

CAPITULO II

TRANSFERENCIA DE CALOR EN EDIFICACIONES

II.1. Generalidades

Al analizar la envolvente que rodea a las personas, este debe cumplir dos funciones básicas:

- Dado que las solicitaciones exteriores raramente coincidirán con los requerimientos de confort, la envolvente deberá producir un microclima interior diferente del externo, acercándolo, lo más posible a dichos requerimientos. Para ello deberá tomar en cada momento del exterior los elementos favorables y rechazar los desfavorables.

- Como la envolvente por sí sola (salvo condiciones climáticas muy benignas) no alcanzará a producir confort, serán necesarias instalaciones de acondicionamiento) en los casos en que sea factible su existencia. La envolvente deberá garantizar en este caso una mínima potencia instalada y un reducido consumo de energía.

II.2 Transmisión de calor por conducción

El proceso de transferencia de calor a través de materiales sólidos se denomina conducción térmica, en la cual la energía térmica es transmitida de partícula a partícula a través de el material, sin que exista desplazamiento de materia. Por lo tanto, la conducción se efectúa por contacto directo y el calor fluye del lugar más caliente al más frío.

Los primeros adelantos acerca de la conducción de calor se deben, en gran parte a los esfuerzos del matemático francés Fourier (1822), que propuso la ley que hoy se conoce como ley de la conducción de calor de Fourier. Esta es una generalización de la información empírica. Dicha ley predice cómo se conduce el calor a través de un material, partiendo de una región de alta temperatura a una región de baja temperatura.

La rapidez de transferencia de calor " q " a través de un material, es la cantidad de flujo de calor por unidad de tiempo y tiene las dimensiones de Cal/hr o Calh. El flujo de calor " Q ", puede ser definido como la rapidez de transferencia de calor a través de una área unitaria. Las interrelaciones entre ellas, son :

Calor Q (Calorías)

rapidez de transferencia de calor $q = Q/\text{tiempo}$ (Cal/h)

Flujo de calor $Q = q/A$ (Btu/Area-tiempo)

Aplicando la ley de Fourier, a una pared, como la que se muestra en la Figura II.1, se obtiene:

$$Q = \frac{kA(T_{int} - T_{ext})}{L} \quad (1)$$

Donde:

Q = razón de flujo de calor.

A = área de la pared normal al flujo de calor.

T_{int} = temperatura de la superficie interior de la pared.

T_{ext} = temperatura de la superficie exterior de la pared.

k = conductividad térmica del material de la pared.

L = espesor de la pared.

Conductancia (C). Cuando una diferencia de temperaturas ocurre entre dos superficie opuestas de una pared o sección, el calor

pasará de la parte caliente a la parte fría, en un intento de igualar el desbalance térmico. Tan pronto como las caras sean mantenidas a dos diferentes y constantes temperatura, la velocidad de flujo de calor entre ellas permanecerá también constante; esto como una condición de estado estable. La magnitud de la velocidad de flujo de calor esta gobernada por una propiedad de el material o conjunto de materiales conocida como su conductancia. La Conductancia esta definida como la velocidad de flujo de calor a través de una area superficial unitaria de un cuerpo de una de sus caras a la otra, para un diferencial de temperatura unitario. La conductancia esta denotada por la letra " C " y definida por la relación :

$$\text{Transmisión de calor } q = C(T_c - T_f)A \quad (2)$$

$$\text{Conductancia } (C) = \frac{q}{(T_c - T_f)A} \quad (3)$$

Donde :

T_c = Es la temperatura de la cara caliente.

T_f = Es la temperatura de la cara fría.

A = Es el área superficial.

La conductancia de un material homogéneo se encuentra simplemente dividiendo su conductividad térmica por su espesor:

$$C = \frac{k}{L}$$

La conductancia de un ensamblaje de materiales, como lo es una pared, se encuentra sumando los recíprocos de las conductancias de cada capa.

La conductancia de la mayoría de los materiales de construcción se encuentran en tablas de ingeniería.

