

157
21



**UNIVERSIDAD NACIONAL AUTONOMA
DE MEXICO**

**FACULTAD DE ESTUDIOS SUPERIORES
CUAUTITLAN**

**APLICACION DE LA LUZ NATURAL EN LOS
SISTEMAS DE ILUMINACION DE INTERIORES**

T E S I S

QUE PARA OBTENER EL TITULO DE:

INGENIERO MECANICO ELECTRICISTA

P R E S E N T A

CANDIDO SANTIAGO MEJIA

ASESOR: ING. FRANCISCO GUTIERREZ SANTOS

CUAUTITLAN IZCALLI, EDO. DE MEXICO.

1997

**TESIS CON
FALLA DE ORIGEN**



Universidad Nacional
Autónoma de México

Dirección General de Bibliotecas de la UNAM

Biblioteca Central



UNAM – Dirección General de Bibliotecas
Tesis Digitales
Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS ©
PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

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

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



UNIVERSIDAD NACIONAL
AUTÓNOMA DE
MÉXICO

FACULTAD DE ESTUDIOS SUPERIORES CUAUTITLAN
UNIDAD DE LA ADMINISTRACION ESCOLAR
DEPARTAMENTO DE EXAMENES PROFESIONALES

U. N. A. M.
FACULTAD DE ESTUDIOS
SUPERIORES CUAUTITLAN

ASUNTO: VOTOS APROBATORIOS

DR. JAIME KELLER TORRES
DIRECTOR DE LA FES-CUAUTITLAN
P R E S E N T E .

AT'N: Ing. Rafael Rodríguez Ceballos
Jefe del Departamento de Exámenes
Profesionales de la F.E.S. - C.

Con base en el art. 28 del Reglamento General de Exámenes, nos permitimos comunicar a usted que revisamos la TESIS:

"Aplicación de la Luz Natural en los Sistemas de
Iluminación de Interiores"

que presenta el pasante: Cándido Santiago Mejía
con número de cuenta: 8709451-4 para obtener el TITULO de:
Ingeniero Mecánico Electricista

Considerando que dicha tesis reúne los requisitos necesarios para ser discutida en el EXAMEN PROFESIONAL correspondiente, otorgamos nuestro VOTO APROBATORIO.

A T E N T A M E N T E .

"POR MI RAZA HABLARA EL ESPIRITU"

Cuatitlan Izcalli, Edo. de Mex., a 11 de Junio de 1997

PRESIDENTE	Ing. Francisco Gutiérrez Santos	<i>[Signature]</i> 19/11/97
VOCAL	Ing. Casildo Rodríguez Arciniega	<i>[Signature]</i> 18/11/97
SECRETARIO	Ing. Jaime Rodríguez Martínez	<i>[Signature]</i> 11/11/97
PRIMER SUPLENTE	Ing. Oscar Cervantes Torres	<i>[Signature]</i> 11/11/97
SEGUNDO SUPLENTE	Ing. Martha Hrrutia Vargas	<i>[Signature]</i> 11/11/97

AGRADECIMIENTOS

Quiero dar las gracias a **Holophane-México** S.A. de C.V.
por todas las facilidades otorgadas para la realización de éste trabajo.

Agradezco al Ingeniero **Francisco Gutiérrez Santos**
por ayudarme en forma total y desinteresada
en la elaboración de éste trabajo
y por todas esas tardes de paciencia infinita
en las que compartió conmigo no sólo sus conocimientos
sino también su particular forma de ver la vida.

Agradezco a la Ingeniera **Martha Urrutia Vargas**
por su importante colaboración y por darme
siempre muchos ánimos para terminar mi trabajo.

Agradezco a la **FESC-UNAM** por darme
una formación que me permitirá serle
más útil a México.

DEDICATORIAS

Para **Sara y Rosalío** como muestra de mi cariño
y **gratitud**. Sus esfuerzos no han sido en vano.

Para todos mis **hermanos y hermanas**.
Su apoyo ha sido fundamental en
todo lo que he hecho.

Para **Paula** por creer siempre en mí.
Esta es mi voz cantando a tu sonrisa.

Para todos **mis amigos** por ser cómplices de
muchos de nuestros sueños.

INDICE

	Página
Introducción	1
Capítulo 1. Naturaleza de la luz	
1.1 La luz	3
1.2 Energía radiante y luz	5
Capítulo 2. Las fuentes de luz natural y su aprovechamiento	
2.1 El sol como una fuente de luz	7
2.2 El cielo como una fuente de luz	9
2.3 El piso como una fuente de luz	9
2.4 Aprovechamiento de la luz natural	10
Capítulo 3. Geometría solar	
3.1 Ubicación del lugar	12
3.2 Tiempo	13
3.3 Posición solar	15
3.4 Luz solar	19
3.5 Luz del cielo	23
Capítulo 4. Iluminación natural	
4.1 Diseño del campo visual	35
4.2 El brillo de la luz natural	35
4.3 El factor humano	36
4.4 Efectos de la luz natural en los espacios interiores	36
4.5 Diseño de iluminación natural	37
4.6 Sistemas de iluminación natural	43
4.7 Materiales y elementos de control	48
Capítulo 5. Cálculo de iluminancias interiores	
5.1 Cálculos con computadora	52
5.2 Método de lumen	53
5.3 Método de lumen para iluminación vertical	55
5.4 Método de lumen para iluminación lateral	62
5.5 Medición de la iluminación interior	72
5.6 El factor luz natural	74
Capítulo 6. El horario de verano	
6.1 Antecedentes	76
6.2 Husos horario en México	77
6.3 Beneficios	78
Conclusiones	80
Anexo	82
Bibliografía	89

“Si cultura significa realización, apreciación y goce de la plenitud de la vida, de todos los factores materiales, mentales, estéticos y espirituales que forman parte del mundo de la humanidad, entonces los ingenieros están en una posición particularmente favorable para lograrla”

HARDY CROSS

INTRODUCCIÓN

Ante el rápido progreso que se ha alcanzado en muchas de las ramas de la ciencia y la tecnología y de la gran cantidad de conocimientos nuevos generados, surge la imperiosa necesidad de replantear conceptos ya establecidos, mejorar los métodos utilizados en la realización de los trabajos hasta hoy hechos y buscar nuevas alternativas de aplicación a toda esa tecnología nueva.

Hoy el Hombre está ante un gran problema; el problema de como optimizar y conservar sus recursos naturales proveedores de energía. Uno de esos recursos es la luz solar.

La duración del día, la nubosidad, la luminosidad y la insolación determinan la cantidad de luz solar que recibe un lugar, la cual ejerce influencia en todo el quehacer del Hombre; la iluminación natural determina las actividades agrícolas e industriales, los intercambios comerciales, las actividades de diversión y de recreo, etc. Los patrones de comportamiento del Hombre que viven en localidades urbanas, en donde utiliza los recursos energéticos en forma intensiva y con frecuencia de manera ineficiente y dispendiosa, son diferentes a los del Hombre que vive en localidades rurales.

La correcta aplicación de la luz natural a los sistemas de iluminación de interiores para ahorrar energía requiere de consideraciones tales como el diseño, el control del brillo, los factores humanos y la integración de todos los sistemas constructivos del local. Es básico que los efectos de la luz natural sean considerados en cualquier espacio donde ésta es admitida, aún cuando ésta no sea considerada como una fuente de luz, a fin de evitar problemas con el brillo y daños a los materiales.

Para Usar efectivamente la luz natural, los siguientes factores deben ser tomados en cuenta:

- Los factores Humanos, incluyendo los fisiológicos, las preferencias y el comportamiento de los usuarios.
- Los efectos de la luz natural en todos los materiales, incluyendo el mobiliario, las obras de arte y las plantas.
- La admisión controlada de la luz solar directa.
- La admisión controlada de la luz natural difusa.
- Las condiciones del terreno local, el ambiente y la luz aprovechable de construcciones cercanas.
- La integración de los sistemas del espacio interior, incluyendo la iluminación eléctrica, las ventanas, la geometría interior y los acabados, los sistemas de control manuales y automáticos y los sistemas de control del clima.

Es así como surge la idea de crear un sistema habitacional que al optimar todos sus sistemas proveedores de energía proporcione un ahorro de la misma y al mismo tiempo proporcione al usuario comodidad y seguridad para poder realizar eficientemente su trabajo.

El presente trabajo establece las bases teóricas que deben considerarse en la aplicación óptima de la luz natural a los sistemas de iluminación de interiores, considerando todas las características que un sistema de iluminación eficiente debe tener (cantidad, calidad, control del brillo, etc.) logrando con ello un uso más racional de ésta energía y un ahorro de energía eléctrica.

CAPITULO 1

NATURALEZA DE LA LUZ

1.1 LA LUZ

Los antiguos griegos creían que la luz era una especie de “sentido externo” que partía de la vista. Desde luego, con base en esa hipótesis, era posible explicar muchos de los fenómenos diarios. A principios del siglo XVIII Newton presentó una teoría general sobre la naturaleza de la luz, según la cual esta está compuesta por diminutos corpúsculos (fotones) disparados en todas direcciones. Dicha teoría, sin embargo, no bastaba para explicar ciertos hechos prácticos: podía explicar el fenómeno de la reflexión, pero no así el de refracción, a menos que, contrariamente a la realidad, la velocidad de la luz fuera mayor en el agua que en el aire; no podía tampoco explicar el fenómeno de la “refracción doble” en ciertos cristales, ni el de la difracción, fenómeno este último que ya se conocía en tiempos de Newton. El mismo Newton descubrió otro fenómeno que su teoría era incapaz de explicar: el llamado “anillo de Newton”, el cual se explica hoy por la interferencia de las ondas

Cristian Huygens, contemporáneo de Newton, formuló por el año de 1678 la *teoría ondulatoria*, la cual supone que la luz consiste en un movimiento vibratorio transversal producido por partículas luminosas. Dicho movimiento ondulatorio se transmite a través del *éter*, medio sutil que llena todos los espacios. Con base en esta teoría se podían explicar todos los fenómenos luminosos conocidos hasta esa época.

Una encendida controversia tuvo lugar entre los partidarios de las dos teorías y no fue sino hasta que Young descubrió el fenómeno de la interferencia y Agustín Juan Fresnel el de la polarización cuando comenzó a ganar terreno la teoría ondulatoria.

A fines del siglo XIX, Jacobo Clerk Maxwell, demostró que la luz puede ser considerada como un movimiento ondulatorio electromagnético del éter. Maxwell imaginó la luz como una combinación de ondas eléctricas y magnéticas transversales que se mueven a una velocidad de 300 000 kilómetros por segundo.

En 1886, Enrique Hertz demostró la existencia de tales ondas y su gran parecido a las ondas de luz. Ocho años más tarde logró producirlas artificialmente en el laboratorio y comprobó que dichas ondas electromagnéticas son susceptibles de reflejarse, refractarse y polarizarse. Determinó además la velocidad de las mismas, que resultó ser igual a la de la luz.

De esa época a la fecha se ha venido a demostrar que la energía radiante de cualquier clase es siempre de naturaleza electromagnética, desde las ondas de radio, el calor, la luz visible y la luz ultravioleta, hasta los rayos X, y también posiblemente las radiaciones cósmicas. La diferencia esencial entre todas estas clases de radiaciones consiste en la longitud de onda. Maxwell y Hertz eliminaron por completo cualquier posible objeción que se presentará a la teoría ondulatoria de la luz. (La excepción es el fenómeno fotoeléctrico).

Sin embargo, al respecto de la naturaleza misma de la luz, hasta el presente se carece de una explicación plenamente satisfactoria. La antigua teoría corpuscular de la luz volvió a ganar adeptos a principios del siglo XX con el desarrollo de la mecánica cuántica; y hacia 1925 el descubrimiento de que los electrones, además de constituir partículas, presentan también propiedades ondulatorias vino a justificar concepciones eclécticas acerca de la naturaleza de la luz que comprendían nociones de ambas teorías, la corpuscular y la ondulatoria, a base de "corpúsculos-onda" u "ondas materiales".

En 1900 Maximiliano Planck ya había formulado su teoría cuántica, en la que se establece que la energía del universo es una magnitud discreta (fraccionada) cuya magnitud es el *cuanto*, o sea, la cantidad ínfima de energía que existe. Esta nueva concepción a dado origen a una rama de estudio denominada "mecánica ondulatoria", que intenta explicar de una manera puramente matemática la estructura del átomo y la naturaleza de la luz.

Dentro de este nuevo punto de vista las leyes naturales ya no presentan un carácter inflexible como el que tenían en la física clásica, sino que adquieren el de meras probabilidades estadísticas. Basándose en el cálculo de probabilidades, Werner Heisenberg ha establecido el principio de *indeterminación* y las relaciones de incertidumbre.

En consecuencia, las nuevas teorías sobre la naturaleza de la luz poseen un carácter totalmente distinto al de los inflexibles principios establecidos inicialmente por la mecánica clásica.

1.2 ENERGÍA RADIANTE Y LUZ

En ingeniería de iluminación, la luz es la energía radiante que se evalúa visualmente. La energía visible radiada por fuentes de luz se encuentra en una banda angosta del espectro electromagnético (ver figura 1.1), aproximadamente entre 380 y 770 nanómetros (nm). Por extensión, el arte y ciencia de la iluminación también comprenden las aplicaciones de radiación ultravioleta e infrarroja. Los principios de medición, métodos de control y fundamentos de sistemas de iluminación, así como el diseño de equipos en éstos campos están estrechamente relacionados con los establecidos desde hace mucho tiempo en la práctica de la iluminación.

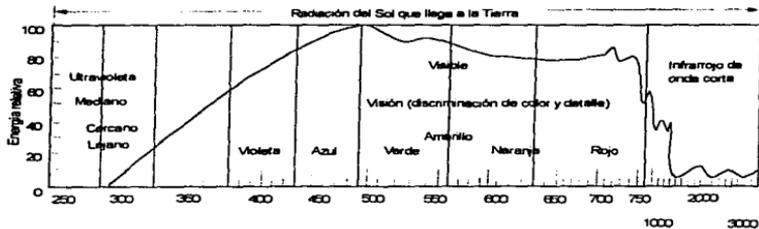


Figura 1.1 Las tres bandas principales del espectro electromagnético en las que se interesa la ingeniería de iluminación son: ultravioleta, visible e infrarrojo de onda corta

CAPITULO 2

LAS FUENTES DE LUZ NATURAL Y SU APROVECHAMIENTO

Los distintos movimientos de la Tierra con respecto al sol son los causantes de la constante variación de la luz natural que se recibe en un lugar específico del planeta. Como veremos más adelante, éstos movimientos tienen influencia directa en la formación de diversos fenómenos terrestres que ocasionan diferentes condiciones para el aprovechamiento y uso de la luz natural.

De la energía solar recibida en la superficie terrestre, 40% es radiación visible. El resto son longitudes de onda invisibles más cortas (ultravioletas) o más largas (infrarrojos). Cuando es absorbida, virtualmente toda la energía radiante que viene del sol es convertida en calor. La cantidad de energía visible usable del espectro solar varía con la altura y condiciones de la atmósfera que atraviesa la luz.

2.1 EL SOL COMO UNA FUENTE DE LUZ

El sol es una de las principales fuentes energéticas que tiene la Tierra. Debido a la gran importancia que tiene en muchos fenómenos terrestres (físicos, químicos y biológicos) y a su evidente influencia en la iluminación natural, estudiaremos la relación existente entre este astro y nuestro planeta.

Los dos principales movimientos de la Tierra en el espacio son: el de *rotación* o movimiento giratorio y el de *translación* o movimiento en una trayectoria elíptica, en la que el sol ocupa uno de los focos. Estos dos movimientos determinan cuándo y con qué ángulo de incidencia dan los rayos del sol sobre la superficie de la Tierra. La rotación de la Tierra es la causa del día y de la noche. La translación de la Tierra alrededor del sol produce las estaciones. El giro completo de la Tierra sobre su eje toma 24 horas y es de Oeste a Este.

El movimiento de translación se verifica en cerca de 365 días. La trayectoria curva u órbita de la Tierra es una elipse en la cual el sol ocupa uno de los focos. En consecuencia, las distancias de la Tierra al sol cambia en diferentes épocas del año. Cuando la Tierra esta más cerca del sol, en enero, la distancia entre ambos es de cerca de 147 220 000 km. Este es el perihelio. Cuando la tierra esta más lejana, en julio, la distancia es de unos 152 000 000 km. Este es el afelio. (Ver figura 2.1)

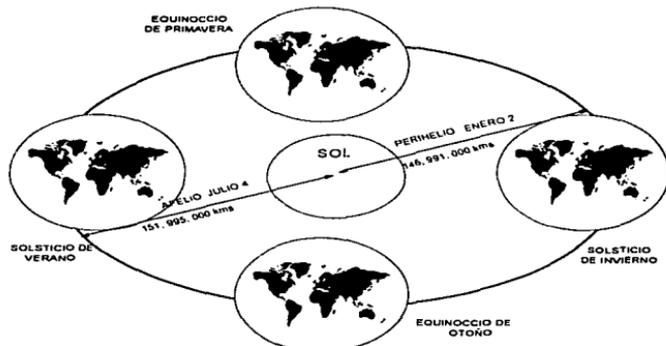


FIGURA 2.1 Posiciones de la tierra en su movimiento de translación anual, al ocurrir los equinoccios y los solsticios en el hemisferio septentrional. Al sur del ecuador las estaciones estan invertidas.

