



**Universidad Nacional Autónoma de México**

**Facultad de Arquitectura**

**Taller: Juan Antonio García Gayou**

**“Iluminación natural en la arquitectura”**

**Tesis para obtener el título de**

**ARQUITECTO**

**Presentada por:**

**Billie Ioan Albino Silva**

**Asesores**

**Arq. Reine Mehl Strauch**

**Mtra. Elodia Gómez Maqueo Rojas**

**Arq. Emma García Picazo**

**Noviembre de 2007**



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.

# **Agradecimientos**

## **A mi Universidad Nacional**

Quien me brindo un espacio en sus instalaciones para poder emprender un camino hacia el desarrollo de una actividad fundamental en la vida como lo es la arquitectura.

## **A mis maestros**

Por sus conocimientos, enseñanzas y experiencias transmitidos hacia mi, además de todo el apoyo que me brindaron en mi proceso de formación personal.

## **A la Arquitecta Reine Mehl**

A quien le debo en gran parte mi titulación, ya que sin su motivación, conocimientos, y el gran apoyo que me ha brindado, no hubiese sido posible este documento.

## **A mis padres**

A quienes jamás encontrare la forma de agradecer el cariño, comprensión y apoyo brindados en las derrotas y logros obtenidos, haciendo de éste un triunfo más suyo que mío, por la forma en que lo hemos compartido. Espero que nunca olviden que mis ideales, esfuerzos y logros, también han sido suyos e inspirados en ustedes.

## **A mis seres queridos**

Que me apoyaron en todo momento en mis estudios y preparación profesional, sin ustedes no hubiese llegado hasta donde estoy.

**A todos ustedes ¡Gracias!**

## Índice

Capítulo	Tema	Página
1.0	<b>Justificación</b>	11
2.0	<b>Naturaleza de la luz</b>	13
	Luz y energía	13
	La luz	14
	El espectro electromagnético	15
	El espectro visible	16
2.1	<b>Propiedades de la luz</b>	17
	Introducción histórica	17
	Teoría ondulatoria	17
	Teoría cuántica	18
	Teoría de la dualidad onda – partícula	18
2.2	<b>Características físicas de la luz</b>	19
	La reflexión	19
	La refracción	20
	La transmisión	20
	La absorción	21
	Luz blanca	21
2.3	<b>Medición de la luz</b>	23
	Intensidad lumínica	23
	Curva V-LAMBDA	25
	El lumen y el lux	26
	Fuentes luminosas	30
	El color espectral	30
2.4	<b>La naturaleza del color</b>	30
	¿Qué es el color?	31
	El color	31
	El color como fenómeno físico	31
	El color como fenómeno sensorial	32
	Pureza del color	33
	El color que se observa en los objetos	34
	Colores y mezclas	36
	Colores en las fuentes luminosas	37



	Psicología de color	38
	Percepción del color	38
	Asociación del color	39
	Visión a color	40
	Efecto Purkinje	40
	Deficiencias del color	41
	Colorimetría	41
	Los colores primarios y los colores secundarios	41
	El triángulo de color	43
	El sistema del color de Ostwald	43
	Sistema de color de Munsell	43
	El sistema del color ISCC-NBS	44
	Sistema de color CIE	45
	Temperatura del color	47
	Fuentes estándar de iluminación	49
	Instrumentos para la medición del color	49
<b>3.0</b>	<b>La Iluminación y la Vista</b>	<b>51</b>
	Introducción	51
	Los procesos visuales	52
	El ojo	52
	Generalidades de interés sobre el ojo y la vista	59
<b>4.0</b>	<b>La importancia de la luz natural</b>	<b>64</b>
	Objetivos y alcances	66
<b>5.0</b>	<b>La próxima revolución en el diseño arquitectónico y las estrategias de luz natural</b>	<b>68</b>
<b>5.1</b>	<b>Panorama de iluminación a través de luz natural de día</b>	<b>71</b>
	Luz natural de día y luz solar	72
	Eficiencia lumínica	73
	¿Por qué iluminación natural?	74
<b>5.2</b>	<b>Ventajas de iluminar un edificio a través de luz natural</b>	<b>75</b>
	Mejor calidad de luz	75
	Mejor salud y comodidad para el usuario	75
	Productividad incrementada	76