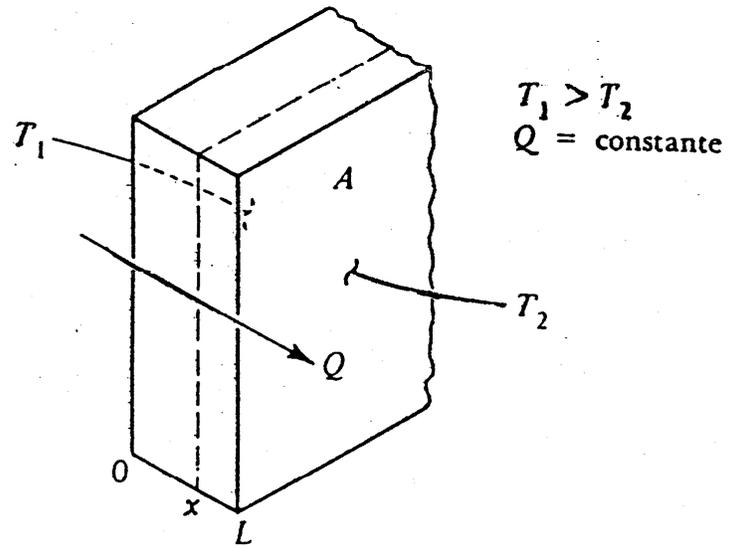


Fig.II.1 Conducción de calor a través de una pared plana.

Conductividad (k). La conductividad de un material es su conductancia por una unidad de espesor estandarizada. En construcción esta es normalmente unitaria. La conductividad se define como la velocidad de flujo de calor a través de una área unitaria y un espesor unitario de un material homogéneo bajo condiciones de estado estable o estacionario, donde una unidad de diferencia de temperatura se mantiene entre sus caras. Esta usualmente se representa por la letra " k ". Debido a que la conductividad esta referida a un espesor estandar, ésto permite una rápida comparación entre diferentes materiales para ver la " facilidad " con la cual transmiten el calor.

En la Tabla II.1 se pueden comparar los valores de las conductividades térmicas para varios materiales, algunos de ellos considerados como aislantes térmicos.

La conductividad k esta definida, para placas o paredes planas en estado estable, por la relación:

$$\text{Transmisión de calor } q = \frac{k (T_c - T_f) A}{x} \quad (4)$$

$$\text{Conductividad } k = \frac{qx}{(T_c - T_f)} \quad (5)$$

Donde " x " es el espesor de el material. De esta expresión resulta que la conductancia y k/x son intercambiables, entonces :

$$\text{Conductancia (C)} = \text{Conductividad}(k)/\text{Espesor}(x) \quad (6)$$

Resistencia Térmica, Valor-R. Existe mayor inclinación por hablar acerca de la resistencia térmica de un componente de un edificio que de su conductancia o la conductividad de sus partes. La resistencia térmica, designada por la letra "R", es simplemente el recíproco de la conductancia térmica. Esta definida por la relación:

$$\text{Resistencia } R = \frac{(T_c - T_f)A}{q} = \frac{1}{C} \quad (7)$$

Esta preferencia tiene que ver con el hecho de que los valores de R estan dados en números enteros, por lo que son más faciles de recordar y manipular que las conductancias.

Las resistencias son aditivas, entonces la resistencia total de una sección de un edificio es la suma de las resistencias de cada una de las capas componentes.

$$R \text{ PARED} = R_1 + R_2 + R_3 + \dots \quad (8)$$

Control de el flujo de calor por conducción. La ecuación de transmisión de calor tiene tres variables de mayor significancia, que son, 1) Area superficial, 2) Resistencia térmica de el envolvente del edificio, 3) Diferencial de temperaturas. Entre cada una de esas variables hay numerosas oportunidades o estrategias para reducir las pérdidas o ganancias de calor por conducción.

Reduciendo el área superficial, por ejemplo, se reduce el flujo de calor; estrategia utilizada al minimizar la relación superficie-volumen (haciendo el edificio más compacto) y reduciendo el área relativa de alta conductividad de los elementos del envolvente como son ventanas y puertas.

La resistencia térmica del envolvente se puede variar escogiendo materiales cuyas conductividades térmicas sean bajas, como se puede ver en la Tabla II.1, este es el caso de los materiales aislantes, los cuales se pueden combinar con otros materiales de construcción, para aumentar la resistencia térmica.

La disminución del diferencial de temperatura puede ser aprovechado mediante la selección de sitios favorables para la construcción y por la construcción subterránea.