Al girar la Tierra alrededor del sol conserva su eje en la misma dirección durante todo el recorrido anual. El ecuador de la Tierra forma con la elíptica un ángulo que actualmente es de 23 grados y 27 minutos. El plano del ecuador corta el plano de la elíptica según una recta que toca la elíptica en dos puntos. A estos puntos se les llama los *equinoccios* y la Tierra pasa por ellos en los días 21 de marzo y 23 de septiembre.

En el hemisferio norte a partir del equinoccio de primavera que es el 21 de marzo, los días solares, es decir la permanencia del sol sobre el horizonte, se van haciendo más largos hasta el 21 de junio (se experimenta ahí el período más largo de luz diurna). Del 21 de junio hasta el 23 de septiembre los días solares se acortan de nuevo y siguen acortándose hasta el 21 de diciembre, que es el día más corto. Este fenómeno, que en el hemisferio sur se realiza de idéntica manera pero a la inversa, produce también las estaciones del año.

2.2 EL CIELO COMO UNA FUENTE DE LUZ

Como la luz solar pasa a través de la atmósfera, una parte es dispersada por polvo, vapor de agua y otras partículas suspendidas. Esta dispersión, actuando de acuerdo con las nubes produce la luminancia del cielo. El cielo es dividido en tres categorías: (1) despejado, (2) parcialmente nublado y (3) nublado.

Cuando el cielo no está completamente nublado, la distribución de la luminancia del cielo puede cambiar rápidamente y en grandes cantidades cuando el sol es alternadamente ocultado, semiocultado o completamente descubierto.

2.3 EL PISO COMO UNA FUENTE DE LUZ

La luz reflejada por el piso puede ser importante en el diseño de iluminación natural. Dicha luz es reflejada por el techo o las paredes sobre otras superficies interiores. La luz reflejada por el suelo representa típicamente de 10 a 15% del total de la luz natural que entra por una ventana. Este porcentaje es frecuentemente excedido cuando el suelo tiene algún color, como en el caso de la arena o nieve.

Cuando la ventana es cubierta por una sombra, esta cantidad puede ser igual al total de luz que entra por la ventana, dependiendo de las condiciones del cielo y el diseño del espacio interior. La figura 2.2 puede ayudarnos a comprender lo anteriormente expuesto.

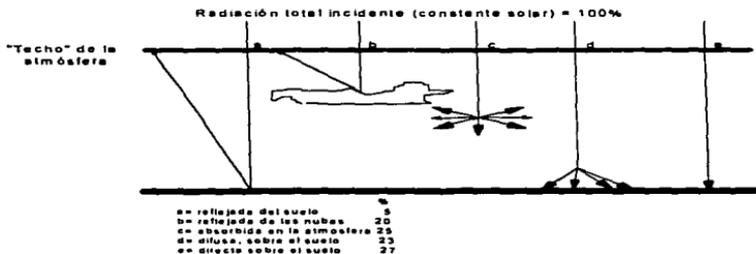


Figura 2.2 Paso de la radiación a través de la atmósfera

2.4 APROVECHAMIENTO DE LA LUZ NATURAL

El cálculo de la luz recibida de las "fuentes" es considerablemente más complejo para la luz natural que para las fuentes eléctricas. La determinación de la iluminancia incidente en las ventanas y tragaluces debe tomar en cuenta a las características de variación temporal del cielo y el sol, incluyendo la relación que existe entre el sol y las aberturas que proporcionan la iluminación natural.

La frase *aprovechamiento de la luz natural* se refiere a la cantidad de luz que viene del sol y el cielo para un lugar, tiempo, fecha y condiciones del cielo específicos.

Las mediciones de iluminancia debida a la luz natural hechas por varios investigadores en todo el mundo en los últimos 60 años han resultado muy similares en sus valores promedio. Las ecuaciones que dan el aprovechamiento de la iluminancia debida a la luz natural son determinadas de esos valores.

Los datos de aprovechamiento de la luz natural y las ecuaciones derivadas de ellos, no expresan valores instantáneos de luminancia e iluminancia; ellos dan valores promedio. Esto es, las ecuaciones proporcionan los mejores datos promediados de las secciones medidas. Por esta razón, las medidas instantáneas de luminancia e iluminancia pueden diferir grandemente de aquellas determinadas por métodos de cálculo basados en el aprovechamiento de la luz natural.

El cálculo del aprovechamiento de la luz natural en un lugar comienza con la determinación de la posición del sol, la cual está en función de:

- Latitud y longitud del lugar
- Día del año (Calendario Juliano)
- El tiempo local

El tiempo local es convertido a tiempo solar. Los ángulos son calculados porque dan la posición del sol en el cielo. Finalmente, para una condición del cielo particular, las ecuaciones de aprovechamiento de la luz natural son usadas para calcular la iluminancia debida a la luz natural. Todos los ángulos son expresados en radianes.

CAPITULO 3

GEOMETRIA SOLAR

3.1 UBICACIÓN DEL LUGAR

La ubicación del lugar está especificada por una latitud l y una longitud L . Las latitudes y las longitudes pueden ser tomadas de algún manual o almanaque. La figura 3.1 muestra las latitudes y longitudes de algunas ciudades de América del Norte.

País, Ciudad	Latitud		Longitud	
	Grados	Radianes	Grados	Radianes
Canadá				
Otawa, ON	45	0.79	76	1.33
Montreal, PQ	46	0.80	74	1.29
Toronto, ON	44	0.77	79	1.38
Vancouver, BC	49	0.85	123	2.15
Winnipeg, MB	50	0.87	97	1.69
México				
México D.F.	19	0.33	99	1.73
Estados Unidos				
Anchorage, AK	61	1.06	150	2.62
Big Rapids, MI	44	0.77	85	1.48
Boulder, CO	40	0.70	105	1.83
Chicago, IL	42	0.73	88	1.54
Cleveland, OH	41	0.72	82	1.43
Dallas, TX	33	0.58	97	1.69
Honolulu, HI	21	0.37	158	2.76
Los Angeles, CA	34	0.59	118	2.06
Miami, FL	26	0.45	80	1.40
New York, NY	41	0.72	74	1.29
Philadelphia, PA	40	0.70	75	1.31
Seattle, WA	48	0.84	122	2.13
Troy, NY	43	0.75	74	1.29
Washington, DC	39	0.68	77	1.34

Figura. 3.1. Latitud y Longitud de algunas ciudades de Norte América

3.1 UBICACIÓN DEL LUGAR

La ubicación del lugar está especificada por una latitud l y una longitud L . Las latitudes y las longitudes pueden ser tomadas de algún manual o almanaque. La figura 3.1 muestra las latitudes y longitudes de algunas ciudades de América del Norte.

País, Ciudad	Latitud		Longitud	
	Grados	Radianes	Grados	Radianes
Canada				
Otawa, ON	45	0.79	76	1.33
Montreal, PQ	46	0.80	74	1.29
Toronto, ON	44	0.77	79	1.38
Vancouver, BC	49	0.85	123	2.15
Winnipeg, MB	50	0.87	97	1.69
México				
México D.F.	19	0.33	99	1.73
Estados Unidos				
Anchorage, AK	61	1.06	150	2.62
Big Rapids, MI	44	0.77	85	1.48
Boulder, CO	40	0.70	105	1.83
Chicago, IL	42	0.73	88	1.54
Cleveland, OH	41	0.72	82	1.43
Dallas, TX	33	0.58	97	1.69
Honolulu, HI	21	0.37	158	2.76
Los Angeles, CA	34	0.59	118	2.06
Miami, FL	26	0.45	80	1.40
New York, NY	41	0.72	74	1.29
Philadelphia, PA	40	0.70	75	1.31
Seattle, WA	48	0.84	122	2.13
Troy, NY	43	0.75	74	1.29
Washington, DC	39	0.68	77	1.34

Figura 3.1. Latitud y Longitud de algunas ciudades de Norte América

Las convenciones usadas para expresar las latitudes son:

Positivo = Hemisferio Norte

Negativo = Hemisferio Sur

Las convenciones usadas para expresar las longitudes son:

Positivo = El primer meridiano del oeste (Greenwich, U.K.)

Negativo = El primer meridiano del este.

3.2 TIEMPO

Un reloj de 24 horas es usado para expresar el tiempo. El tiempo solar puede ser determinado de un tiempo estándar (o tiempo de luz natural) correctamente (1) por la longitud del lugar entre el tiempo de zona y (2) por la ecuación de tiempo. La ecuación de tiempo da la diferencia entre el tiempo solar y el tiempo de reloj debida a:

- Las órbitas elípticas de la Tierra.
- La declinación del eje solar.

El valor de la ecuación del tiempo puede ser determinada con:

$$ET = 0.170 \operatorname{sen} \left(\frac{4\pi(J-80)}{373} \right) - 0.129 \operatorname{sen} \left(\frac{2\pi(J-8)}{355} \right) \quad (3-1)$$

donde:

ET= Es el tiempo expresado en horas decimales (por ejemplo, 1:30pm= 13.5)

J= Día del año en calendario juliano, un número entre 1 y 365.

Esta ecuación son los mínimos cuadrados que mejor se ajustan para una mayor precisión de la ecuación de tiempo dada por Lamm. Es suficientemente precisa para los cálculos de iluminación natural.

Cada zona de tiempo tiene una longitud de referencia que es usada en el cálculo del tiempo solar. Estos meridianos estandarizados estan dados en la figura 3.2

Figura 3.2 Meridianos estandarizados para las zonas de tiempo

Zona de tiempo	Meridianos estandarizados	
	Grados	Radianos
Atlántico	60	1.05
Ceñtral	75	1.31
Central	90	1.57
Musña	105	1.83
Pacífico	120	2.09
Alaska-Hawai	150	2.62
Berug	165	2.88

La relación entre el tiempo estándar y el tiempo de luz natural esta dado por:

$$t_s = t_d - l \quad (3-2)$$

donde:

t_s = tiempo estándar en horas decimales

t_d = tiempo de luz natural en horas decimales

El tiempo solar es calculado usando el tiempo estándar y la ecuación:

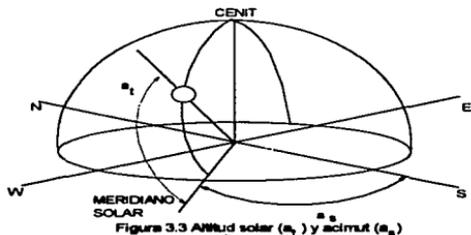
$$t = t_s + ET + \frac{12(SM - L)}{\pi} \quad (3-3)$$

donde:

- t = tiempo solar en horas decimales
 t_s = tiempo estándar en horas decimales
 ET = tiempo dado por la ecuación 3-1, página 13, en horas decimales
 SM = Meridiano estándar de la zona de tiempo, en radianes
 L = Longitud del lugar en radianes

3.3 POSICIÓN SOLAR

La posición del sol en el hemisferio celeste en cualquier lugar, hora y día, puede determinarse en función de dos ángulos: acimut (a_s) y altitud (a_t). Estos dos ángulos indican la posición del sol en relación a las coordenadas geográficas de un lugar. (Ver figura 3.3).



La declinación solar puede ser cuidadosamente aproximada por:

$$\delta = 0.4093 \operatorname{sen}\left(\frac{2\pi(J-81)}{368}\right) \quad (3-4)$$

donde:

- δ = declinación solar en radianes
- J = día del año (en calendario juliano)

La altitud solar está dada por:

$$\alpha_t = \arcsen\left(\frac{\sin l \sin \delta - \cos l \cos \delta \cos \frac{\pi t}{12}}{1}\right) \quad (3-5)$$

donde:

- α_t = altitud solar en radianes
- l = latitud del lugar en radianes
- δ = declinación solar en radianes
- t = tiempo solar en horas decimales

La altitud solar tiene un rango de $\pi/2$. Si el sol está por debajo del horizonte, la ecuación 3-5 da un valor negativo.

El acimut solar está dado por:

$$\alpha_s = \arctan\left(\frac{-[\cos \delta \sin(\pi t / 12)]}{-[\cos l \sin \delta + \sin l \cos \delta \cos(\pi t / 12)]}\right) \quad (3-6)$$

donde :

- α_s = acimut solar en radianes
- l = latitud del lugar en radianes
- δ = declinación solar en radianes
- t = tiempo solar en horas decimales

Si la posición del sol se quiere especificar en relación a la fachada de un edificio, ello puede hacerse a través de otros dos ángulos: *ángulo de sombra horizontal* (a_e) y *ángulo de sombra vertical* (a_p). Estos ángulos se miden a partir de una perpendicular a la superficie analizada (pared o ventana), localizada en el plano horizontal y vertical (a_e y a_p).

Para efectos de diseño y evaluación de dispositivos de control solar y/o determinación de la forma y orientación óptima de un edificio, el uso de los ángulos de acimut y altitud (a_s y a_t) no es conveniente. Es de mayor validez para el diseño y evaluación de dispositivos de control solar, el uso de los ángulos de sombra horizontal (a_e) y vertical (a_p).

Definición y relación geométrica de los ángulos solares de importancia en el diseño.

Ángulo de sombra horizontal (a_e) es el ángulo que se forma a partir de una perpendicular a la superficie o fachada en estudio y la línea que interseca la proyección del sol en el plano horizontal. Se define también como la diferencia acimutal, es decir:

$$a_e = a_s - a_0 \quad (3-7)$$

donde a_0 es la orientación de la fachada analizada, medida, al igual que el acimut, a partir del norte. A a_0 también se le conoce como acimut de pared.

Ángulo de sombra vertical (a_p) es la proyección del ángulo solar de altitud en un plano perpendicular a la fachada del edificio. Cuando los rayos solares caen perpendicularmente a la fachada (es decir, $a_s = a_0$), el ángulo solar de altitud y el ángulo de sombra vertical son idénticos, $a_t = a_p$.

En todos los demás casos, cuando el sol está hacia un lado u otro de la orientación normal del edificio, el ángulo de sombra vertical es mayor que el ángulo solar de altitud: $\alpha_p > \alpha_t$. El ángulo de sombra vertical se calcula con la ecuación:

$$\tan \alpha_p = \tan \alpha_t / \cos \alpha_e \quad (3-8)$$

El ángulo de incidencia (α_i) sobre un plano se mide entre la normal sobre este plano y la dirección del sol. Puede obtenerse para cualquier plano a partir de la siguiente ecuación:

$$\cos \alpha_i = (\sin \alpha_t * \cos \alpha_x) + (\cos \alpha_e * \cos \alpha_t * \sin \alpha_x) \quad (3-9a)$$

donde α_x es la inclinación del plano analizado a partir de la horizontal.

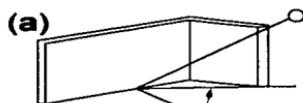
Para una superficie vertical, puesto que $\alpha_x = 90^\circ$, será $\cos \alpha_x = 0$ y $\sin \alpha_x = 1$, simplificándose la expresión:

$$\cos \alpha_i = \cos \alpha_e * \cos \alpha_t \quad (3-9b)$$

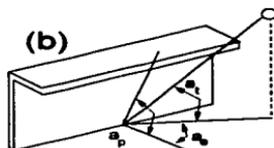
Para una superficie horizontal, puesto que $\alpha_x = 0$, será $\cos \alpha_x = 1$ y $\sin \alpha_x = 0$, entonces:

$$\cos \alpha_i = \sin \alpha_t = \frac{\pi}{2} - \alpha_t \quad (3-9c)$$

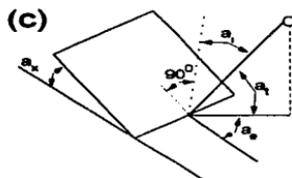
Todos éstos ángulos se pueden observar en la figura 3.4.



3.4 (a) Angulo de sombra horizontal o diferencia acimutal entre la orientación del edificio y la posición del sol

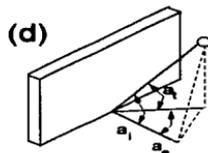


3.4 (b) Angulo de sombra vertical, o la dirección del sol proyectada sobre un plano vertical perpendicular a la superficie del edificio



3.4 (c) Angulo de incidencia sobre un plano inclinado

Figura 3.4



3.4 (d) Angulo de incidencia sobre plano vertical

3.4 LUZ SOLAR

Para los cálculos básicos de iluminación natural, el sol es considerado por ser una fuente que proporciona una iluminancia constante en un punto de un plano. La iluminación solar constante es la iluminancia solar total que incide normalmente en una superficie en el espacio libre, en la distancia promedio de la tierra a el sol. Esta es obtenida de:

$$E_{sc} = k_m \int_{380}^{770} G_{\lambda} V_{\lambda} d\lambda \quad (3-10)$$

donde:

E_{sc} = iluminación solar constante en Klx

k_m = eficacia luminosa espectral del flujo solar radiante en lm/W

G_{λ} = irradiación espectral solar con longitud de onda λ en W

V_{λ} = eficiencia luminosa espectral con longitud de onda λ

λ = longitud de onda en nm (para visión fotópica con 380-770nm)

Los siguientes son parámetros solares importantes basados en estándares actuales:

iluminación solar constante: 128 Klx

irradiación solar constante: 1350 W/m² (126 w/ft²)

eficacia luminosa solar: 92.2 lm/W

Para calcular la luz solar que incide en el piso, lo siguiente debe ser considerado:

- Variación de la distancia de la tierra a el sol causada por la órbita elíptica terrestre.
- Los efectos de la atmósfera terrestre.

