00	-28.25	30.08	-28.33	29.89	-28.41	29.70
07:00	-27.53	30.72	-27.58	30.61	-27.72	30.25
08:00	-16.28	25.10	-12.47	42.62	-23.79	9.45
09:00	0.82	20.08	8.07	683.82	-16.66	1717.72
10:00	11.30	20.31	21.28	49.99	-9.91	169.83
11:00	19.22	20.40	31.09	28.78	-4.63	119.18
12:00	27.45	20.30	41.63	20.85	-0.50	101.47
13:00	24.14	20.57	36.33	19.54	0.61	98.01
14:00	21.56	20.62	32.37	19.21	0.81	97.03
15:00	16.52	20.54	25.41	22.24	-0.57	102.73
16:00	8.89	20.41	15.27	36.71	-3.98	135.63
17:00	-2.10	175.77	0.88	68.31	-8.50	406.54
18:00	-12.54	25.42	-12.51	25.62	-12.81	23.85
19:00	-14.14	25.58	-14.20	25.31	-14.25	25.03
20:00	-17.87	24.65	-17.94	24.35	-18.01	24.06
21:00	-19.80	25.15	-19.88	24.86	-19.95	24.58
22:00	-22.13	24.42	-22.22	24.14	-22.30	23.86
23:00	-24.66	24.49	-24.75	24.21	-24.84	23.93
24:00	-27.34	24.08	-27.44	23.81	-27.54	23.53
q(t)	431.74 $(\frac{wh}{m^2})$		509.04 $(\frac{wh}{m^2})$		355.40 $(\frac{wh}{m^2})$	

5.3 RESUMEN Y COMPARACIÓN DE RESULTADOS

En esta sección se muestra un resumen y una comparación de los resultados de flux de calor promedio obtenido de todas las configuraciones para el día cálido y para el día frío. El flux de calor promedio total para cada hora se obtuvo de una integración por el método del trapecio (5.1)

$$\int_{1:00}^{24:00} q(t) = \frac{\Delta t}{2} [q_{t=1:00} + \sum_{2:00}^{t=23:00} 2 * q(t) + (q_t = 24:00)] \quad (5.1)$$

En resumen los resultados del día cálido, se eligió como referencia la configuración B-L-G ya que al ser una configuración sin película reflectiva ni aislante y con un acabado en gris presenta las características de un techo convencional de la República Mexicana, esta configuración presento un flux promedio de $600.41 \text{ (} \frac{wh}{m^2} \text{)}$, la configuración B-L-B presento un flux de calor promedio de $750.42 \text{ (} \frac{wh}{m^2} \text{)}$ teniendo así una ganancia de energía de 24.98% con respecto a la referencia, esto es debido a que la película negra tiene la propiedad de absorber la mayor cantidad de energía aumentando así la cantidad de flux de calor, la configuración B-L-W mostro un comportamiento contrario a la configuración B-L-B ya que presento un flux de calor promedio de $313.04 \text{ (} \frac{wh}{m^2} \text{)}$ teniendo una disminución en el flux de 47.86% con respecto a la configuración de referencia, esto se debe a las propiedades físicas de la película blanca ya que al tener un nivel alto de reflectancia rechaza la gran mayoría de energía que recibe del exterior. Las configuraciones en las cuales se utilizó aislante obtuvieron los siguientes resultados, la configuración B-A-L-G obtuvo un flux de calor promedio de $475.24 \text{ (} \frac{wh}{m^2} \text{)}$ con respecto a la configuración de referencia esta obtuvo una reducción de 20.84% en ganancia de energía, en el caso de la configuración B-A-L-B se obtuvo un flux de calor promedio de $594 \text{ (} \frac{wh}{m^2} \text{)}$ disminuyendo 1.06% con respecto a la referencia, la configuración B-A-L-W mostro mejores resultados ya que obtuvo un flux de calor promedio de $247.33 \text{ (} \frac{wh}{m^2} \text{)}$ y con respecto a la configuración de referencia mostro una reducción de 58.80%.