III.3 Transmisión de Calor por Convección

A la transferencia de energía calorífica a través de un cuerpo y un fluido (gas o líquido), por desplazamiento de éste último se la llama convección térmica. El aire, en su condición de fluido, es el elemento que más interesa aquí. Los movimientos del aire pueden deberse a las variaciones de densidad que acompañan las de temperatura por causa del viento, de un mecanismo de ventilación, etc.

En principio, se distingue la convección natural, en la que el desplazamiento del aire se debe únicamente a su variación de temperatura, y la de convección forzada, en la que un medio mecánico (por ejemplo, un ventilador) colabora a la acción, por lo general preponderante, de la temperatura .

En la práctica, para el caso de la pared plana de la Figura II.2, los ingenieros usan la siguiente expresión para determinar razones de transferencia de calor por convección :

$$Q = hA(T_s - T_\infty) \quad (9)$$

Donde:

Q = calor transferido de la superficie al fluido circundante.

A = área superficial.

T_s = temperatura en la superficie.

Descripción	Densidad (kg/m ³)	Conductividad k, (w/m°C)
1. Materiales aislantes		
Asbesto pulverizado	130	.046
Corcho, placas	145	.042
Fibra de vidrio	80	.035
Fibra de madera	600	.110
Hule espuma	20	.036
Lana mineral	180	.042
Perlita	65	.042
Poliestireno, placa	15	.037
Poliuretano, placa rígida	30	.020
Poliuretano, espuma	30	.026
Vermiculita	100	.065
2. Materiales para construcción		
Asbesto-cemento, placa	1360	0.25
Asfalto	1600	0.43
Concreto	2300	1.80
Mortero cemento-arena	2000	0.63
Mortero con vermiculita	500	0.18
Mortero con arcilla extendida	750	0.25
Tabique	2200	1.30
Tabique	1500	0.65
Tablarroca (yeso-cartón)	950	0.16
Vermiculita, aplanado	640	0.20
Yeso, aplanado	1280	0.46
Encalado	1800	0.81
Cartón asfáltico	1100	0.14
Linoleo	1200	0.19
Cloruro de polivinilo	25	0.04
Plexiglás	1200	0.20
Vidrio sencillo	2200	0.93
Vidrio sencillo	2700	1.16
3. Metales		
Acero	7830	58.0
Acero inoxidable	7800	46.5
Aluminio	2675	220.0
Hierro galvanizado	1500	46.5
Plomo		34.0
Zinc	6860	110.0
4. Piedras		
Arenisca	2000	1.30
Caliza	2180	1.40
Granizo	2600	2.50
Mármol	2500	2.00
Pizarra	2700	2.00
5. Madera		
Madera blanda	610	0.13
Madera dura	700	0.15
Triplay	530	0.14
Viruta prensada	400	0.16
6. Otros		
Aire en reposo a 10°C	1.25	.026
Agua	1.00	.580

Tabla II.1 Propiedades termofísicas de algunos materiales [3]

T_{∞} = temperatura del fluido circundante. Se usa el subíndice ∞ para identificar aquella parte del fluido que está suficientemente alejado de la superficie como para que no le afecte ésta por medio del proceso de transferencia de calor.

h = coeficiente convectivo de transferencia de calor.

Valor U. Las unidades que han sido discutidas anteriormente han sido definidas en términos de la transmisión de calor de una superficie a través del material a la otra superficie; pero en la práctica usualmente no conocemos las temperaturas superficiales actuales en un determinado momento. Por otro lado, asumimos una temperatura de aire interna y externa de diseño; los efectos de la transición entre temperaturas de aire y superficie; deberán ser incorporadas en la ecuación de flujo de calor. Esto se hace asumiendo el valor de la conductancia para la capa de aire adyacente a las superficies externas e internas. Esas conductancias son conocidas como las conductancias de capa límite, sus valores son algunas veces referidos simplemente a los coeficientes de película.

Estos son usualmente representados por los símbolos h_o y h_i para los coeficientes interno y externo respectivamente. Los valores de h_o varían con la velocidad del aire, y h_i esta relacionado con la orientación.

La ecuación de transmisión de calor dada previamente puede ser reescrita para el intercambio de calor aire-aire :

$$\text{Transmisión de calor } q = \frac{(T_i - T_c)A}{1/h_i + R + 1/h_o} \quad (10)$$

Donde:

T_i = Temperatura externa del aire.