La iluminación solar extraterrestre, corregida por la órbita elíptica terrestre es:

$$E_{xt} = E_{sc} \left(1 + 0.034 \cos \frac{2\pi(J-2)}{365} \right) \quad (3-11)$$

donde:

E_{xt} = iluminancia solar extraterrestre en Klx

E_{sc} = iluminación solar constante en Klx

J = día del año (en calendario juliano)

La iluminancia normal directa al nivel del mar E_{dn} , corregida por los efectos atenuantes de la atmósfera, está dada por:

$$E_{dn} = E_{xt}e^{-cm} \quad (3-12)$$

donde:

E_{dn} = iluminancia solar normal directa en Klx

E_{xt} = iluminancia solar extraterrestre en Klx

c = coeficiente de extinción atmosférica (ver figura 3-5)

m = masa de aire óptico (adimensional)

Figura. 3.5. Constantes de Aprovechamiento de la luz natural

Condición del cielo	c	A (klx)	B (klx)	C
Despejado	0.21	0.8	15.5	0.5
Seminublado	0.80	0.3	45.0	1.0
Nublado	*	0.3	21.0	1.0

*Sol no directo, $E_{dn} = 0$.

Los valores de los coeficientes de extinción atmosférica discutidos más adelante, varían con las condiciones del cielo. La ecuación más simple y más utilizada para la representación de la masa de aire óptico es:

$$m = \frac{1}{\sin \alpha_t} \quad (3-13)$$

donde:

m = masa da aire óptico (adimensional)

α_t = altitud solar en radianes

La luz solar directa sobre un plano está dada por:

$$E_{dh} = E_{dn} \sin \alpha_t \quad (3-14)$$

donde:

E_{dh} = iluminancia solar horizontal directa en Klx

E_{dn} = iluminancia solar normal directa en Klx

α_t = altitud solar en radianes.

La luz solar directa en un plano vertical está expresada con:

$$E_{dv} = E_{dn} \cos \alpha_i \quad (3-15)$$

donde:

E_{dv} = iluminancia solar vertical directa en Klx

E_{dn} = iluminancia solar normal directa en Klx

α_i = ángulo incidente en radianes

3.5 LUZ DEL CIELO

Cualquiera de los métodos de relación del cielo o el método de cielo nublado es usado para clasificar un cielo. La relación del cielo es determinada por la división de la irradiación horizontal del cielo entre la irradiación horizontal global. La relación de cielo se aproxima a 1.0 cuando la altitud solar se aproxima a cero, (prescindiendo de las condiciones del cielo), este método no es seguro para altitudes solares bajas. Las condiciones del cielo están definidas como sigue:

Despejado:	relación del cielo ≤ 0.3
seminublado:	$0.3 < \text{relación del cielo} < 0.8$
nublado:	relación del cielo ≥ 0.8

El método de cielo nublado es usado para estimar la cantidad de nubosidad. La nubosidad es estimada en décimas y es expresada en una escala de 0.0 para no nublados a 1.0 para cielos completamente nublados. Las condiciones del cielo son las siguientes:

despejado:	0.0 - 0.3
seminublado:	0.4 - 0.7
nublado:	0.8 - 1.0

La iluminancia horizontal producida por el cielo puede ser expresada en función de la altitud solar:

$$E_{kh} = A + B \sin^2 \alpha_t \quad (3-16)$$

donde:

E_{kh} = iluminancia horizontal debida a la luz de cielo no obstruido en Klx

A = iluminancia en la salida del sol/puesta del sol en Klx

B = coeficiente de iluminancia de la altitud solar en Klx

c = exponente de la iluminancia de la latitud solar

α_1 = altitud solar en radianes

La forma de la ecuación es la misma para las tres condiciones de cielo, con diferentes constantes para cada condición de cielo (ver figura 3.5, página 21)

Una ecuación diferente es usada para representar la distribución de luminancia promedio de cada una de las tres condiciones. La luminancia del cielo está en función de

- La distribución de luminancia con respecto a la luminancia cenit
- El valor absoluto de la iluminación cenit

En el método usado aquí, el factor de luminancia cenit es usado para calcular la luminancia cenit de la iluminancia horizontal del cielo:

$$L_z = E_{kh} ZL \quad (3-17)$$

donde:

L_z = luminancia cenit en kcd/m²

E_{kh} = iluminancia horizontal debida a la luz del cielo despejado dada por la ecuación 3-16 en Klx

ZL = factor de luminancia cenit con la misma altitud solar de E_{kh} en kcd/(m² * klx)

Los valores para el factor de luminancia cenit pueden ser tomados de la figura 3.6. Ecuaciones más detalladas para la luminancia cenit han sido desarrolladas con efectos incluidos tales como las diferencias en las atmósferas turbias.

Figura. 3.6 Luminancia Cenit del Cielo (ZL) Constantes
para Cielo Cubierto, $ZL = 0.409$ para cualquier Altitud Solar

Altitud Solar (Grados)	Cielo Despejado	Cielo Semanublado
	ZL	ZL
90	.1034	.637
85	.825	.567
80	.664	.501
75	.541	.457
70	.445	.413
65	.371	.375
60	.314	.343
55	.269	.315
50	.234	.292
45	.206	.272
40	.185	.255
35	.169	.241
30	.156	.230
25	.148	.221
20	.142	.214
15	.139	.209
10	.139	.205
5	.140	.202
0	.144	.201

Los ángulos usados en las determinaciones de la luminancia del cielo son mostrados en la figura 3.7. La posición del sol en la figura 3.7 está dada por el acimut solar α_s y el ángulo solar cenital Z_0 . Note que Z_0 está relacionado con la altitud solar α_t por la formula:

$$Z_0 = \frac{\pi}{2} - \alpha_t \quad (3-18)$$

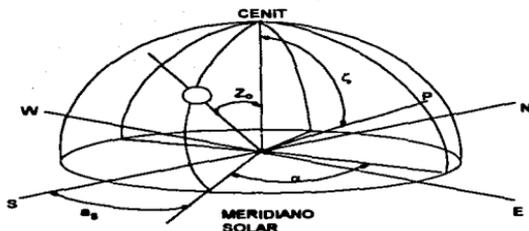


Figura 3.7 Ángulos del cielo

La posición de un punto P en el cielo (en el cual la luminancia del cielo es calculada) está dada por los ángulos ζ , el ángulo en el punto cenital en radianes, y α , el ángulo acimut del sol en radianes.

Una función estándar para la distribución de la luminancia de cielo despejado fue desarrollada por Kittler y adoptada por la CIE.

$$L_{\zeta, \alpha} = L_z \frac{(0.91 + 10e^{-3\gamma} + 0.45 \cos^2 \gamma)(1 - e^{-0.32/\cos \zeta})}{(0.91 + 10e^{-3Z_0} + 0.45 \cos^2 Z_0)(1 - e^{-0.32})} \quad (3-19)$$

donde:

$L_{\zeta, \alpha}$ = luminancia del cielo en el punto P en coordenadas esféricas ζ y α en kcd/m^2

L_z = luminancia cenit del cielo en kcd/m^2

γ = ángulo entre el sol y el punto P del cielo en radianes (ec. 3-20)

ζ = ángulo del punto cenital en radianes

α = ángulo acimut del sol en radianes

Z_0 = ángulo del sol cenital en radianes

El ángulo γ entre el sol y el punto p está dado por:

$$\gamma = \arccos(\cos Z_0 \cos \zeta + \sin Z_0 \sin \zeta \cos \alpha) \quad (3-20)$$

donde Z_0 , ζ , α están definidos en la ecuación 3-19. Esta ecuación no considera los cambios en la distribución de luminancia debido a los cambios atmosféricos, los cuales pueden substancialmente alterar la distribución de luminancia del cielo.

La ecuación para un cielo seminublado es similar en forma a la distribución de cielo despejado, pero tiene diferentes valores de las constantes basadas en los datos promedio para cielos seminublados.

$$L_{\zeta, \alpha} = L_z \frac{(0.526 + 5e^{-1.5\gamma})(1 - e^{-0.80/\cos \gamma})}{(0.526 + 5e^{-1.5Z_0})(1 - e^{-0.80})} \quad (3-21)$$

donde los símbolos tienen los mismos significados que en la ecuación 3-19.

La ecuación para cielo nublado es:

$$L_{\zeta, \alpha} = L_z \left(0.864 \frac{e^{-0.52/\cos \zeta}}{e^{-0.52}} + 0.136 \frac{1 - e^{-0.52/\cos \zeta}}{1 - e^{-0.52}} \right) \quad (3-22)$$

donde los símbolos tienen los mismos significados que en la ecuación 3-19.

La forma de la ecuación para cielo nublado puede ser derivada de los primeros principios.

El primer término proporciona la contribución de luminancia de la atmósfera y el segundo término proporciona la contribución de luminancia de la atmósfera entre el piso y ésta. Las constantes son elegidas para dar un mejor ajuste de los datos originales usados por Moon y Spencer en su tratamiento de cielo nublado.

La ecuación empírica Moon-Spencer para la distribución de luminancia de un cielo nublado es:

$$L_{\zeta,\alpha} = \frac{L_z}{3} (1 + 2 \cos \zeta) \quad (3-23)$$

donde:

$L_{\zeta,\alpha}$ = luminancia del cielo en kcd/m^2

L_z = luminancia cenit del cielo en kcd/m^2

ζ = ángulo del punto cenital en radianes

Esta ecuación ha sido casi universalmente usada para representar los cielos nublados durante los últimos 40 años y fue adoptada por la CIE en 1955. Es significativamente histórico que un gran número de métodos de cálculo de luz natural están basados en esto. Hay diferencias numéricas muy pequeñas entre la ecuación 3-22 y la ecuación 3-23 por las constantes apropiadas.

La iluminancia en una superficie horizontal producida por un elemento diferencial del cielo está dada por:

$$dE_{\text{kh}} = L_{\zeta,\alpha} \cos \zeta d\omega = L_{\zeta,\alpha} \cos \zeta \sin \zeta d\alpha d\alpha \quad (3-24a)$$

donde:

E_{kh} = iluminancia en la superficie horizontal en klx

$L_{\zeta,\alpha}$ = luminancia del cielo en el punto p con coordenadas esféricas ζ y α en kcd/m^2

$d\omega$ = elemento diferencial de ángulo sólido en la dirección del punto p

ζ = ángulo en el punto cenital en radianes.

α = ángulo acimut del sol en radianes.

Esta ecuación asume coordenadas esféricas. Estas pueden ser integradas para dar la iluminancia horizontal producida por un área del cielo.

$$E_{kh} = \iint L_{\zeta,\alpha} \sin \zeta \cos \zeta d\zeta d\alpha \quad (3-24b)$$

donde:

E_{kh} = iluminancia en la superficie horizontal en klx

$L_{\zeta,\alpha}$ = luminancia del cielo en el punto p con coordenadas esféricas ζ y α , en Kcd/m^2

ζ = ángulo en el punto cenital en radianes

α = ángulo acimut del sol en radianes

Los límites de integración dependen de la posición y la extensión de la parte del cielo evaluada. Para todo el cielo, la integración es sobre un hemisferio. Está dada por:

$$E_{kh} = \int_0^{2\pi} \int_0^{\pi/2} L_{\zeta,\alpha} \sin \zeta \cos \zeta d\zeta d\alpha \quad (3-25)$$

Similarmente, la iluminancia sobre una superficie vertical debida únicamente al cielo está dada por:

$$E_{kv} = \int_{\alpha_z - \pi/2}^{\alpha_z + \pi/2} L_{\zeta, \alpha} \sin^2 \zeta \sin \alpha d\zeta d\alpha \quad (3-26)$$

Las ecuaciones 3-25 y 3-26 son usualmente aproximadas mediante sumas finitas de productos de valores diferenciales y discretos.

Para los casos donde la iluminancia es deseada en un punto de un plano vertical u horizontal, en el que tienen libre acceso de el sol y el cielo y la posición del sol, pueden ser obtenidas de gráficas (figuras 3.8 a 3.15). Estas están basadas en las ecuaciones 3-25 y 3-26.

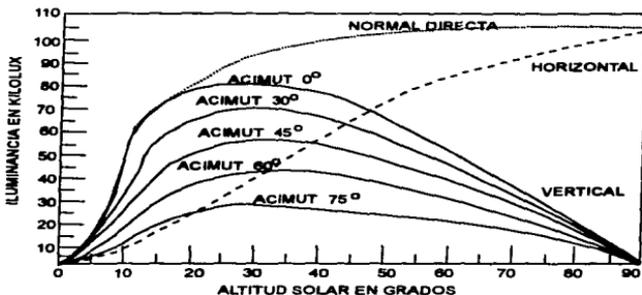


Figura 3.8 Iluminancia del sol bajo condiciones de cielo despejado en función de la altitud solar y el acimut

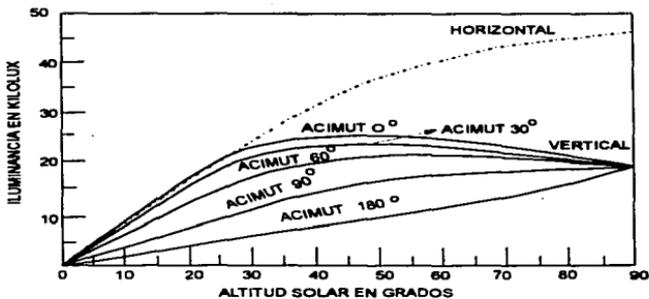


Figura 3.9 Iluminancia en superficies verticales bajo condiciones de cielo semi nublado en función de la altitud solar y el acimut

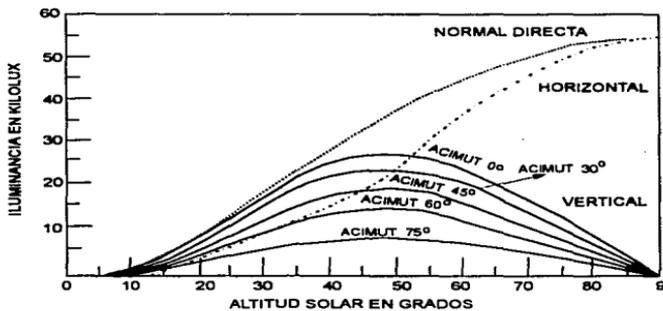


Figura 3.10 Iluminancia de el sol bajo condiciones de cielo semi nublado en función de la altitud solar y el acimut

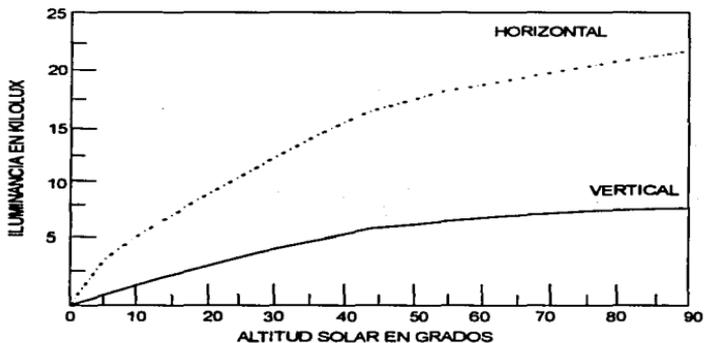


Figura 3.11 Iluminancia en superficies verticales con condiciones de cielo nublado en función de la altitud solar

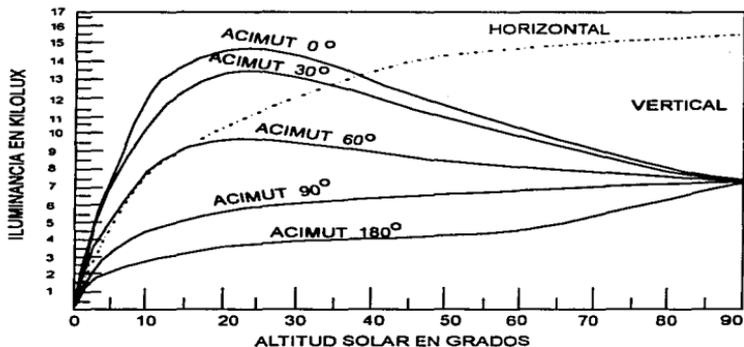


Figura 3.12 Iluminancia en superficies verticales con condiciones de cielo despejado y en función de la altitud solar y el acimut