Para el día frío se tomó la misma configuración como referencia que en el día cálido, esta configuración B-L-G obtuvo una ganancia de flux promedio de $574.53 \text{ (} \frac{wh}{m^2} \text{)}$. Las configuraciones con película reflectiva presentaron los siguientes resultados, la configuración B-L-B obtuvo un flux de calor promedio de $668.98 \text{ (} \frac{wh}{m^2} \text{)}$ con respecto a la referencia se observa que obtuvo una ganancia en el flux de calor de 16.43% esto se debe a las propiedades físicas de la película negra ya que absorbe más cantidad de calor del

exterior, la configuración B-L-W mostro una ganancia de flux menor a la anterior configuración con un flux de calor de $467.32 (wh/m^2)$ con una disminución de 18.66% . Las configuraciones en las cuales se utilizó aislante presentaron los siguientes resultados, la configuración B-A-L-G presento una ganancia en el flux de calor promedio de $431.74 (wh/m^2)$ con respecto a la referencia representa una disminución de 24.85%.La configuración B-A-L-B presento un flux de calor promedio de $509.04 (wh/m^2)$ mostrando una disminución con respecto a la referencia de 11.39%.La configuración B-A-L-W presento un flux de calor promedio de $355.40(wh/m^2)$ presentando una disminución de 38.14% con respecto a la referencia.

En la tabla 5.13 se muestran los valores de las cargas de calentamiento y enfriamiento para todas las configuraciones en un día cálido y en un día frío. En la tabla se observa que la configuración que menos carga de calentamiento necesita es la B-A-L-W con un valor de $-108.07 (wh/m^2)$ y la configuración que necesita menos carga de enfriamiento es la configuración B-L-G con un valor de $25.88 (wh/m^2)$.

Tabla 5.13 Cargas Térmicas de enfriamiento y calentamiento

Configuración	PÉRDIDA DE ENERGÍA		GANANCIA DE ENERGÍA		CARGA TÉRMICA	
	DÍA FRÍO	DÍA CÁLIDO	DÍA FRÍO	DÍA CÁLIDO	Calentamiento	Enfriamiento
	$q_{int}(t)$ (wh/m^2)	Dif. %	$q_{int}(t)$ (wh/m^2)	Dif. %		
B-L-G	574.53		600.41			25.88
B-L-B	668.98	↑16.43	750.42	↑24.98		81.44
B-L-W	467.32	↓18.66	313.04	↓47.86	-154.28	
B-A-L-G	431.74	↓24.85	475.24	↓20.84		43.5
B-A-L-B	509.04	↓11.39	594	↓1.06		84.96
B-A-L-W	355.40	↓38.14	247.33	↓58.80	-108.07	

CAPÍTULO 6. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

En este capítulo se presentan las conclusiones de los resultados obtenidos del análisis de la transferencia de calor conjugada en un block hueco, también como parte de este capítulo se presentan las recomendaciones para trabajos futuros.

6.1 CONCLUSIONES

Primera. De acuerdo a los resultados obtenidos se concluye que el uso de películas reflectivas disminuye o aumenta la temperatura máxima de la superficie exterior y por lo tanto también al interior del block, que aumente o disminuya la temperatura depende de las propiedades físicas de las películas, películas con alta reflectividad como es el caso de la película blanca presentan una disminución de la temperatura máxima interior para este caso se observó una disminución de 6.01°C para el día cálido con respecto a la referencia, caso contrario las películas de color oscuro presentan baja reflectividad por lo tanto un aumento en la temperatura máxima interior, para este análisis se observó un aumento de 3.08°C para el día cálido con el uso de una película color negra. Con respecto al uso de aislantes se puede decir que para un día cálido, se llega a disminuir aún más la temperatura máxima interior del block que solo utilizando la película reflectiva, se observa que al utilizar película blanca y aislante se obtiene una disminución de 7.05°C con respecto a la referencia, 1.04°C más que al utilizar solo la película, para el caso del uso de película negra y aislante se observa que el aumento de la temperatura que se tenía con solo la película negra disminuyó 2.93°C al utilizar aislante. El uso solo de aislante sin película reflectiva también logró una disminución en la temperatura de 2.27°C .

Segunda. El uso de las películas reflectivas además de beneficiar o afectar la temperatura, también tienen efecto en las ganancias o pérdidas de energía al interior del block, para un día cálido al utilizar la película negra se observa una ganancia de energía de 24.98% sin aislante y con aislante se observa una disminución en la ganancia de energía de 1.06% con respecto a la configuración de referencia, en un día frío al utilizar película negra se logra tener una ganancia de energía de 16.43% sin aislante y una reducción en la ganancia de energía de 11.39% con aislante. En el caso del uso de la película blanca en un día cálido esta reduce la ganancia de energía hasta 47.86% sin aislante y 58.80% con aislante con respecto a la referencia, para un día frío el uso de película blanca reduce la ganancia de energía un 18.66% sin aislante y 38.14% con aislante.