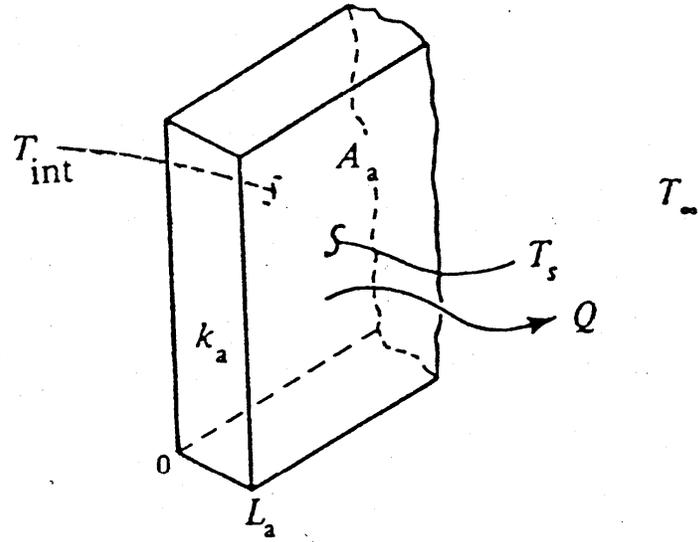


Fig.II.2 Pared plana con transferencia de calor por convección en su superficie de la derecha.

To = Temperatura interna del aire.

hi = Coeficiente de película interna.

ho = coeficiente de película externa.

R = Resistencia a la transferencia por conducción.

El recíproco de la suma de todas las resistencias, incluyendo los coeficiente de película, es llamada el coeficiente global de transferencia de calor, la conductancia global, la transmitancia térmica, o simplemente el valor U:

$$\text{Transmitancia térmica (U)} = \frac{1}{1/h_i + R + 1/h_o} \quad (11)$$

$$\text{Transmisión térmica (q)} = U(A)\Delta T \quad (12)$$

Donde : ΔT es la expresión abreviada para la diferencia de temperaturas entre el aire interno y el externo, ($T_i - T_o$),

II.4 Transmisión de Calor por radiación

La transmisión de energía calorífica entre dos cuerpos que están a diferente temperatura, sin que haya desplazamiento de materia, pero si cambio de ondas electromagnéticas (por ejemplo, la radiación infrarroja) se conoce como radiación. La radiación no resulta afectada por la temperatura del aire o por fenómeno simultáneo alguno de convección térmica entre los dos cuerpos. Es decir, este fenómeno puede considerarse con independencia de la convección térmica.

Los sólidos, líquidos, y algunos gases (especialmente el vapor de agua y los hidrocarburos) emiten radiación térmica como resultado de su temperatura. Un emisor ideal, al que se le llama **cuerpo negro**, emite radiación térmica de acuerdo a la ecuación de Stefan-Boltzmann.

$$e_b = \sigma T^4 \quad (13)$$

En la ecuación anterior, e_b representa la **potencia emisiva** del cuerpo negro, que es la energía total emitida por unidad de área y por unidad de tiempo, σ es la constante de Stefan-Boltzmann, y T es la temperatura dada en grados absolutos. El rasgo principal de un cuerpo negro es que a una temperatura cualquiera, T , su potencia emisiva es la máxima potencia emisiva de cualquier cuerpo. Un cuerpo negro absorbe **toda la energía térmica** que incide sobre él, y por esto se le llama absorbente perfecto.

Sin embargo, aun cuando raramente se encuentra un verdadero cuerpo negro en la naturaleza, el concepto de cuerpo negro proporciona una referencia muy útil para comparar la emisión radiante de cuerpos reales.

Cuando la energía radiante choca en un material expuesto, como se muestra en la Figura II.3, algo de la energía es absorbida y algo es reflejada, una porción puede ser transmitida a través de ella. Las propiedades de un material que gobiernan la disposición de esta energía son conocidas como α , la **absorbitividad** (fracción de la radiación incidente que absorbe el material); ρ , la **reflectividad** (fracción de la radiación incidente que refleja el material); y τ , la **transitividad** (fracción de radiación incidente que se transmite a través de el material); en la Tabla II.4 se encuentra un resumen de estas definiciones. Ellas son expresadas como fracciones decimales o porcentajes, y la suma de las tres deberá ser igual a uno :

$$\alpha + \rho + \tau = 1 \quad (14)$$

II.5 Radiación solar

Los valores de α , ρ , y τ dependen de el ángulo de incidencia que el sol hace con respecto a la superficie del edificio. Cuando