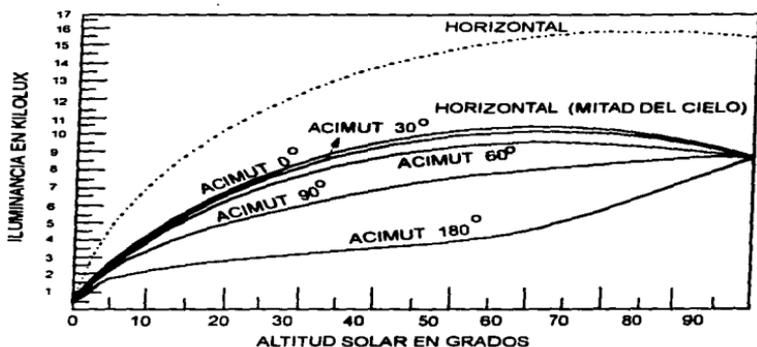


Figura 3.13 Iluminancia en superficies horizontales con condiciones de cielo despejado y en función de la altitud solar y el acimut

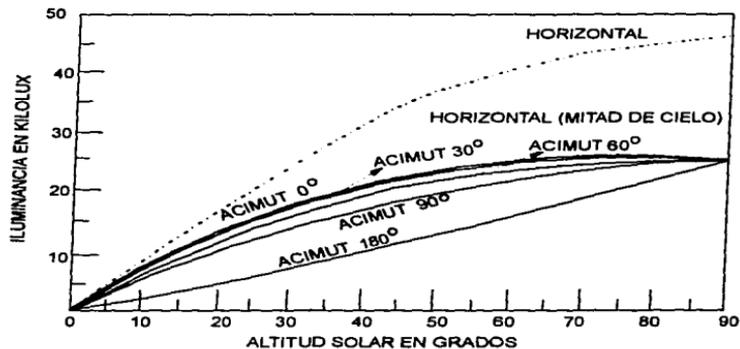


Figura 3.14 Iluminancia en superficies horizontales bajo condiciones de cielo semi nublado en función de la altitud solar y el acimut

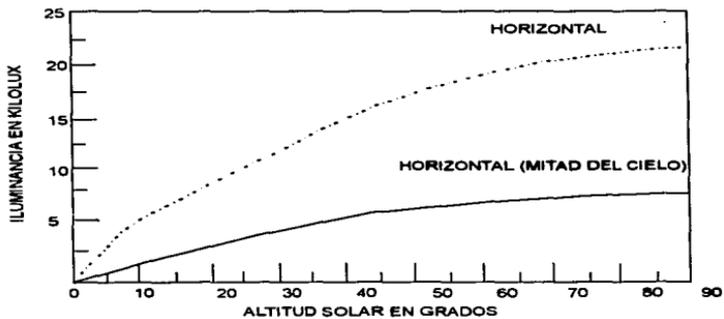


Figura 3.15 Iluminancia en superficies horizontales con condiciones de cielo nublado en función de la altitud solar

CAPITULO 4

ILUMINACION NATURAL

4.1 DISEÑO DEL CAMPO VISUAL

Es importante que la provisión de visión y la proporción (cantidad) de luz natural estén claramente diferenciadas. Aunque los términos "campo visual" e "iluminación natural" son algunas veces usados en forma indistinta, la función del campo visual de las ventanas es muy diferente de la función de la proporción (cantidad) de la luz natural. La provisión de luz natural únicamente (por ejemplo, a través de un tragaluz) no satisface los deseos de los usuarios para el campo visual que desean manejar, incluyendo el cielo el horizonte y la tierra.

Se supone que, para satisfacer más a los usuarios, las ventanas deben cubrir un mínimo de 20% del área de la pared que las contenga. Los vidrios pintados en forma excesiva para reducir el brillo y el calor solar, dan una mala apariencia exterior, sobre todo en días soleados.

4.2 EL BRILLO DE LA LUZ NATURAL

Los sistemas de iluminación natural pueden producir un brillo molesto. Grandes relaciones de luminancia son producidas a menos que se tenga el cuidado de balancear y reducir las luminancias. Puede ser que sea necesario aumentar la iluminación eléctrica interior para balancear las luminancias y reducir el brillo producido por la luz natural. De este modo se incrementa la energía empleada cuando la iluminación natural es usada. El brillo es críticamente dependiente de la luminancia de las ventanas. Métodos para predecir la presencia de brillo en grandes áreas han sido desarrollados.

Debido a su intensidad, la luz solar directa debe ser también considerada en el control del brillo. La luz solar directa deberá ser excluida de áreas donde se desarrollen tareas visuales críticas. La duración de la exposición solar más que su intensidad o el tamaño de la abertura que proporciona la luz solar, correlaciona mejor con la apreciación de la luz solar interior.

4.3 EL FACTOR HUMANO.

Las persianas venecianas y las cortinas son comúnmente usadas en dispositivos para ajustar la cantidad de luz natural que entra por una ventana, reduciendo su luminancia y controlando el brillo. Estos dispositivos pueden reducir drásticamente la cantidad de luz natural admitida en un espacio y el que las persianas se usen o no es una importante consideración en el cálculo de ahorro de energía debida a la de iluminación natural. Los usuarios ajustan las persianas venecianas rara vez, teniendo una posición preferente que depende de la orientación de la fachada y la estación del año.

4.4 EFECTO DE LA LUZ NATURAL EN LOS ESPACIOS INTERIORES

EFECTOS DE LA LUZ NATURAL EN LOS MATERIALES Y LAS OBRAS DE ARTE

La luz natural es de particular importancia con respecto al daño que provoca a materiales y obras de arte debido a su alta intensidad con respecto a la luz de las fuentes eléctricas. La luz a cualquier frecuencia, no solo en el rango ultravioleta, (UV), contribuye a una pérdida gradual del color y otros daños. De cualquier modo, ya se sabe que los rayos UV participan activamente en el proceso de pérdida gradual de intensidad (del color).

La luz natural no filtrada tiene casi diez veces más radiación ultravioleta por lumen que la luz eléctrica. El gran tiempo que los materiales están expuestos a la luz natural es un factor de pérdida gradual del color; mientras más tiempo dure la exposición mayor es el daño. La exposición de mercancías sensibles a la luz natural debe, por lo tanto, ser minimizada.

4.5 DISEÑO DE ILUMINACIÓN NATURAL

La provisión de aberturas para la iluminación natural debe ser considerada en las decisiones que se tomen con respecto a la economía de la construcción, composición arquitectónica, control térmico, ventilación, acústica y otros factores de diseño. Aún cuando las ventanas y tragaluces son provistos para una iluminación agradable solamente, los efectos de la iluminación natural deben ser considerados para evitar el brillo y los problemas térmicos. Un extenso rango de aproximaciones deberán ser asumidas para obtener un promedio básico de iluminación natural de interiores.

El diseño efectivo de iluminación natural requiere de la consideración de la interacción de los sistemas constructivos del lugar que se quiera iluminar. Por ejemplo, la instalación de sistemas ahorradores de energía pueden proveer sólo mínimos ahorros, si los vidrios usados para controlar el brillo son excesivamente pintados; esto reduce considerablemente la admisión de luz natural.

Es esencial que la variación de la luz natural con respecto al tiempo sea considerada en el diseño. No solo las condiciones estáticas pueden proveer una base razonable en el diseño de iluminación natural (ver capítulo 2).

LA PENETRACIÓN DE LA LUZ NATURAL Y EL CONTROL DE BRILLO

El control de brillo es la mayor consideración en iluminación natural debido a la intensidad de las fuentes (especialmente en el caso de luz solar directa) y debido a que, en muchas situaciones (por ejemplo, iluminación lateral en un plano profundo del espacio interior que se esté analizando) lograr un balanceo de la iluminación es difícil con una sola fuente distribuida irregularmente en el espacio interior.

Una regla es que la distancia útil de la penetración de la luz natural para iluminación lateral es usualmente no más del doble de la altura del borde superior de la ventana.

Control del brillo de la luz solar directa. Debido a la intensidad de la luz solar directa, el brillo directo o indirecto puede ser un problema serio. Los diseños deben ser desarrollados de manera que la luz solar directa sea o pueda ser excluida de lugares donde se realicen tareas visuales importantes. Las fuentes de reflexión también deben ser identificadas y eliminadas o su reflectancia reducida cuanto sea posible.

El brillo producido por la luz solar reflejada, aunque sea por pocos minutos del día, puede inducir al usuario a tomar medidas de reducción de la admisión de luz por un largo tiempo.

Control del brillo de la luz natural difusa. El brillo se incrementa substancialmente con grandes campos visuales de la parte alta del cielo. Esto puede ser evitado con la limitación de la altura de la parte superior de la ventana en áreas donde se realicen tareas importantes, proyectando las ventanas más altas que el campo visual, o con la colocación de las aberturas de iluminación natural lo bastante altas como para que queden fuera de el campo normal de visión.

La tarea puede también ser orientada para que el usuario no se moleste con la ventana, aunque esto puede crear problemas con las preferencias del usuario. El brillo puede ser también reducido usando luces de colores en superficies interiores. Esto es importante en áreas adyacentes a las ventanas, las cuales son típicamente las superficies de más alta luminancia.

EVALUACIÓN DE LOS DISEÑOS

Una secuencia lógica en la evaluación de diseños propuestos es la siguiente:

1. Determinar si la luz solar puede caer en un área donde debería ser excluida, y una dirección que ocasione problemas por cambiar las aberturas de iluminación natural, proporcionada por controles fijos o móviles.
2. Determinar si el brillo del cielo puede ser un problema y hacer ajustes al diseño para controlar el brillo o proveer controles fijos o móviles.
3. Evaluar la mejor alternativa del sistema de iluminación natural actuando de acuerdo con cualquier iluminación eléctrica determinando iluminancias y energía usada como medidas de su eficiencia.

Una guía para el diseño de iluminación natural está disponible.

EVALUACION DE LOS DISEÑOS EN LA ETAPA CONCEPTUAL

El brillo es un problema serio que debe ser identificado y corregido rápidamente en el proceso de diseño, debido a que el ventanaje (arquitectónico) debe ser frecuentemente modificado para corregir los problemas creados por la penetración de la luz solar.

Por un mínimo de investigación en la etapa conceptual, la iluminación natural debe ser evaluada con altitudes solares correspondientes a los solsticios, alrededor del 21 de Diciembre y el 21 de Junio; y los equinoccios, alrededor del 21 de Marzo y del 22 de Septiembre. Un rango de las condiciones del cielo deben ser analizadas, incluyendo como mínimo, los extremos para una orientación particular (tal como el medio día y la horas iniciales y finales del día, cuando la iluminación natural ocurre para una fachada orientada con el frente hacia el sur). Ver capítulo 2.

Es importante que los diseños sean checados para condiciones críticas cuando la luz solar pueda entrar a los espacios. Por ejemplo, en las latitudes del norte la luz solar directa puede chocar con las fachadas orientadas hacia el norte en las tardes de verano. En el invierno, el sol puede estar por debajo del cielo, resultando una penetración profunda de sombras y espacios laterales. En las latitudes del sur, el sol de verano puede entrar más fácilmente a los espacios a través de los tragaluces.

Métodos manuales. La penetración del sol puede ser evaluada con el trazado de ángulos laterales en las secciones de las construcciones (ver capítulo 2).

Métodos computarizados. Un buen número de programas de modelos tridimensionales de propósitos generales para diseño arquitectónico son ahora más aprovechados por los diseñadores para el desarrollo de modelos complejos y para determinar la pauta de la penetración de la luz solar a través de la aberturas. Estos no calculan las iluminancias, aunque esto no es requerido en esta fase del diseño.

Modelos a escala. Los modelos a escala pueden ser usados junto con la luz solar directa o lámparas para simular las condiciones de interés. Esto no proporciona estimaciones certeras de iluminancias, pero permite la evaluación de un ejemplo de la penetración de la luz solar.

EVALUACIÓN DE LOS DISEÑOS DURANTE SU DESARROLLO

Además de estimar las iluminancias, es frecuentemente deseable la evaluación visual de los sistemas de iluminación natural. Los sistemas de evaluación visual apoyados en programas para computadora son la alternativa más frecuentemente usada para evaluar el comportamiento visual promedio además de calcular la iluminancia.

Las ayudas que pueden ser usadas en análisis más detallados de sistemas de iluminación natural son:

- Métodos manuales de cálculo (ver Cálculos de Iluminancias Interiores más adelante).
- Simulación de programas en computadoras (ver Cálculos de Iluminancias Interiores más adelante)
- Métodos gráficos.

- Modelos a escala evaluados bajo condiciones de cielo reales o artificiales, los cuales pueden ser usados para determinar la penetración del sol y la iluminancia. Los modelos son también útiles en la evaluación de sistemas de iluminación (ver Cálculo de Iluminancias Interiores más adelante).

EVALUACIÓN DE LOS EFECTOS DE LA ILUMINACIÓN NATURAL EN LA UTILIZACIÓN DE ENERGÍA

La iluminación natural es algunas veces usada como una forma de ahorrar energía, debido a que la iluminación eléctrica es típicamente la mayormente usada en construcciones comerciales. La Sociedad de Ingenieros de Iluminación de Norteamérica (IESNA) y la Sociedad Americana de Ingenieros en Calefacción y Refrigeración y Aire Acondicionado (ASHRAE) han producido una guía para el diseño de eficiencia energética. Esta proporciona procedimientos para estimar la contribución de la iluminación natural al ahorro de energía.

CONTROL FOTOELÉCTRICO DE SISTEMAS DE ILUMINACIÓN ELÉCTRICA

La iluminación natural puede proporcionar ahorro de energía en primer lugar através de las reducciones en la operación de iluminación eléctrica. Con este propósito, el control fotoeléctrico es una alternativa al switcheo manual de lámparas. La subdivisión de la construcción en zonas de control suficientemente pequeñas es una importante consideración. Las zonas grandes pueden no corresponder adecuadamente a diferentes condiciones de iluminación. Por ejemplo, algunas oficinas pueden aceptar poca luz cuando parte de una zona sea cubierta por una construcción adyacente.

Es importante que los encargados de la construcción y las personas que la habitan sean educados en relación con la función de los controles de iluminación natural, si es que son usados. Los controles automáticos pueden ser desactivados por personas que no entiendan sus funciones y propósitos.

MANTENIMIENTO

Si los resultados planeados de los sistemas de iluminación natural son realizados, el mantenimiento es requerido. Esto implica una limpieza periódica. Los factores de pérdidas de luz debidos a la depreciación (suciedad) son mostrados en la figura 4.1.

Fig. 4.1. Factores de Pérdida de Luz Típicos para Diseño de Iluminación Natural

Estado	Factor de Pérdida de luz según la posición del vidrio		
	Vertical	Inclinado	Horizontal
Areas Limpias	0.9	0.8	0.7
Areas Industriales	0.8	0.7	0.6
Areas muy sucias	0.7	0.6	0.5

4.6 SISTEMAS DE ILUMINACIÓN NATURAL

Varios tipos de ventanas son usadas para proveer un campo visual y penetración profunda de luz natural controlando también el brillo.

EL VENTANAJE Y LOS ESPACIOS INTERIORES

Algunos accesos comunes incluyen:

Iluminación unilateral. Este diseño (ver figura 4.2a, página 47) se presta a ventanaje continuo con cortinas. Para evitar rangos grandes de iluminancias con luz natural (tan grandes como 25:1), la distancia de la ventana a la pared interior deberá estar normalmente limitada por el doble de la parte alta de la ventana con vidrios limpios. Espacios más profundos pueden ser creados si iluminación adicional opuesta a la ventana es usada para balancear la iluminación. Por esta razón, la parte alta de las ventanas son frecuentemente colocadas a ras del techo; aunque el resultado incrementa el campo visual también incrementa el brillo.

Ventanas con marquesinas. Las marquesinas (ver figura 4.2a y b, página 47) pueden ser usadas para reducir la penetración de la luz solar en latitudes donde el sol está en el cenit mientras los espacios interiores son ocupados. Esto reduce el campo visual de la parte más alta del cielo y proporciona un rango drásticamente menor de iluminancias a través del espacio. De cualquier modo, la marquesina también reduce la penetración de la luz natural, aunque esto puede estar fuera algunos grados de la redirección de la luz reflejada por el piso al espacio interior.

Ventanas sencillas con persianas. Las persianas venecianas pueden ser efectivas en el control de la entrada de luz solar, reduciendo el brillo del cielo y redirigiendo la luz al techo. Ello puede proporcionar un efecto de sombra equivalente al de una marquesina. De cualquier modo, los usuarios ajustan las persianas rara vez.

Las persianas pueden reducir substancialmente la cantidad de luz natural admitida y reducir significativamente la eficiencia del ahorro de energía regulando los controles de iluminación eléctrica.

Ventanas cubiertas con persianas altas y bajas. Estas permiten diferentes ajustes para las partes altas y bajas de los vidrios. Por ejemplo la luz natural puede, no obstante, ser admitida profundamente en el espacio interior cuando las persianas bajas sean cerradas para excluir la luz solar de un área de trabajo.

Ventanas divididas con vidrios teñidos colocados en su parte alta. Esto reduce el brillo de la parte más alta del cielo mientras que proporciona una mínima distorsión del campo visual.