Tercera. En un día cálido lo que se busca es rechazar la mayor cantidad de energía del exterior para reducir la ganancia de calor al interior, la configuración adecuada para esta condición resultó ser B-A-L-W siendo esta la configuración que más rechaza energía del

exterior. Sin embargo en un día frío lo que se busca es absorber la mayor cantidad de energía del exterior para tener mayor ganancia al interior, la configuración adecuada para esta condición resulto ser B-L-B siendo esta la configuración que absorbe más energía.

Cuarta. No es posible elegir una configuración para días cálidos y otra para días fríos, por esta razón se tomó la siguiente consideración, para elegir la configuración más adecuada.

Mérida, Yucatán es una Ciudad con un clima cálido subhúmedo donde su temperatura media es de 26°C y sus temperaturas más altas llegan a los 43.16°C. En primavera, verano y otoño su temperatura mínima está por arriba de los 20°C y solo en invierno las temperaturas bajan a los 11.9 °C, entonces se puede decir que la mayor parte del año se presentan temperaturas altas por lo cual la configuración más adecuada para esta Ciudad es la configuración B-A-L-W siendo esta la que brindara confort por más tiempo.

6.2 RECOMENDACIONES

1. Realizar la evaluación con datos climatológicos de otros estados de la República Mexicana.
2. Realizar el análisis de la transferencia calor conjugada para un block de 3 huecos como componte de un techo de la República Mexicana.
3. Realizar un estudio experimental con el fin de validar los resultados obtenidos con el estudio numérico.

FUENTES DE INFORMACIÓN

Abdelbaki A, Zrikem Z (1999) Simulation numérique des transferts thermiques couplés à travers les parois alvéolaires des bâtiments. *International Journal of Thermal Sciences* 38: 719–730.

Ait-Taleb T., Abdelbaki A., Zrikem Z., “Simulation of coupled heat transfers in a hollow tile with two vertical and three horizontal uniform rectangular cavities heated from below or above”, *Energy and Buildings*, 84 (2014) 628–632.

A.K.Sharma,V.Agarwal, A.K.Das, S. Ghosh,P.K Das. Conduction in composites labs: Reliability of 1-D and 2-D calculations. *Energy and Buildings*, 65 (2013) 242–247.

Cisneros J., (2016). Evaluación Pseudo-Transitoria del Block para techos en la República Mexicana (Tesis maestría).CENIDET

Cortes O., (2008). Análisis térmico de los sistemas constructivos comunes utilizados en techos y muros en vivienda versus la normatividad oficial en el tema, en los diversos bioclimas de México. (Tesis maestría). Universidad Nacional Autónoma de México.

Díaz R., (2014).Repercusión medioambiental del uso de la cerámica estructural en España. Energía embebida y huella de carbono (Tesis doctoral).Universidad Politécnica de Madrid. Escuela Técnica Superior de Edificación

Hernández I., (2015). Estudio de la transferencia de calor de cubiertas reflectivas (cool roofs) en techos de edificaciones bajo condiciones climáticas dela República Mexicana.(Tesis doctoral).CENIDET

Mott R., *Mecánica de fluidos aplicada*. 4a edición, 1996.

Niño Y. (2002). Método de los volúmenes finitos. Notas Sem. Primavera-2002, España.

Oluwole O., Joshua J., Nwagwo H., “Finite Element Modeling of Low Heat Conducting Building Bricks”, *Journal of Minerals and Materials Characterization of Engineering*, 11 (2012) 800-806

Rodríguez J., *Introducción a la Termodinámica*.1ra edición, 1990.

Rojas J., Tovar R., Barrios G., Lira A. y Castillo A., (2010). Energía y confort en edificaciones. Revista universitaria, 11(10).

Shames I., Mecánica de fluidos.3ra edición, 1995.

Schallenberg J., Piernavieja G., Hernández C., Unamunzanga P., García R., Díaz M., Cabrera D., Martel G., Pardilla J., Subiela V.,(2008).Energías renovables y eficiencia energética (1st ed.). Canarias: Instituto Tecnológico de Canarias, S.A.

Versteeg H., Malalasekera W. (2008). An Introduction to computational fluid dynamics, the finite volume method. Pearson, Prentice Hall, England.

Xamán J, Gijón M, Dinámica de fluidos computacional para ingenieros (2016)