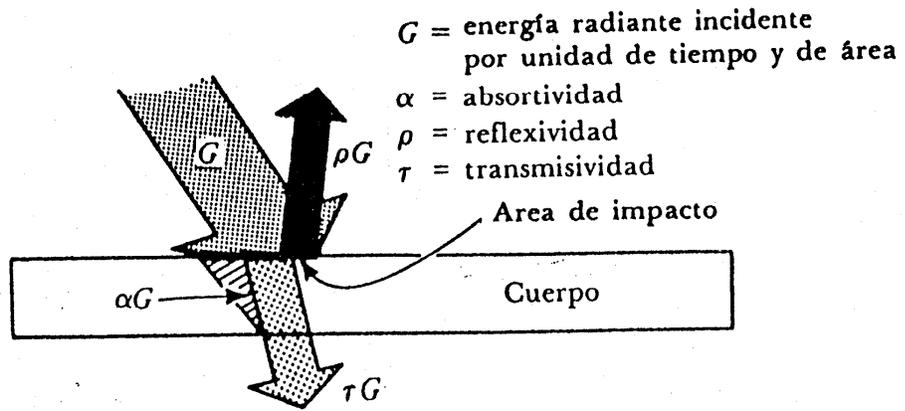


Fig.II.3 Energía radiante que choca sobre una superficie [6].

<p>Absorbancia se define como la relación de la cantidad de energía radiante que una superficie particular absorbe con respecto a la cantidad total de energía radiante incidente sobre el; absorbitividad se refiere a la habilidad de el material, independientemente de su geometría y condiciones superficiales, para absorber energía radiante.</p>
<p>Emitancia se define como la relación de la cantidad de energía radiante liberada (emitida) por una superficie particular a una temperatura y longitud de onda especificada con respecto a la emitancia de un "cuerpo negro" ideal a la misma temperatura y longitud de onda; emisividad se refiere a la habilidad de un material, independientemente de su geometría o condición superficial, para emitir energía radiante.</p>
<p>Reflectancia se define como la relación de la cantidad de energía radiante reflectada por una superficie particular a la cantidad total de energía radiante incidente sobre el; reflectividad se refiere a la habilidad de un material, independientemente de su geometría o condición superficial, para reflejar la energía radiante.</p>
<p>Transmitancia se define como la relación de la cantidad de energía radiante transmitida a través de un espesor específico de una sustancia a una longitud de onda específica con respecto a la cantidad total de energía radiante incidente sobre su superficie; transmisividad se refiere a la habilidad de una sustancia, independientemente de su geometría o condición superficial, para transmitir energía radiante.</p>

Tabla II.2 Definición de propiedades de los materiales [7].

comparamos las propiedades solares-ópticas de diferentes materiales, es importante asegurarse que los valores están dados para idénticas condiciones de prueba.

En la Tabla II.2, se dan algunos valores de α , ϵ para diferentes tipos de superficies y colores, y de ρ para varios colores.

La absorción de energía solar por una superficie exterior de un edificio aumenta su temperatura cercana a la del aire por algunos grados lo cual depende del color de la superficie, la intensidad de la radiación, la velocidad contrabalaceante a la cual su temperatura es reducida por el viento y las pérdidas radiantes por enfriamiento de los alrededores. Los efectos de el calentamiento solar de una pared pueden ser representados como una temperatura " ficticia " del aire exterior la cual puede producir la misma velocidad de entrada de calor a la superficie que la que ocurre debido a la combinación de radiación solar actual incidente, intercambio de radiación con el cielo y otros alrededores, e intercambio de calor convectivo con el aire externo. Esta temperatura ficticia es conocida como la temperatura sol-aire (SAT):

$$SAT = T_o + \frac{I\alpha}{h_o} - \frac{\epsilon\Delta IR}{h_o} \quad (15)$$

Donde:

SAT = Temperatura sol-aire.

T_o = Temperatura del aire externo.

I = Radiación solar incidente total sobre la superficie.

α = Absorbancia de la superficie para radiación solar.

h_o = Coeficiente de transferencia de calor para longitud de onda larga y convección en la superficie exterior.

ϵ = Emitancia hemisférica de la superficie.