Ventanas y luminarios. Algunos luminarios son utilizados para balancear las iluminancias interiores sobre todo si se utilizan cerca del campo visual de las ventanas de sistemas de iluminación lateral. El suprimir la parte más alta del cielo permite colocar las ventanas en las partes más altas, proporcionando una iluminación natural más profunda y uniforme mientras se elimina el brillo que normalmente acompaña el uso de ventanas altas.

Bilateral. La iluminación natural bilateral. (ver figura 4.2b, página 47) balancea la admisión de luz. Estos sistemas permiten duplicar el ancho del espacio interior que el que se determina con iluminación natural unilateral. El segundo grupo de ventanas frecuentemente ocupa solo la parte mas alta de la pared. La reflexión de techo del segundo grupo de ventanas actúan como un piso, contribuyendo a la luz que entra al cuarto. Al menos una de las ventanas es orientada al sol necesitando controlar el brillo.

Los techos inclinados, algunas veces usados en estos diseños, tienen muy pocos efectos en la cantidad o calidad de iluminación excepto cuando se ha colocado la ventana en la parte más alta.

Control del techo. Este sistema de iluminación natural es más frecuentemente utilizado en construcciones industriales en donde una alta sección central es repartida en dos áreas (ver figura 4.2c, página 47). Proporcionando alta reflectancia en las superficies bajo control, el control del techo incrementa la iluminancia interior.

Con pequeñas ventanas. Ventanas adicionales con la cara hacia el techo, en la misma dirección que la ventana principal ayuda a superar las limitaciones de penetración de luz natural de la sección unilateral (ver figura 4.2d, página 47).

Secciones de construcción escalonada. La construcción de secciones escalonadas puede permitir la penetración profunda de luz natural con gran flexibilidad en la distribución de espacios. Son una alternativa a las combinaciones de iluminación con pequeñas ventanas y otros sistemas de iluminación lateral.

Diente de sierra. Este sistema de ventanas (ver fig. 4.2e, página 47) es usado principalmente en áreas grandes de construcciones industriales. Las ventanas orientadas hacia el cielo incrementan el potencial de contribución de iluminación natural, pero esto puede provocar un aumento en la suciedad de las ventanas. La ganancia de calor puede también ser incrementada.

Tragaluz. Los tragaluces asumen muchas formas, incluyendo domos y paneles con control de luz solar y brillo, los paneles de fibra de vidrio reforzado y louvers para el control del calor y el brillo. El detalle es que los tragaluces requieren atención especial para prevenir la penetración de humedad y gotas ocasionadas por condensación. Los tragaluces abiertos pueden proporcionar también ventilación (ver figura 4.2f).

Atrios. Grandes áreas de fuentes de iluminación natural tienen diversas formas tales como el tipo colina (ver figura 4.2g), cobertizo, pirámides y domos. Debido a sus grandes áreas, rangos bajos de transmisión de luz son usados (10 a 25%). Paneles translúcidos intercalados con fibra de vidrio reforzada con capas de polímeros son especialmente adecuados para la iluminación natural libre de sombras con control de luz y calor.

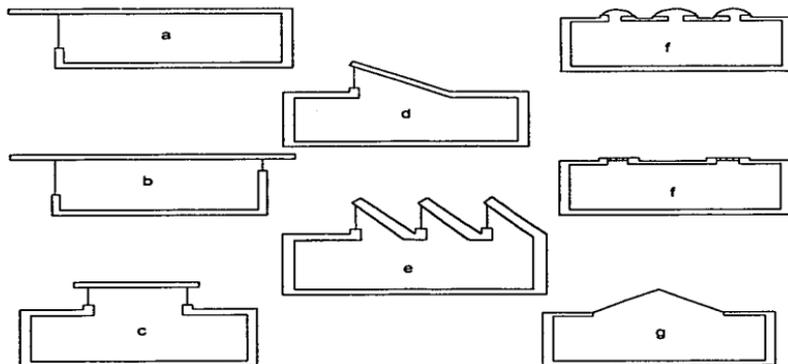


Figure 4.2 a. Iluminación tipo unilateral. b. Iluminación tipo bilateral. c. Iluminación tipo techo. d. Iluminación tipo iglesia. e. Iluminación tipo diente de sierra. f. Tragaluces. g. Atrio

4.7 MATERIALES Y ELEMENTOS DE CONTROL.

Los materiales y sistemas que proporcionan sombras usados en la iluminación natural se caracterizan por las siguientes propiedades: transmisión, absorción, reflexión, difusión, refracción, costo, propiedades térmicas y apariencia.

Datos de la transmitancia de diversos materiales son proporcionados en la figura 4.3. Se debe notar que la transmitancia de los materiales está en función del ángulo incidente de la luz (ver la subsección del Método de Lumen para un ejemplo de cálculos de iluminancias con computadora).

Figura 4.3 Transmitancia del Vidrio y Materiales Plásticos

Material	Transmitancia
	Aproximada (porcentaje)
Vidrio pulido	80-90
Placa de Vidrio	85-91
Placa de Vidrio que Absorbe el Calor	70-80
Figura de Vidrio	70-90
Vidrio Corrugado	80-85
Bloque de Vidrio	60-80
Hoja de Plástico Limpia	80-92
Hoja de Plástico Teñida	42-90
Plástico sin Color	80-90
Plástico Blanco Translucido	10-80
Fibra de Vidrio Reforzada con Plástico	5-80
Vidrio Reflectivo	5-60

Materiales transparentes (alta transmitancia). Estos transmiten la luz sin cambios apreciables en la dirección o calor, preservando la capacidad visual. Algunos tipos comunes son: la lámina, plata pulida y vidrio moldeado así como algunos plásticos rígidos y paneles formados. Las ventanas pueden incluir vidrios de diversa índole para reducir la transferencia de calor.

Materiales transparentes (baja transmitancia). La baja transmitancia de vidrios y plásticos permiten la reducción de brillantez, que se incrementa al decrecer su transmitancia. Durante las horas de luz natural, la capacidad para ver hacia un espacio interior es reducida. En la noche, la visión dentro del espacio interior es clara mientras la visión hacia afuera es reducida. Bajas transmitancias, menores a 0.5, pueden provocar una apariencia exterior sombría.

Cristales de ventanas controlados eléctricamente. Los cristales eléctricamente controlados tienen propiedades de transmitancia que están en función de un voltaje aplicado. Generalmente las marcas disponibles requieren la aplicación de un voltaje bajo para ponerse opacas y aclararse cuando el voltaje es desactivado.

Materiales para la difusión. La cantidad de difusión en varios materiales varía en un amplio rango, dependiendo del material y de la superficie que se trate. Generalmente, la transmitancia y luminancia decrecen cuando la difusión se incrementa. La luminancia de materiales de alta difusión es casi constante desde todos los ángulos visuales. Los materiales para la difusión incluyen los translúcidos, superficies teñidas o modeladas, vidrios, plásticos, paneles translúcidos y superficies cubiertas con fibra de vidrio reforzada con polímeros y bloques de vidrio para la difusión.

Materiales de alta reflectancia y baja transmitancia. Los vidrios y plásticos reflectivos proporcionan control de luminancia por tener alta reflectancia exterior. Estos materiales actúan como una forma de espejos, dependiendo del radio interno para iluminación exterior. Su baja transmitancia da a las áreas externas una apariencia sombría en días soleados.

Materiales de transmitancia direccional. Estos incluyen a los vidrios y plásticos con superficie prismática, que son usados para obtener el control direccional de luz e iluminación deseada.

Materiales para la transmitancia selectiva brillante. Estos incluyen varios materiales de absorción del calor y reflexión que son diseñados para dejar pasar más radiaciones visibles pero absorbe o refleja una porción de la radiación infrarroja. El calor absorbido es retransmitido interna y externamente en aproximadamente iguales proporciones.

Sombras y cortinas. Estas incluyen cortinas opacas y para la difusión de sombras para excluir y/o moderar la luz natural.

Persianas de tablillas. Las persianas de tablillas pueden ser fijas o ajustables, horizontales o verticales. Son capaces de excluir la luz solar directa y reducir la radiación de calor mientras reflejan una gran cantidad de luz solar, luz del cielo y luz reflejada por el piso al interior. En el caso de cortinas de tablillas fijas, el espaciamiento y la altura de las tablillas deben ser diseñadas para excluir la luz solar directa en ángulos visuales normales. Las proyecciones para el control del sol son frecuentemente hechas con cortinas de tablillas de modo que la luz restante pueda llegar a las ventanas.

Medio ambiente. Los árboles pueden ser sombras efectivas en el diseño de construcciones de baja altura si el lugar tiene una apropiada posición con respecto a las ventanas. Los árboles altos proporcionan protección contra el brillo debido a el sol directo durante los meses calurosos, pero transmiten la luz solar durante el invierno.

Elementos de reflexión exterior. El pavimento reflectivo y superficies similares incrementan la cantidad de luz reflejada por el piso hacia el espacio interior. Los materiales reflectivos o acabados interiores que estén debajo de las ventanas tienen los mismos efectos.

Elementos reflectivos interiores. En general, los elementos interiores deben tener una alta reflectancia. Esto reduce el contraste y brillo y es especialmente importante para elementos cercanos a las ventanas. En particular la reflectancia del cielo tiene una gran influencia en la cantidad de luz natural (luz solar, luz del cielo y la luz reflejada por el piso).

Supervidrieras. Las vidrieras de alta eficiencia usan múltiples cavidades separadas por telillas y llenadas con gases especiales, así como baja emisividad para reducir la transferencia de calor.

CAPITULO 5

CALCULO DE ILUMINANCIAS INTERIORES

Los métodos de cálculo pueden ser útiles en la comparación de alternativas de sistemas de iluminación con luz natural o en la consideración de los límites de utilización de la luz natural para sistemas que presenten condiciones de bajo promedio de iluminación. Los cálculos de iluminancias implican la determinación de las condiciones del cielo, el sol y los componentes interreflejados de luz natural. El sol y el cielo ocasionan el flujo que penetra directamente en un punto. Los componentes interreflejados son el resultado de la luz del sol y el cielo que incide en una superficie y que después es reflejada al punto de interés. La determinación de las condiciones del cielo, el sol y los componentes interreflejados pueden ser usados para calcular las iluminancias en un punto ó iluminancias promedio sobre alguna superficie.

5.1 CÁLCULOS CON COMPUTADORA

Debido a la velocidad con la que los diversos escenarios pueden ser explorados y a la complejidad de las situaciones que pueden ser evaluadas, los métodos computarizados son cada vez más usados. La capacidad de visualización de los efectos combinados de luz natural y fuentes eléctricas también se ha incrementado.

Los cálculos de iluminancias en puntos son usualmente ejecutados con programas para computadoras porque la complejidad de los cálculos lo requiere.

En casi todos los programas de computadora usados para iluminación natural, los componentes del cielo y el sol en el punto de interés son determinados usando una suma finita de aproximaciones con las ecuaciones 3-25 y 3-26 (páginas 29 y 30). La sumatoria es ejecutada usando solo aquellas (pequeñas) secciones del cielo que iluminan los puntos directamente.

En aplicaciones de luz natural, la excitancia inicial de los espacios interiores es determinada por el flujo que entra por las ventanas y tragaluces. Es normal asumir que las superficies interiores son difusas.

El cálculo de las componentes directa e interreflejada puede ser muy complicado para sistemas elaborados de tragaluces y ventanas, si el espacio interior o si el espacio es geoméricamente complicado.

5.2 MÉTODO DE LUMEN

El método de lumen para el cálculo de iluminancias interiores es similar al método de cavidad zonal para iluminación eléctrica, y es tan simple que permite el cálculo manual. Este es un método sencillo para predecir la iluminación interior debida a la luz natural que entra por los tragaluces y/o ventanas. Se asume una habitación rectangular vacia con diseño de ventanaje sencillo. Las obstrucciones de la cavidad de cuarto reducen substancialmente la iluminación, especialmente en espacios laterales, pero pueden ser considerada usando otros métodos.

El método consta de cuatro pasos básicos:

1. Las iluminancias exteriores en las ventanas y tragaluces deben ser determinadas. Estas pueden ser calculadas como se explicó en el capítulo 3.
2. La transmitancia neta de las ventanas reduce la cantidad de luz que incide en el espacio interior. Esto incluye la transmitancia de los vidrios, el factor pérdida de luz y otros factores que pueden ser requeridos, dependiendo de la sofisticación de los controles de ventanas usados.

3. Los coeficientes de utilización son factores de multiplicación que relacionan la luz natural que incide en el espacio interior con la iluminancia promedio de la luz natural en el plano de trabajo (método de lumen para iluminación vertical) o para la iluminancia con luz natural en cinco puntos predeterminados en la habitación (método de lumen para iluminación lateral).

4. La iluminancia interior es calculada multiplicando los factores predeterminados en los primeros tres pasos.

La ecuación básica para la iluminancia de un punto determinado usando el método de lumen es:

$$E_i = E_x(NT)(CU) \quad (5-1)$$

Donde:

E_i = iluminancia interior en lx

E_x = iluminancia exterior en lx

NT= transmitancia neta

CU= coeficiente de utilización

El procedimiento para determinar la transmitancia neta y el coeficiente de utilización difiere para iluminación vertical e iluminación lateral. Si ambos casos son empleados, la iluminación puede ser calculada para cada uno y las iluminancias se suman para dar el efecto combinado.

En los cálculos de iluminancias para iluminación vertical e iluminación lateral, la ecuación básica del método de lumen generalmente presenta una forma más complicada, pero es una derivación sencilla de los elementos básicos.

5.3 MÉTODO DE LUMEN PARA ILUMINACIÓN VERTICAL

Para sistemas de iluminación natural que empleen aberturas horizontales tales como los tragaluces a nivel de techo, el método de lumen para iluminación vertical es usado. Este asume que los tragaluces son colocados uniformemente a través del techo.

La iluminación horizontal promedio en el plano de trabajo es:

$$E_i = E_{xht}CU \frac{A_s}{A_w} \quad (5-2)$$

donde:

E_i = iluminación incidente promedio de los tragaluces en el plano de trabajo en lx

E_{xh} = iluminación exterior horizontal del tragaluz en lx

A_s = área horizontal proyectada de todos los tragaluces en m²

A_w = área del plano de trabajo en m²

τ = transmitancia neta del tragaluz y fuente de luz incluyendo pérdidas debidas a dispositivos de control solar y factores de mantenimiento.

CU = coeficiente de utilización

La ecuación 5-2 puede ser usada para determinar la iluminancia promedio en el plano de trabajo si el área total del tragaluz y la iluminancia exterior horizontal son conocidas. Recíprocamente, el área de tragaluz requerida puede ser determinada si la iluminancia promedio requerida en el plano de trabajo y la iluminancia horizontal exterior son conocidas.

La iluminancia horizontal exterior es la suma de las iluminancias del cielo y el sol. Estas son determinadas usando los procedimientos dados en el capítulo 3.

La transmitancia neta es determinada de una transmitancia directa T_D y una transmitancia difusa T_d . La transmitancia directa es usada para el componente solar y está en función del ángulo de incidencia. La transmitancia difusa es simplemente valuada y es usada para determinar la componente del cielo, el cual es considerado como difuso.

Generalmente los fabricantes proporcionan datos de transmitancia para lámina plana, vidrios o plásticos en la forma de un simple valor de T_d y una curva que muestra la variación de T_D con el ángulo de incidencia.

La transmitancia neta es también afectada por la forma de un tragaluz, múltiples capas, la presencia de otro tragaluz, la presencia de louvers y los factores de pérdidas de luz.

Muchos tragaluces son utilizados como domos. Esto decrece el espesor del centro del domo, modificando su transmitancia según:

$$TDM = 1.25TFS(1.18 - 0.416TFS) \quad (5-3)$$

donde:

T_{DM} = Transmitancia del domo

T_{FS} = Transmitancia de la hoja de lámina

Esto no cambia la transmitancia de la lámina transparente ($T_{FS} = 0.92$), pero incrementa la transmitancia de una lámina translúcida ($T_{FS} = 0.44$) hasta un 25% de acuerdo con lo que actualmente está en práctica.

Los domos también causan el ángulo de incidencia de la luz solar directa según su superficie. Los domos tienen grandes áreas que concentran la luz, igual que una lámina plana. Ambos factores pueden ser considerados si se nota que el efecto de los domos es causar T_D convenientemente constante con 10% para todos los ángulos de incidencia menores a 70° (ángulos de sol mayores a 20°). Así, para muchas aplicaciones del domo, un número de T_D igual a este valor a un ángulo de incidencia de 0° puede ser usado.

Para reducir la ganancia o pérdidas de calor, se debe considerar a los tragaluces de domo doble. La transmitancia que aporta cada unidad puede ser obtenida de la siguiente ecuación:

$$T = \frac{T_1 T_2}{1 - \rho_1 \rho_2} \quad (5-4)$$

donde:

T_1, T_2 = transmitancia difusa de cada domo

ρ_1 = reflectancia de la parte baja del domo superior

ρ_2 = reflectancia del lado superior del domo más bajo

La ecuación 5-4 toma en cuenta las interreflectancias entre los dos domos.