ΔIR = Diferencia entre la radiación incidente sobre la superficie de el cielo y los alrededores y el flujo

de calor radiante emitido por un radiador ideal (cuerpo negro) a la temperatura exterior.

La temperatura de el medio circundante a una pared vertical es usualmente tan cercana a la propia que ΔIR puede ser asumida igual a cero, por lo que el último termino puede ser despreciado. Para el caso de superficies verticales, entonces,

$$SAT = To + \frac{I\alpha}{ho} \quad (16)$$

La temperatura sol-aire en exceso (SAXT) es simplemente esa parte de la temperatura sol-aire que es atribuible a la radiación solar únicamente, o sea, la elevación de la temperatura exterior causada por la absorción solar y acompañada por las pérdidas convectivas. Para superficies verticales,

$$SAXT_{vert} = (SAT_{vert} - To) = \frac{I\alpha}{ho} \quad (17)$$

La velocidad de flujo de calor solar en exceso (SXQ) es la velocidad de flujo de calor por unidad de área dada a través de una pared opaca, en exceso de esa llevada por la temperatura del aire exterior, como resultado de la absorción de calor solar de la pared. Esto esta dado por la relación :

$$SQX_{vert} = \frac{SQX}{I} = \frac{\alpha U}{ho} \quad (18)$$

El factor de ganancia solar (SGF) es la relación de flujo de calor a través de una sección opaca o translúcida del edificio que resulta de la absorción solar de la superficie (i,e; SXQ) a la intensidad de radiación recibida en la superficie. Esto representa la fracción de radiación incidente que es llevada a

Superficie	α solar	ϵ a 50 C
Ladrillo		
Vidriado blanco	0.25	0.95
Colores claros	0.40	0.90
Colores oscuros	0.80	0.90
Techumbres		
Asfáltica	0.90	0.96
Teja roja	0.65	0.85
Teja blanca	0.40	0.50
Aluminio	0.20	0.11
Pintura		
Blanco	0.30	0.95
Negro mate	0.96	0.96
Superficies (sucias) de edificios		
Clara	0.50	0.60
Media	0.80	0.85
Oscura	0.90	0.95
Reflectancia de algunos colores		
Colores		
Yeso con pintura blanca	0.85	
Amarillo claro	0.75	
Amarillo ocre	0.50	
Café	0.30	
Azul cobalto	0.15	
Verde cromo	0.15	
Rojo	0.09	
Verde hierba	0.01	

Tabla II.3 Absorbancias y emitancias de algunas superficies [3]

representa la fracción de radiación incidente que es llevada a el interior. El factor de ganancia solar esta definido por la relación,

$$SHG = \frac{SQX}{I} = \frac{\alpha U}{h_o} \quad (19)$$

Lo que puede ser visto de esta relación es que el factor de ganancia solar es una constante, propiedad adimensional del ensamble del edificio. Se recomienda que el SGF no deberá exceder 0.04 en regiones húmedas y calientes, o 0.03 en las regiones calientes y secas, donde la ventilación es reducida.

Factores de Fenestración. Fenestración se refiere a cualquier abertura transmisora de luz en una pared o techo. Aquí se incluye a :

- 1.- Material vidrioso ; cualquier vidrio o plástico.
- 2.- Dispositivos de sombreado externos.
- 3.- Dispositivos de sombreado internos.
- 4.- Sistemas de sombreado integrados (entre el vidrio).

El término ganancia solar se refiere únicamente a el calor entrante a el interior a través de un material vidrioso expuesto al sol debido a su transmisión de radiación y a la liberación de calor interno del material translúcido absorbido a través de él. La ganancia de calor (SHG) puede ser expresada , para el vidreado sencillo , como :

$$SHG = I\tau + \frac{I\alpha U}{h_o} = I\left(\tau + \frac{\alpha U}{h_o}\right) \quad (20)$$

El término colocado entre paréntesis es también conocido como el coeficiente de ganancia solar, designado con la letra F (adimensional).