Las pérdidas reflectivas e interreflectivas de luz entre el domo y el plano del techo del espacio interior reduce la transmitancia neta. Esta reducción es expresada como una eficiencia de la fuente N_w , la cual puede ser obtenida de la figura 5-1 si la reflectancia de pared y la cavidad de radio de la fuente (WCR) son conocidas. La cavidad de radio de la fuente está dada por:

$$WCR = \frac{5h(w+1)}{wl} \quad (5-5)$$

donde:

h = altura de la fuente

w = anchura de la fuente

l = longitud de la fuente

En la ecuación 5-5, h , w y l deben ser expresadas en las mismas unidades.

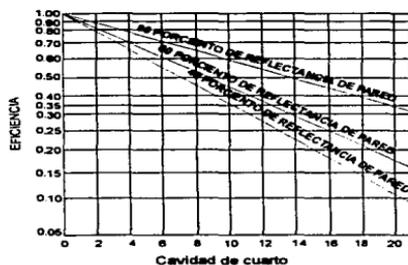


Figura 5.1 Factores de eficiencia para varios valores de cavidad de cuarto, basados en valores de interreflectancia de cuarto, donde

$$WCR = \frac{5 \times \text{altura de cavidad} \times (\text{ancho de cavidad} + \text{largo de cavidad})}{\text{ancho de cavidad} \times \text{altura de cavidad}}$$

La transmitancia neta debe también tomar en cuenta el grueso del tragaluz (R_a). Si cualquier tipo difusores, lentes, cortinas de tablillas u otros controles están presentes, su transmitancia (T_c) debe ser incluida. Finalmente, el factor pérdida de luz (LLF) debe ser incluido para tomar en cuenta la depreciación por suciedad del tragaluz y las superficies de la fuente. Algunos valores típicos son dados en la figura 4-1. La transmitancia neta de los tragaluces está dada por:

$$\tau_d = T_d N_w R_a T_c L L F \quad (5-6a)$$

$$\tau_D = T_D N_w R_a T_c L L F \quad (5-6b)$$

donde T_d es igual a la transmitancia difusa y T_D es igual a la transmitancia directa del domo.

Los coeficientes de utilización (CU) están dados en la figura 5.2. Están basados en un espaciamiento para una altura de montaje de 1.5:1, una distribución lambertiana de los tragaluzes y una reflectancia de piso de 0.2. Las reflectancias de pared y techo, así como los radios de cavidad de cuarto (RCR) son requeridos. Los radios de cavidad de cuarto pueden ser obtenidos de:

$$RCR = \frac{5h_c(1+w)}{lw} \quad (5-7)$$

donde:

h_c = altura del plano de trabajo a la parte baja del tragaluz

l = longitud del espacio interior

w = anchura del espacio interior

Los tres parámetros deben tener las mismas unidades.

El método de lumen para iluminación vertical (ec. 5-2) puede ahora ser aplicado. Para cielos nublados:

$$E_i = E_{xh\text{cielo}} \tau_d C U N \frac{A}{A_w} \quad (5-8)$$

Para cielos despejados o seminublados la ecuación es:

$$E_i = (E_{x\text{hciel}}\tau_d + E_{x\text{hsol}}\tau_D)CUN \frac{A}{A_w} \quad (5-9)$$

donde:

$E_{x\text{hciel}}$ = iluminación horizontal exterior debida únicamente al cielo en lx

$E_{x\text{hsol}}$ = iluminación horizontal exterior debida únicamente al sol en lx

T_d = transmitancia difusa neta

T_D = transmitancia directa neta

CU = coeficiente de utilización

N = número de tragaluz

A = área de cada tragaluz en m^2

A_w = área del plano de trabajo en m^2

Reflexancia de techo (porcentaje)	RCR	Reflexancia de Pared (porcentaje)		
		50	30	10
80	0	1.19	1.19	1.19
	1	1.06	1.00	0.97
	2	0.93	0.86	0.81
	3	0.83	0.76	0.70
	4	0.75	0.67	0.60
	5	0.67	0.59	0.53
	6	0.62	0.53	0.47
	7	0.57	0.49	0.43
	8	0.54	0.47	0.41
	9	0.53	0.46	0.41
	10	0.52	0.45	0.40
50	0	1.11	1.11	1.11
	1	0.98	0.96	0.92
	2	0.87	0.83	0.78
	3	0.79	0.73	0.68
	4	0.71	0.64	0.59
	5	0.64	0.57	0.52
	6	0.59	0.52	0.47
	7	0.55	0.48	0.43
	8	0.52	0.46	0.41
	9	0.51	0.45	0.40
	10	0.50	0.44	0.40
20	0	1.04	1.04	1.04
	1	0.92	0.90	0.88
	2	0.83	0.79	0.76
	3	0.75	0.70	0.66
	4	0.68	0.62	0.58
	5	0.61	0.56	0.51
	6	0.57	0.51	0.46
	7	0.53	0.47	0.43
	8	0.51	0.45	0.41
	9	0.50	0.44	0.40
	10	0.49	0.44	0.40

Figura 5.2 Coeficientes de utilización para iluminación lateral (basados en 20% de reflexancia)

Note que debido a que la transmitancia neta depende en parte de la eficiencia de la fuente y de el área total del tragaluz, estos factores deben ser recalculados si el tamaño del tragaluz es cambiado.

5.4 MÉTODO DE LUMEN PARA ILUMINACIÓN LATERAL

La predicción de iluminación interior con luz natural ha sido simplificada usando las condiciones estandarizadas que se muestran en la figura 5.3. La cavidad de piso, comprendida entre la parte baja de la ventana y el piso, tiene una reflectancia de 30%. La cavidad de techo, comprendida entre la parte alta de la ventana y el techo, tiene una reflectancia del 70%.

La cavidad de cuarto comprende una altura (H) desde la parte superior de la cavidad de piso hasta la parte baja de la cavidad de techo, un ancho (W) a lo largo de la ventana y pared, y una profundidad (D) desde la ventana hasta la pared interior; tiene una reflectancia de 50%. La iluminación interior con luz natural es calculada en cinco puntos de referencia localizados en una línea perpendicular a la pared que contiene la ventana a través del centro de la habitación a la misma altura que la parte baja de la ventana. Los cinco puntos se localizan a lo largo de una línea de $0.1D$, $0.3D$, $0.5D$, $0.7D$ y $0.9D$.

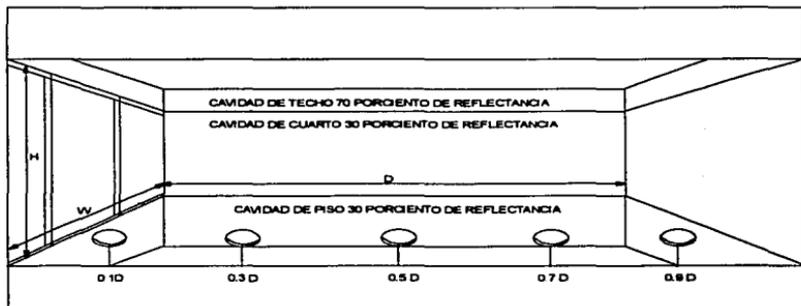


Figura 5.3 Condiciones estándar en una habitación para calcular la iluminación lateral

El procedimiento aquí descrito prevé las sombras, cortinas, pantallas solares u otros controles simples de luz natural. Este no prevé las persianas para ventanas horizontales o verticales, ni elementos exteriores tales como banquetas, calles, otras construcciones ni marquesinas. Un procedimiento más elaborado está disponible para tomar en cuenta a tales elementos.

La fórmula básica usada para calcular la iluminancia interior horizontal debida a la luz natural en uno de los cinco puntos de referencia es:

$$E_i = E_{xv} \tau CU \quad (5-10)$$

donde:

E_i = iluminancia horizontal interior en un punto de referencia de iluminación natural en lx

E_{xv} = iluminación exterior vertical de la ventana en lx

T = Transmitancia neta de la ventana

CU = coeficiente de utilización

El principio de superposición es usado para obtener la iluminación interior final en un punto de referencia debido a múltiples grupos de aberturas que proporcionen iluminación natural. Por ejemplo, las contribuciones a la iluminación del cielo y el piso son calculadas por separado y finalmente sumadas para determinar el efecto combinado. El método de lumen no prevé la luz solar directa que entra en la cavidad de cuarto.

La iluminancia vertical exterior E_{xv} , es la iluminancia en la abertura vertical excluyendo la luz solar directa. Para una situación exterior simple, esto es, que no es obstruida, esta iluminancia se debe al cielo y al piso. Esa parte debida al cielo puede ser determinada usando los procedimientos del capítulo 3. El piso es considerado como fuente y puede presentar una exitancia difusa la cual está dada por:

$$M_g = \rho_g(E_{xh\text{cielo}} + E_{xh\text{sol}}) \quad (5-11)$$

donde:

M_g = exitancia de la tierra en lm/m^2

ρ_g = reflectancia del piso en lm/m^2

$E_{xh\text{cielo}}$ = iluminancia horizontal del cielo en lx

$E_{xh\text{sol}}$ = iluminancia horizontal del sol en lx

La transmitancia neta es el producto de la transmitancia (T) del vidrio, un factor de pérdida de luz (LLF) representando a la acumulación de suciedad, el grosor de la ventana (R_a), representando los elementos como cruces y barras de los vidrios y un factor T_c representando otros elementos tales que las sombras y las cortinas las cuales reducen la transmitancia de las ventanas. La transmitancia neta de la ventana está dada por:

$$\tau = TR_a T_c \text{LLF} \quad (5-12)$$

Los coeficientes de utilización (CU) para cada uno de los cinco puntos de referencia en la habitación están dados en las figuras 5.4 a 5.9. Si el ventanaje es transparente (visión preservada), entonces la iluminancia exterior vertical y horizontal es calculada para el centro de la ventana. Basados en un radio de iluminancia vertical a horizontal en la ventana de 0.75, 1.00, 1.25, 1.50 o 1.75, los coeficientes de utilización de las figuras 5.4 a 5.8 son usados. Para el componente piso el coeficiente de utilización está dado en la figura 5.9.

Si el ventanaje no preserva la imagen, como un vidrio sucio, sombras o cortinas, entonces la iluminancia vertical del cielo y el piso es sumada. Use la figura 5.5, basada en una distribución uniforme de cielo, para el coeficiente de utilización de el componente cielo y la figura 5.9 para el coeficiente de utilización del componente piso.

Figura 5.4 Coeficiente de Utilización para Ventanas Sin Cortinas.
 Componente de Cielo $E_{\text{cielo}} / E_{\text{aboda}} = 0.75$

Cavidad Cuadro/ Ahura Ventana	Porcentaje D	Ancho de Ventana/ Ahura de Ventana							Infinito
		.5	1	2	3	4	6	8	
1	10	.824	.864	.870	.873	.875	.879	.880	.883
	30	.547	.711	.777	.789	.793	.798	.799	.801
	50	.355	.526	.635	.659	.667	.669	.670	.672
	70	.243	.386	.505	.538	.548	.544	.545	.547
	90	.185	.304	.418	.451	.464	.444	.446	.447
2	10	.667	.781	.809	.812	.813	.815	.816	.824
	30	.269	.416	.519	.544	.551	.556	.557	.563
	50	.122	.204	.287	.319	.331	.339	.341	.345
	70	.068	.116	.173	.201	.214	.223	.226	.229
	90	.050	.084	.127	.151	.164	.167	.171	.172
3	10	.522	.681	.739	.746	.747	.749	.747	.766
	30	.139	.232	.320	.350	.360	.366	.364	.373
	50	.053	.092	.139	.163	.174	.183	.182	.187
	70	.031	.053	.081	.097	.106	.116	.116	.119
	90	.025	.041	.061	.074	.082	.089	.090	.092
4	10	.405	.576	.658	.670	.673	.675	.674	.707
	30	.075	.134	.197	.224	.235	.243	.243	.255
	50	.028	.050	.078	.094	.104	.112	.114	.119
	70	.018	.031	.048	.059	.065	.073	.074	.078
	90	.016	.026	.040	.048	.053	.059	.061	.064
6	10	.242	.392	.494	.516	.521	.524	.523	.588
	30	.027	.054	.086	.102	.111	.119	.120	.135
	50	.011	.023	.036	.044	.049	.055	.056	.063
	70	.009	.018	.027	.032	.035	.040	.041	.046
	90	.008	.016	.023	.028	.031	.034	.035	.040
8	10	.147	.257	.352	.380	.387	.391	.392	.482
	30	.012	.026	.043	.054	.060	.067	.070	.086
	50	.006	.013	.021	.026	.029	.033	.035	.043
	70	.005	.011	.017	.021	.023	.026	.027	.034
	90	.004	.010	.015	.019	.021	.023	.025	.030
10	10	.092	.168	.248	.275	.284	.290	.291	.395
	30	.006	.014	.026	.032	.036	.041	.044	.059
	50	.003	.008	.014	.017	.019	.022	.024	.032
	70	.003	.007	.012	.014	.016	.018	.019	.026
	90	.003	.006	.011	.013	.015	.016	.017	.024

Figura 5.5 Coeficiente de Utilización para Ventanas Sin Cortinas.
Componente de Cielo $E_{\text{ext}} = E_{\text{int}} = 1.00$

Cavidad Cuartos/ Altura Ventanas	Porcentaje	Ancho de Ventana/ Altura de Ventana							
		D	.5	1	2	3	4	6	8
1	10	.671	.704	.711	.715	.717	.726	.726	.728
	30	.458	.595	.654	.668	.672	.682	.683	.685
	50	.313	.462	.563	.589	.598	.607	.608	.610
	70	.227	.362	.478	.515	.527	.530	.532	.534
	90	.186	.306	.424	.465	.481	.468	.471	.472
2	10	.345	.636	.638	.660	.661	.665	.667	.672
	30	.239	.367	.539	.484	.491	.499	.501	.506
	50	.121	.203	.286	.320	.335	.348	.351	.355
	70	.074	.128	.192	.226	.243	.259	.264	.267
	90	.058	.101	.156	.188	.207	.215	.221	.223
3	10	.531	.561	.607	.613	.614	.616	.615	.631
	30	.133	.223	.306	.337	.348	.357	.357	.366
	50	.058	.103	.155	.183	.197	.211	.213	.218
	70	.037	.064	.098	.119	.132	.147	.150	.154
	90	.030	.051	.079	.098	.110	.122	.126	.129
4	10	.339	.482	.549	.560	.563	.566	.565	.593
	30	.078	.139	.204	.234	.247	.258	.260	.272
	50	.033	.060	.094	.114	.126	.139	.143	.150
	70	.022	.039	.061	.074	.083	.095	.099	.104
	90	.019	.032	.050	.061	.070	.080	.084	.089
6	10	.211	.343	.433	.453	.458	.461	.461	.518
	30	.033	.065	.103	.123	.135	.145	.148	.167
	50	.015	.029	.047	.057	.064	.073	.077	.086
	70	.011	.021	.033	.040	.045	.051	.054	.060
	90	.010	.019	.028	.034	.038	.044	.046	.052
8	10	.135	.238	.326	.353	.362	.366	.367	.432
	30	.016	.034	.058	.072	.080	.090	.094	.116
	50	.008	.017	.027	.034	.039	.045	.048	.059
	70	.006	.013	.021	.026	.028	.032	.035	.043
	90	.005	.012	.029	.023	.025	.029	.031	.038
10	10	.090	.165	.244	.272	.283	.290	.291	.395
	30	.009	.020	.036	.045	.052	.060	.064	.087
	50	.005	.010	.019	.023	.026	.030	.033	.044
	70	.004	.009	.015	.018	.020	.023	.025	.033
	90	.003	.008	.014	.016	.018	.020	.022	.030

Figura 5.6 Coeficiente de Utilización para Ventanas Sin Cortinas.