Los flujos de calor encontrado por la sustitución de las propiedades de vidrios DSA (vidrio deresistencia doble) en la ecuación de ganancia solar son llamados factores de ganancia de calor solar (SHGF). Debido a que la transmisividad τ y la absorbitividad α varían cuando el ángulo de incidencia θ cambia, como se muestra en la Tabla VI.4, el valor de F no es constante, para la látitud, cambia con la posición solar de acuerdo a la época del año, hora y día. En notación simbólica,

$$SHGF = IF_{DSA} = I \left(\tau_{DSA} + \frac{\alpha_{DSA} U}{h_o} \right) \quad (21)$$

El coeficiente de sombreado (SC) es usado para describir la transmitancia de materiales vidriados, usando vidrio DSA como referencia. El coeficiente de sombreado es la relación adimensional de F para cualquier material de fenestración o accesorio de fenestración (persianas, cortinas, etc.) para F de el vidrio DSA (vidrio de resistencia doble) bajo las mismas condiciones :

$$SC = \frac{F \text{ del material de fenestración}}{F \text{ del vidrio DSA}} \quad (22)$$

Bajo la mayoría de las circunstancias, los fabricantes publican valores de SC que son medidos usando un valor de transmitancia para un ángulo de incidencia de cero (rayo de luz normal a el vidrio). Para esta condición, F para el vidrio DSA se ha encontrado que es 0.87, y para otros materiales,

$$SC = \frac{F \text{ de fenestración}}{0.87} = (1.15) F \text{ de fenestración} \quad (23)$$

Obviamente que el SC del vidrio DSA es 1.00. La ganancia solar a través de cualquier material vidrioso puede ser calculada si su SC y SHGF para la hora, lugar, y orientación son conocidos :

$$SHG = SC * SHGF \quad (24)$$

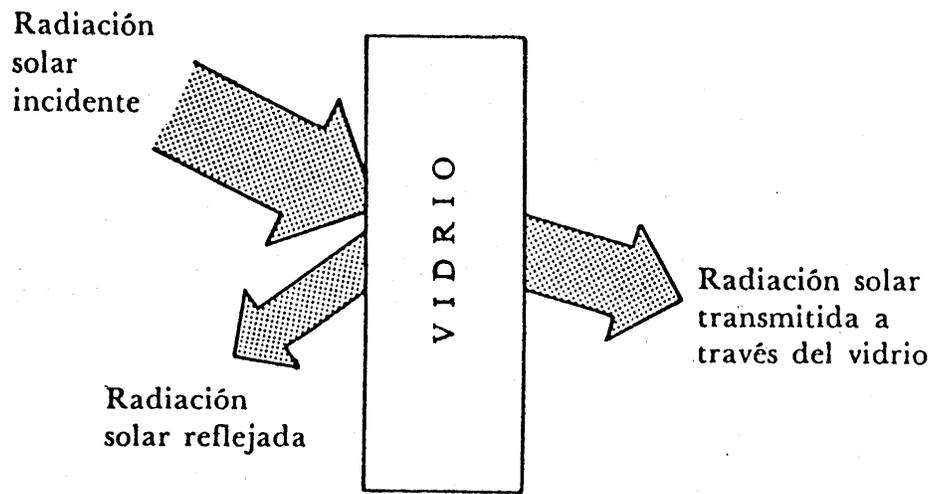


Fig.II.4 Radiación solar a través de un vidrio [6].

Descripción	F							
	τ	α	ϵ_i	Angulo de incidencia				
				0	20	40	60	80
Vidrio sencillo de 4mm	0.81	0.11	0.03	0.84	0.84	0.84	0.77	0.41
Vidrio sencillo de 6mm	0.77	0.15	0.03	0.80	0.80	0.79	0.72	0.39
Vidrio ligeramente absorbente de 6mm	0.41	0.54	0.16	0.57	0.57	0.55	0.48	0.28

Tabla II.4 Características de vidrios de ventanas [3]

II.6 Evaporación

La evaporación es el paso del estado líquido al gaseoso por intercambio térmico con el aire ambiental. El intercambio se realiza por convección o por conducción. La atención se centra sobre todo en el paso de agua (líquido) a vapor de agua . El fenómeno inverso de la evaporación es la condensación. Se denomina calor latente a la energía calorífica que es aportada o extraída de la materia para hacerle cambiar de estado. El calor latente necesario para evaporar el agua puede proceder del aire circundante que, en consecuencia, ve su temperatura disminuida y aumentado el grado de humedad.

La eliminación teórica de calor posible por libra de aire circundante depende de la temperatura y el contenido de humedad de el aire. La temperatura de bulbo húmedo es un indicador de el contenido de humedad de el aire. Por tanto, desde un punto de vista ideal, la temperatura de bulbo humedo nos da una idea de el límite para la evaporación de el líquido.