Componente de Cielo $E_{\text{Cielo}} / E_{\text{Abierta}} = 1.25$

Cavidad Cuarta/ Altura Ventana	Porcentaje	Ancho de Ventana/ Altura de Ventana							
		D	.5	1	2	3	4	6	8
1	10	.378	.607	.614	.619	.621	.633	.634	.635
	30	.405	.525	.580	.594	.599	.612	.614	.615
	50	.287	.423	.519	.547	.556	.569	.571	.573
	70	.218	.347	.461	.501	.515	.522	.525	.526
	90	.186	.307	.428	.473	.491	.483	.486	.487
2	10	.472	.549	.566	.569	.570	.574	.575	.581
	30	.221	.337	.422	.447	.456	.465	.467	.472
	50	.120	.202	.385	.321	.337	.353	.357	.361
	70	.074	.128	.192	.226	.243	.259	.264	.267
	90	.078	.136	.204	.242	.261	.281	.287	.290
3	10	.064	.112	.174	.211	.233	.244	.251	.253
	30	.377	.488	.527	.533	.534	.536	.536	.549
	50	.120	.202	.285	.321	.337	.353	.357	.361
	70	.040	.070	.109	.132	.147	.166	.171	.175
	90	.033	.057	.090	.112	.127	.142	.148	.152
4	10	.300	.424	.484	.494	.497	.499	.499	.524
	30	.080	.143	.209	.240	.255	.267	.269	.283
	50	.036	.066	.104	.126	.140	.156	.160	.168
	70	.024	.043	.068	.083	.094	.109	.115	.120
	90	.021	.036	.056	.070	.080	.092	.099	.103
6	10	.193	.314	.395	.415	.420	.423	.423	.476
	30	.036	.071	.113	.136	.149	.161	.165	.186
	50	.017	.033	.053	.065	.074	.084	.089	.100
	70	.012	.024	.037	.045	.050	.058	.061	.069
	90	.011	.021	.031	.038	.043	.049	.053	.060
8	10	.128	.226	.310	.337	.346	.351	.352	.433
	30	.019	.039	.066	.082	.092	.104	.109	.134
	50	.009	.019	.031	.040	.045	.052	.056	.069
	70	.007	.015	.023	.029	.032	.037	.040	.049
	90	.006	.013	.021	.025	.028	.032	.035	.043
10	10	.088	.164	.241	.270	.282	.290	.291	.396
	30	.011	.024	.043	.054	.062	.071	.076	.103
	50	.005	.012	.022	.026	.030	.035	.038	.052
	70	.004	.010	.017	.020	.023	.026	.028	.038
	90	.004	.009	.016	.018	.020	.023	.025	.034

Figura 5.7 Coeficiente de Utilización para Ventanas Sin Cortinas.
Componente de Cielo $E_{\text{cielo}} / E_{\text{boda}} = 1,50$

Cavidad Cuarto/ Altura Ventana	Profundidad	Ancho de Ventana/Altura de Ventana							
		D	.5	1	2	3	4	6	8
1	10	.503	.528	.536	.541	.544	.557	.558	.559
	30	.359	.464	.514	.528	.534	.549	.550	.552
	50	.261	.384	.471	.499	.508	.524	.526	.527
	70	.204	.325	.432	.470	.485	.497	.499	.500
	90	.179	.295	.412	.456	.475	.474	.477	.478
2	10	.412	.477	.490	.492	.493	.498	.499	.505
	30	.201	.304	.379	.402	.410	.422	.424	.429
	50	.115	.192	.269	.304	.320	.339	.343	.347
	70	.078	.136	.204	.241	.261	.286	.292	.295
	90	.066	.117	.183	.221	.246	.262	.271	.273
3	10	.331	.426	.458	.461	.462	.465	.465	.477
	30	.121	.202	.275	.304	.316	.327	.329	.337
	50	.062	.109	.164	.193	.209	.228	.232	.238
	70	.041	.073	.114	.138	.154	.176	.183	.188
	90	.035	.062	.099	.123	.141	.159	.169	.173
4	10	.265	.372	.422	.430	.433	.435	.435	.456
	30	.077	.137	.199	.229	.243	.256	.259	.272
	50	.037	.069	.107	.130	.144	.161	.167	.175
	70	.026	.046	.073	.089	.101	.119	.126	.132
	90	.022	.039	.063	.078	.090	.106	.114	.120
6	10	.173	.281	.351	.368	.373	.375	.375	.422
	30	.037	.073	.115	.137	.151	.164	.168	.189
	50	.018	.036	.058	.071	.080	.092	.098	.110
	70	.013	.026	.040	.049	.056	.064	.069	.078
	90	.012	.023	.035	.043	.048	.057	.062	.070
8	10	.117	.207	.282	.305	.314	.319	.320	.393
	30	.020	.042	.071	.087	.098	.111	.116	.143
	50	.010	.021	.035	.044	.050	.058	.063	.078
	70	.007	.016	.026	.032	.036	.041	.045	.055
	90	.006	.014	.023	.028	.031	.036	.040	.049
10	10	.082	.153	.224	.250	.262	.269	.271	.368
	30	.012	.026	.047	.059	.068	.078	.084	.114
	50	.006	.014	.024	.030	.034	.040	.044	.060
	70	.005	.011	.019	.022	.025	.029	.032	.043
	90	.004	.010	.017	.020	.023	.026	.028	.038

Figura 5.8 Coeficiente de Utilización para Ventanas Sin Cortinas.
 Componente de Cielo $E_{\text{avada}} / E_{\text{avada}} = 1.75$

Cavidad Cuarto/ Altura Ventana	Porcentaje	Ancho de Ventana/ Altura de Ventana							
		D	.5	1	2	3	4	6	8
1	10	.435	.457	.465	.471	.474	.486	.488	.489
	30	.317	.407	.452	.466	.471	.486	.488	.489
	50	.234	.343	.422	.447	.456	.472	.475	.476
	70	.187	.297	.395	.430	.445	.458	.461	.462
	90	.168	.276	.384	.426	.444	.447	.450	.451
2	10	.327	.412	.422	.424	.424	.430	.431	.436
	30	.180	.271	.335	.356	.363	.375	.378	.381
	50	.106	.177	.246	.278	.293	.313	.318	.321
	70	.074	.130	.194	.229	.249	.274	.282	.284
	90	.065	.116	.181	.219	.244	.264	.273	.276
3	10	.288	.369	.394	.397	.397	.400	.401	.411
	30	.110	.183	.247	.272	.282	.294	.296	.304
	50	.058	.104	.154	.181	.196	.215	.221	.226
	70	.040	.072	.112	.136	.152	.176	.184	.188
	90	.035	.063	.101	.126	.144	.165	.177	.182
4	10	.232	.324	.365	.371	.373	.375	.375	.394
	30	.071	.127	.183	.209	.222	.235	.238	.250
	50	.036	.067	.104	.125	.139	.157	.163	.171
	70	.025	.046	.072	.089	.101	.119	.127	.134
	90	.022	.041	.065	.082	.095	.114	.124	.130
6	10	.153	.247	.307	.320	.324	.326	.327	.367
	30	.035	.070	.109	.130	.143	.155	.160	.180
	50	.018	.036	.058	.071	.080	.091	.098	.110
	70	.013	.026	.041	.051	.058	.067	.073	.082
	90	.012	.023	.037	.046	.052	.062	.069	.078
8	10	.104	.184	.249	.269	.276	.281	.282	.346
	30	.020	.042	.070	.086	.096	.109	.115	.141
	50	.010	.022	.036	.046	.052	.060	.066	.081
	70	.008	.017	.027	.033	.038	.044	.048	.059
	90	.007	.015	.024	.030	.034	.040	.044	.054
10	10	.074	.138	.201	.223	.233	.240	.242	.328
	30	.012	.027	.048	.059	.067	.078	.084	.114
	50	.006	.014	.026	.032	.036	.043	.047	.064
	70	.005	.011	.020	.024	.027	.031	.034	.046
	90	.004	.010	.018	.022	.024	.028	.031	.042

Figura 5.9 Coeficiente de Utilización para Ventanas Sin Cortinas.
(Componente de Piso)

Cuidad Cuanto/ Altura Ventana	Porcentaje	Ancho de Ventana/ Altura de Ventana								
		D	.5	1	2	3	4	6	8	Infinito
1	10	.105	.137	.177	.197	.207	.208	.210	.211	
	30	.116	.157	.203	.225	.235	.241	.243	.244	
	50	.110	.165	.217	.241	.252	.267	.269	.270	
	70	.101	.162	.217	.243	.253	.263	.285	.286	
	90	.091	.146	.199	.230	.239	.290	.292	.293	
2	10	.095	.124	.160	.178	.186	.186	.189	.191	
	30	.082	.132	.179	.201	.212	.212	.222	.225	
	50	.062	.113	.165	.189	.202	.202	.218	.220	
	70	.051	.093	.141	.165	.179	.179	.198	.200	
	90	.045	.079	.118	.140	.153	.153	.183	.185	
3	10	.088	.120	.157	.175	.183	.185	.163	.167	
	30	.059	.107	.154	.176	.187	.198	.193	.198	
	50	.039	.074	.114	.134	.146	.157	.166	.170	
	70	.031	.055	.085	.101	.111	.122	.127	.130	
	90	.028	.047	.070	.083	.092	.107	.113	.115	
4	10	.073	.113	.154	.174	.183	.187	.176	.184	
	30	.040	.082	.127	.148	.159	.170	.177	.185	
	50	.025	.049	.078	.094	.103	.113	.117	.123	
	70	.020	.036	.054	.065	.071	.079	.083	.087	
	90	.019	.032	.046	.054	.060	.069	.073	.076	
6	10	.056	.106	.143	.164	.175	.184	.173	.194	
	30	.021	.050	.081	.098	.107	.117	.123	.138	
	50	.013	.027	.041	.049	.054	.060	.064	.072	
	70	.011	.021	.029	.033	.035	.039	.041	.046	
	90	.011	.020	.026	.030	.032	.035	.037	.042	
8	10	.036	.082	.122	.143	.156	.166	.170	.208	
	30	.011	.029	.050	.062	.070	.078	.082	.101	
	50	.007	.016	.024	.028	.031	.035	.038	.046	
	70	.006	.013	.018	.020	.021	.023	.025	.030	
	90	.006	.013	.017	.019	.020	.022	.023	.028	
10	10	.024	.061	.109	.120	.131	.144	.147	.200	
	30	.006	.017	.034	.040	.046	.053	.056	.076	
	50	.004	.010	.016	.018	.020	.023	.024	.033	
	70	.004	.009	.013	.014	.015	.016	.016	.022	
	90	.004	.009	.013	.013	.014	.015	.016	.021	

Las ecuaciones 5-13 y 5-14 son usadas para calcular la iluminancia en cada uno de los cinco puntos de referencia del espacio interior. Si la ventana preserva la imagen, entonces las iluminancias están dadas por:

$$E_i = \tau(E_{xvcielo} CU_{cielo} + E_{xvg} CU_g) \quad (5-13)$$

y para una ventana difusa por:

$$E_i = 0.5\tau(E_{xvcielo} + E_{xvg})(CU_{cielo} + CU_g) \quad (5-14)$$

donde:

- E_i = iluminancia interior en un punto de referencia en lx
- T = transmitancia neta de la ventana
- $E_{xvcielo}$ = iluminancia exterior vertical del cielo en la ventana en lx
- CU_{cielo} = coeficiente de utilización del cielo
- E_{xvg} = iluminancia exterior vertical del componente piso en la ventana en lx
- CU_g = coeficiente de utilización del componente piso.

5.5 MEDICIÓN DE LA ILUMINACIÓN INTERIOR

La fotometría de modelos a escala y a tamaño natural permiten la investigación de espacios y sistemas de ventanas que son los más complejos que pueden ser evaluados usando métodos de lumen o programas de computadoras actualmente disponibles. De cualquier modo, la fotometría requiere del uso de equipo especial y las iluminancias pueden ser determinadas solamente para las condiciones del cielo bajo las cuales las mediciones fueron hechas. Ello puede no ser representativo de las condiciones promedio, porque las condiciones instantáneas del cielo pueden variar grandemente los términos promedio.

Las condiciones del cielo medidas pueden ser comparadas con las mediciones de aprovechamiento de la luz natural. Haciendo esta comparación, es deseable obtener mediciones para un rango de las condiciones del cielo (esto es, nublado y despejado), y, en el caso de cielos despejados, para un rango de posiciones del sol (por ejemplo, a intervalos de 4 minutos, intervalo en el que el sol cambia de posición 1°).

CONSIDERACIONES EN EL USO DE INSTRUMENTOS FOTOMETRICOS

Debido a la variabilidad de la luz natural, es usualmente necesario usar sensores conectados a un registro de datos con capacidad de grabación. Una alternativa es el uso de cielos y soles simulados, aunque solo unos cuantos existen y casi todos están en universidades e institutos de investigación. Los cielos y soles simulados tienen también sus limitaciones.

Algunos factores contribuyen al error en la fotometría de los modelos a escala y están básicamente bajo el control del usuario, incluyendo la calibración de sensores, superficies de reflectancias y la fidelidad con que el modelo duplica el espacio y el ventanaje de interés (aunque esto pueda ser difícil con sistemas de vidriaje complejo). Otros factores a considerar son listados más adelante.

Nivelación con fotoceldas. En el más profundo espacio lateral, donde mucha luz activa una fotocelda debido a que con un ángulo oblicuo, pequeños errores en la nivelación de una fotocelda pueden producir grandes errores en las mediciones de iluminación; para un ángulo de incidencia de 85° , un deslizamiento del sensor de $2'$ puede resultar en un error de 40% para el componente cielo.

Empleo del sensor. Mientras no sea difícil colocar las caras de la fotocelda con suficiente exactitud para diversas condiciones, pequeños errores en el empleo de modelos pueden resultar en grandes errores donde los gradientes de flujo sean pronunciados.

Luminancias basadas en mediciones usando videocámaras calibradas pueden grabar miles de mediciones de luminancias en un modelo físico, permitiendo la evaluación de los atributos de iluminación tales como la distribución de luminancia, color y visión. Este sistema de video puede también ayudar al diseñador en las evaluaciones del modelo.

MEDICIONES DE LAS CONDICIONES DEL CIELO

Es generalmente necesario hacer mediciones de la iluminancia total en una superficie horizontal libre (la iluminancia global) simultáneamente con mediciones de interiores como un registro del aprovechamiento de la luz natural. Otras importantes mediciones son la iluminancia difusa en una superficie horizontal libre y la luminancia cenit. El medio más básico para determinar la iluminancia difusa es la selección de un sensor con banda de sombras y usar un factor de corrección para compensar por la obstrucción de la luz natural difusa por la banda de sombra. Esto puede también ser usado para registrar la luz natural en planos verticales de interés.

5.6 EL FACTOR LUZ NATURAL

El método de factor luz natural, el cual ha sido adoptado por la CIE, trata de la iluminancia que hay en un punto interior de una habitación como una fracción de la iluminancia simultánea en un plano horizontal exterior libre. Esta relación es el llamada factor de luz natural. La luz solar directa es excluida para valores interiores y exteriores de iluminación.

La ventaja del factor luz natural como un indicador de la eficiencia de la iluminación natural es que éste expresa la eficiencia de una habitación y su ventanaje como un sistema de iluminación natural. El uso y limitaciones del factor luz natural esta relacionado con su variabilidad con respecto del tiempo cuando son determinados los valores medidos (aún bajo cielos nublados).

CAPITULO 6

EL HORARIO DE VERANO

6.1 ANTECEDENTES

En México se tienen tres husos horarios: a) el de Baja California; b) el de Sonora, Sinaloa, Nayarit y Baja California Sur, y c) el del resto del país que tiene una hora de diferencia con los cuatro estados antes señalados y dos horas con Baja California.

Durante casi toda la primavera, todo el verano y un mes del otoño, en el territorio se tiene la mayor insolación del año. Por ésta razón durante ese periodo que se denomina convencionalmente "verano" se puede aprovechar la luz natural más tiempo y obtener muchos beneficios.

El horario de verano que se ha decretado establecer en México consiste en adelantar simultáneamente una hora el reloj en todo el territorio nacional del primer domingo de abril al último domingo de octubre de cada año, con la misma estructura de husos horarios que actualmente se aplica.

De esta suerte, la mayor parte del país que utiliza el huso horario de 90° (-6 horas del meridiano de Greenwich), se desplazaría al huso horario de 75° (-5 horas del meridiano de Greenwich). Los estados de Baja California Sur, Sonora, Sinaloa y Nayarit que actualmente observan el huso horario 105° (-7 horas del meridiano de Greenwich), pasarían al de 90° (-6 horas del meridiano de Greenwich).

Baja California continuaría desplazando su horario del meridiano 120° (-8 horas del meridiano de Greenwich), como actualmente lo practica.

Los patrones de vida en la sociedad urbana han propiciado que durante el verano gran parte de la población se levante después de que sale el sol y también continúe con sus actividades después del ocaso, lo que repercute en el desperdicio de luz natural por las mañanas y que se requiera de mayor tiempo de iluminación artificial por la noche.

Al aplicar el horario de verano, la población hace un mejor uso de la luz natural y con ello se obtienen beneficios personales, sociales, deportivos, de seguridad, ambientales, ecológicos y productivos.

El horario de verano es una medida que utilizan muchos países en el mundo y prácticamente todos los países desarrollados. Se aplica tanto en el hemisferio norte como en el trópico y en el hemisferio sur.

6.2 HUSOS HORARIO EN MÉXICO

Los husos horario basados en la hora del meridiano de Greenwich fueron implantados en México a partir de 1922, fecha en que se utilizó para la mayor parte del país el horario correspondiente al meridiano 105^o. Para los estados de Tabasco, Chiapas, Campeche, Yucatán y Quintana Roo se adoptó el meridiano 90^o.

Periódicamente se fue modificando la configuración horaria del país, buscando satisfacer las diferentes necesidades que se fueron presentando: adecuación con horarios de trabajo, sortear escasez de agua en la presa de Necaxa, principal fuente de energía eléctrica, etc.

En abril de 1942 se decretó el horario del meridiano 105^o para los territorios norte y sur de Baja California así como para los estados de Sonora, Sinaloa y Nayarit y el meridiano de 90^o para el resto del país.

En diciembre de 1948 se decreta que en el territorio norte de Baja California se aplique la hora del meridiano 120^o, complementándose así las disposiciones que hoy norman la aplicación de los horarios en la República Mexicana.

6.3 BENEFICIOS

Los principales beneficios que se obtendrán con la aplicación del horario de verano son:

- Un mejor aprovechamiento de la luz natural.
- Una hora más de sol y luz natural por las tardes de primavera, verano y parte del otoño por siete meses del año, para realizar más actividades sociales y productivas.
- Menores situaciones de riesgo y accidentes asociados con la oscuridad.
- Ahorro de energía eléctrica del orden de 1,100 Gwh/año, equivalente al 1% del consumo anual de electricidad en el país. en generación bruta significa un ahorro de 1,300 GWh/año.
- Esta reducción supera el consumo anual de los estados de Aguascalientes, Colima o Tlaxcala, es similar al consumo de Zacatecas y representa el 10% de lo que consume el Distrito Federal.
- Reducción de combustibles asociados con la generación de energía eléctrica, equivalentes a dos millones de barriles de petróleo al año.
- Reducción de emisión de contaminantes en las zonas de generación de energía. Se calcula que se reducirá la emisión de 775,000 toneladas de bióxido de carbono (CO₂), 12,700 toneladas de óxidos de azufre (SO_x) , 2,300 toneladas de óxidos de nitrógeno (NO_x), 900 toneladas de partículas sólidas y 15 toneladas de hidrocarburos no quemados y compuestos intermedios.
- Diferencias de horario constantes todo el año, con los países con que se mantienen importantes intercambios.

- Crear conciencia en la población sobre el ahorro de energía, la productividad y la eficiencia.

**ESTA TESIS NO DEBE
SALIR DE LA BIBLIOTECA**

CONCLUSIONES

CONCLUSIONES

Durante milenios la luz ha ocupado un lugar muy importante en el desarrollo de muchas grandes civilizaciones; también fue objeto de culto, el sol era una fuente de vida y algunas veces un completo misterio. Hoy, al tener el Hombre un conocimiento más avanzado del sol y la relación que éste astro guarda con el planeta, ha sido capaz de establecer métodos para la aplicación eficiente de la energía solar a diferentes dispositivos y/o sistemas que le ayudan a conservar los recursos naturales que posee.

Uno de esos sistemas que le ayudan a ahorrar energía son los sistemas de iluminación natural. Cuando la luz del día es la principal fuente de iluminación interior son importantes las siguientes consideraciones:

La iluminación natural depende de un cierto número de factores que influyen en la cantidad de luz natural admitida. Dada una cierta intensidad de iluminación en el exterior, la cantidad de luz que alcanza al interior depende de la clase de vidrios empleados, del tamaño forma y posición de las ventanas y/o tragaluces en relación con la profundidad y altura del espacio interior que se desea iluminar, de los dispositivos de control de admisión de luz (por ejemplo cortinas o persianas) y de la presencia de objetos exteriores próximos árboles o edificios que limiten la superficie de cielo visible desde el lugar de trabajo.

Siendo la parte superior de la ventana la que da su luz a las partes más profundas de el espacio interior, ésta debe estar lo más cerca posible del techo. La superficie acristalada debe aprovechar toda la parte que prácticamente sea posible de la pared, la cual no debe ser menor al 20% del área del suelo como mínimo. El ancho de la habitación no debe pasar de dos veces la altura de la parte superior de los cristales sobre el suelo.

Existen hoy en día diferentes razones por las cuales es necesario el ahorro de energéticos, incluyendo la energía eléctrica. Gran parte de ésta energía se desperdicia en los servicios de iluminación. Con el presente trabajo pretendí mostrar como es posible el uso eficiente de la luz natural para ahorrar energía, pero es evidente que esta acción por si sola no cambiará la cultura del uso de la energía eléctrica; sin embargo, al sumarla a muchas otras contribuirá a lograr los objetivos de ahorro que tan importantes son para nuestro México.

ANEXO

Para comprender mejor el método de lumen para iluminación natural veamos el siguiente ejemplo práctico. Supongamos que deseamos saber cuál es el nivel de iluminación que proporcionan 10 tragaluzes en una pequeña nave industrial localizada en la ciudad de México y cuyo techo es del tipo "diente de sierra". El área de la nave es de aproximadamente 25x25 m. El cielo se encuentra totalmente despejado y el cálculo se realizará para un 21 de marzo a las 15:00 hrs. Los tragaluz tienen un área de 25x1m cada uno. Las figuras A1 y A2 ilustran esta situación.

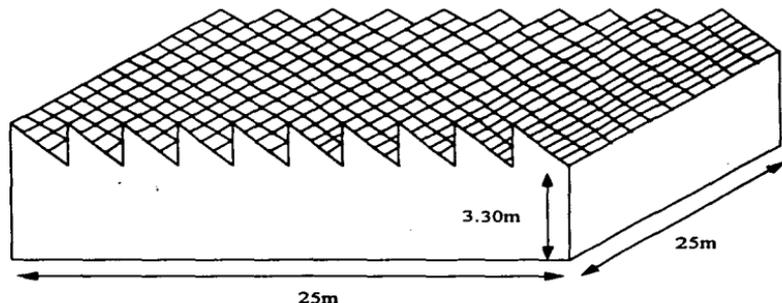


Fig. A.1 Vista frontal de la nave

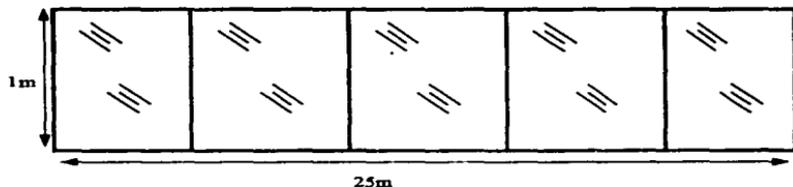


Fig. A.2 Tragaluz instalado en el techo de la nave

SOLUCIÓN:

Aplicando el método de lumen para iluminación vertical, tenemos que para cielos despejados o seminublados el nivel de iluminación está dado por la ecuación 5-9.

$$E_i = (E_{\text{xcielo}} \tau_v + E_{\text{xhsol}} \tau_d) CU \cdot N \cdot \frac{A}{A_w} \quad (5-9, \text{ página } 60)$$

E_{xhsol} está dada por:

$$E_{\text{dh}} = E_{\text{dn}} \text{sen} \alpha_t \quad (3-14, \text{ página } 22)$$

La altitud solar α_t está dada por:

$$\alpha_t = \arcsen(\text{sen}/\text{sen} \delta - \text{cos}/\text{cos} \delta \text{cos} \frac{\pi t}{12}) \quad (3-5, \text{ página } 16)$$

El tiempo solar t está dado por:

$$t = t_s + ET + \frac{12(\text{SM} - L)}{\pi} \quad (3-3, \text{ página } 14)$$

El tiempo estándar t_s esta dado por:

$$t_s = t_d - 1 \quad (3-2, \text{ página } 14)$$

Considerando que t_d (hora normal del día) es 15:00 p.m., tenemos

$$t_s = 15 - 1 = 14$$

Para el día 21 de marzo $J = 80$. Aplicando este dato en la ecuación de tiempo (3-1, página 13):

$$ET = 0.170 \text{sen} \left[\frac{4\pi(J - 80)}{373} \right] - 0.129 \text{sen} \left[\frac{2\pi(J - 8)}{355} \right] \quad (3-1)$$

$$ET = 0.170 \text{sen} \left[\frac{4\pi(80 - 80)}{373} \right] - 0.129 \text{sen} \left[\frac{2\pi(80 - 8)}{355} \right] = -0.1233$$

SM lo tomamos de la figura 3.2, página 14, (zona de tiempo central) y es igual a 1.73 rad.

Sustituyendo estos valores en la ecuación de tiempo solar (3-3, página 14):

$$t = t_s + ET + \frac{12(\text{SM} - L)}{\pi} = 14 + (-0.1233) + \frac{12(1.57 - 1.73)}{\pi} = 13.2656$$

La declinación solar esta dada por (3-4, página 14):

$$\delta = 0.4093 \text{sen} \left(\frac{2\pi(J - 81)}{368} \right) \quad (3-4)$$

Sustituyendo valores tenemos:

$$\delta = 0.4093 \operatorname{sen} \left(\frac{2\pi(80-81)}{368} \right) = -0.0069879 \text{ (rad)}$$

De la figura 3.1, página 12, encontramos que la ciudad de México tiene una latitud es de 0.33 rad y una longitud de 1.73 rad. Aplicando estos valores a la ecuación de altitud solar (3-5, página 16) tenemos:

$$\alpha_t = \arcsen(\operatorname{sen} 1.73 \operatorname{sen} 0.0069879 - \operatorname{cos} 1.73 \operatorname{cos} 0.0069879 \operatorname{cos} \frac{\pi \times 13.265}{12}) = 0.8923 \text{ (rad)}$$

Ahora, calculando la iluminancia solar corregida por la órbita elíptica terrestre (3-11, página 20) tenemos:

$$E_{xt} = 128 \left(1 + 0.034 \operatorname{cos} \frac{2\pi(J-2)}{365} \right) \quad (3-11)$$

$$E_{xt} = 128 \left(1 + 0.034 \operatorname{cos} \frac{2\pi(80-2)}{365} \right) = 128.984 \text{ (Klx)}$$

Calculando la iluminancia solar directa a nivel del mar (3-12, página 21)

$$E_{dn} = E_{xt} e^{-c_m} \quad (3-12)$$

Considerando cielo despejado $c = 0.21$ (figura 3-5, página 21)

Calculando m con (3-13, página 22)

$$m = \frac{1}{\operatorname{sen} \alpha_t} \quad (3-13)$$

$$m = \frac{1}{\operatorname{sen} 0.8923} = 1.2844$$

$$E_{dn} = 128.984 e^{-0.21 \times 1.2844} = 98.4892 \text{ (Klx)}$$

Calculando la iluminancia solar horizontal directa con (3-14, página 22):

$$E_{dh} = E_{dn} \operatorname{sen} \alpha_t$$

$$E_{dh} = 98.4892 \operatorname{sen} 0.8923 = 76.6762 \text{ (Klx)}$$

$E_{x\text{cielo}}$ es la iluminancia horizontal debida a cielos despejados y esta dada por (3-16, página 23), entonces:

$$E_{kh} = A + B \operatorname{sen}^c \alpha_t \quad (3-16)$$

De la figura 3-5

$$A = 0.8$$

$$B = 15.5$$

$$c = 0.5$$

$$E_{x\text{cielo}} = E_{kh} = 0.8 + 15.5 \operatorname{sen}^{0.5} 0.8923 = 14.4762 \text{ (Klx)}$$

Ahora, de la figura 4.3:

Para fibra de vidrio reforzado con plástico: $T_d = 80\%$

Tomando un espesor de la hoja igual a 5mm: $R_a = 5\text{mm}$

De la figura 4.1, considerando área industrial y una posición vertical:

LLF = 0.8

Entonces:

$$\tau_d = (0.80)(0.005)(0.8) = 0.0032$$

Recordando que para muchas aplicaciones T_D es igual al valor con ángulo de incidencia de 0° y ayudándonos de la figura A3 encontramos que este valor es 0.10. Entonces:

$$\tau_D = (0.10)(0.005)(0.8) = 0.0004$$

Encontrando el CU con ayuda de (5-7, página 59) y la figura 5.2 de la página 61:

$$\text{RCR} = \frac{5hc(l+w)}{hw} = \frac{5(2.50)(25+25)}{25 \times 25} = 1$$

Con este valor y considerando una reflectancia de pared de 50% y una reflectancia de techo de 80%, encontramos en la figura 5.2:

$$\text{CU} = 1.05$$

El área de cada tragaluz es:

$$A = 25 \text{ m}^2 / \text{tragaluz} = A_{\text{total}} = 250 \text{ m}^2$$

El área del plano de trabajo es:

$$A_w = 25 \times 25 = 625 \text{ m}^2$$

Sustituyendo los valores encontrados en la ecuación (5-9, página 60):

$$E_i = (E_{\text{xcielo}} \tau_d + E_{\text{xhsol}} \tau_D) CU \cdot N \cdot \frac{A}{A_w}$$

$$= (14.47 \times 0.0032 + 76.67 \times 0.0004) \chi 1.05 \chi 10 \frac{250}{625} = 323.37 \text{ (lx)}$$

Así, encontramos que para las condiciones dadas del problema, los 10 tragaluces proporcionarán un nivel de iluminación de 323.37 luxes.

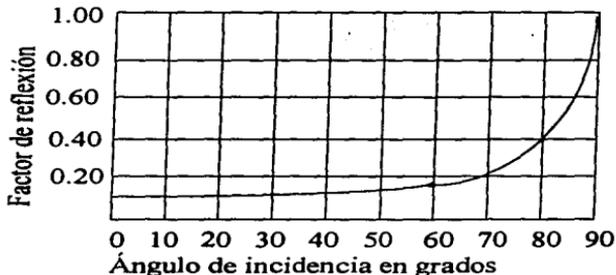


Fig. A.3 Variación del factor de reflexión del cristal con el ángulo de incidencia

Este ejemplo nos ha mostrado la forma en la que se aplica la teoría para cálculos de iluminación natural. Considero que si esta teoría se aplica en forma coordinada con una acción muy sencilla como lo es la aplicación del horario de verano, el potencial de ahorro de energía puede verse sumamente favorecido aunque este ahorro depende también del espacio interior al cual se aplique la luz natural; veamos porque:

En México el consumo industrial representa más de la mitad de la energía eléctrica generada, aplicándose un porcentaje importante de la misma en los procesos productivos para operar motores y equipo eléctrico en general. Es de suponer que un cambio en el horario no afectará este consumo, dependiente más bien del volumen de producción y no del momento en que se produce. Sin embargo, al avanzarse una hora, la demanda industrial se defasa más del pico que genera la demanda por aire acondicionado y la creada, más tarde, por el alumbrado público y doméstico.

El modo en que cada industria funciona en lo particular habrá de incidir desde luego, en las mayores o menores ventajas que pueden obtener de la adopción del horario de verano. Cuando las empresas laboran tres turnos tendrán que proporcionar alumbrado mientras esté oscuro, independientemente de la hora en que sea, y algo similar ocurrirá con el aire acondicionado u otros servicios que dependan de la energía eléctrica para su funcionamiento. Aquellas que trabajan dos turnos acortarán en una hora el lapso en que deben mantener en operación sus sistemas y, por último, las fábricas que sólo tienen un turno, obtendrán el máximo provecho de la medida.

En efecto, como el horario de trabajo de estas instalaciones va de las 7 a.m. a las 3 p.m., con variaciones que no exceden normalmente de una hora, pueden depender de la luz natural para el alumbrado de sus áreas exteriores, de sus posibles zonas de circulación y almacenes y, en muchas industrias que utilizan naves total o parcialmente abiertas donde se desarrolla trabajo que no requiere niveles altos de iluminación, también en sus áreas de proceso.

Desde luego, se puede suponer que las fábricas que tienen naves grandes y cerradas han de requerir el encendido permanente de sus luminarias interiores. Igualmente, en aquellas en que se producen partes delicadas o se manufacturan piezas de gran precisión y hay, por lo tanto, que proporcionar iluminación especial en cada estación de trabajo, se seguirá consumiendo lo mismo, por estos conceptos, aún con horario de verano.

Sin embargo, en muchas empresas localizadas en el norte del país, las temperaturas que prevalecen en verano obligan a que en estas áreas de producción se proporcione aire acondicionado, tanto para el confort de los trabajadores, como de los requerimientos del proceso productivo. Si las horas de trabajo se desplazan hacia el comienzo del día, en que las temperaturas son menores, el consumo eléctrico será también menor. Además, hay que tomar en cuenta que todas las fábricas tienen oficinas y en éstas es siempre posible aprovechar el adelanto de una hora en las actividades.

Las mediciones realizadas a los usuarios comerciales indican que no hay un ahorro en este sector debido a la aplicación del horario de verano, sino un incremento en la demanda debido al uso de aire acondicionado.

Por último, el horario de verano tiene más impacto entre los usuarios domésticos, y en particular, en la iluminación artificial. Los usuarios domésticos consumen energía en función básicamente de dos aspectos: su nivel de equipamiento y sus hábitos de uso. Estudios previos muestran que en el promedio nacional la energía eléctrica en este sector se consume en la forma siguiente: 43% iluminación, 22% conservación de alimentos, 20% aire acondicionado, 12% televisión y 3% otros.

BIBLIOGRAFIA

BIBLIOGRAFÍA:

1. Boletín I.I.E. Enero-Febrero 1996, vol. 20, número 1.
2. Boletín I.I.E. Marzo-Abril 1997, vol. 21, número 2.
3. Donald G. Fink. Manual de Ingeniería Eléctrica, 13ava edición, McGraw-Hill, México 1996.
4. Fide, Revista. Octubre-Noviembre 1995, número 17.
5. García Chávez José R. Ahorro de Energía y Confort Natural en las Edificaciones. Apuntes Abril de 1993
6. Gutiérrez Santos Fco. Manual de Iluminación. Holophane, México
7. I.E.S. Ligthing Handbook, 8ava edición, 1993.
8. S. V. Szokolay. Arquitectura Solar. 1a edición, editorial Blume.