<b>6.0</b>	<b>Iluminación natural de día</b>	77
	Zona de luz natural de día	77
	Consideraciones sobre el diseño de vanos	78
	Abertura efectiva	80
	Repisas lumínicas	80
	Estrategias de luz cenital	81
	Tragaluces	81
	Claraboya	82
	Monitores de techo	82
	Techo de diente de sierra	82
	Controles de luz natural de día	83
	Coordinación de diseño.	84
	Modelando la luz natural de día	84
<b>7.0</b>	<b>Diseño de luz natural</b>	86
	Iluminación para la función visual	87
	Iluminación para deleite visual	88
	La Iluminación y la integración arquitectónica	88
	Iluminación, eficiencia energética y mantenimiento	89
	Integración de la natural con la luz artificial	90
<b>8.0</b>	<b>Luz natural de día</b>	92
	Consumo de energía	94
	El potencial para el ahorro de energía	95
	Ventanas verticales	96
	Revestimientos	97
	Dispositivos de control solar	97
	Atrios y pasajes bajo cristal	98
	Tragaluces y vanos en techumbres	98
<b>9.0</b>	<b>Estrategias de luz natural</b>	100
	Luz natural como deleite	100
	Beneficios y estrategias de luz natural	101
	Puntos fundamentales	102
	Estrategias efectivas de diseño	104
	Edificios de oficinas	106
	Fábricas	106

	Vivienda	106
<b>10.0</b>	<b>Sistemas de iluminación natural</b>	107
	Panorama general	107
	Ventajas de la iluminación natural	108
	Principios básicos de iluminación natural	108
<b>10.1</b>	<b>Tipos de sistemas de Iluminación Natural</b>	109
	Ventanas verticales	109
	Tragaluces	111
	Tragaluces en techumbres de dientes de sierra	112
	Monitor o tragaluz tipo linternilla	112
	Atrio	113
<b>11.0</b>	<b>Distribución Lumínica del Cielo</b>	115
	Modelos de cielo estandarizados	116
	Cielo nublado de la CIE	116
	Cielo uniforme de la CIE	117
	Cielo despejado de la CIE	117
	Cielo promedio BRE	118
	Valores de iluminancia del cielo para diseño	119
	Valores de diseño del cielo	120
	Obteniendo valores del cielo para el diseño	121
<b>12.0</b>	<b>El factor de luz de día</b>	122
	Definición de factor de luz natural	123
	Cálculos de factor de luz de día	123
	Factor de luz de día promedio	123
	Transportadores para determinar factor de luz de día	123
	Proyección de puntos isolux del cielo	124
	Análisis geométrico usando programas de cómputo	124
	Análisis mediante programas de simulación	124
<b>13.0</b>	<b>Factor de luz de día promedio</b>	125
	Método de luz dividido	127
	Transportadores de factor de luz de día	127
	Componente del cielo (CC)	128
	Factores de corrección para ancho de ventana en planta	129

	Componente de reflexión exterior ERC	130
	Componente de reflexión interior	130
	Puntos isolux del cielo	131
	Proyecciones usando la montea solar	131
	Diferentes tipos de cielo	136
<b>14.0</b>	<b>Sistemas Innovadores de luz natural</b>	<b>134</b>
	Ductos de luz	134
	Sistemas de persianas con espejos	138
	Sistemas prismáticos	140
	Prismas que dirigen la luz solar	140
	Prismas que excluyen la luz solar	141
	Paneles cortados con láser (LCP = Laser Cut Panels)	142
	Cristal con tecnologías avanzadas	144
	Sistemas de cristal electrocrómico	145
<b>15.0</b>	<b>Sistemas de luz natural</b>	<b>149</b>
<b>15.1</b>	<b>Introducción</b>	<b>149</b>
<b>15.2</b>	<b>Matriz de sistema</b>	<b>151</b>
	Sistemas de luz natural con protección solar	151
	Sistemas de luz natural sin protección solar	151
	Nota sobre la matriz	152
<b>15.3</b>	<b>Repisas lumínicas</b>	<b>158</b>
<b>15.3.1</b>	<b>Descripción técnica</b>	<b>158</b>
	Componentes	158
	Producción	158
	Ubicación del sistema de vanos	158
	Barreras técnicas	159
<b>15.3.2</b>	<b>Aplicación</b>	<b>159</b>
<b>15.3.3</b>	<b>Principios y características físicas</b>	<b>160</b>
	Repisa lumínica convencional	161
	Repisa lumínica con tratamiento óptico	161
	Repisa lumínica de rastreo solar	162
<b>15.3.4</b>	<b>Control</b>	<b>163</b>
<b>15.3.5</b>	<b>Mantenimiento</b>	<b>163</b>
<b>15.3.6</b>	<b>Costo y ahorro de energía</b>	<b>163</b>
<b>15.3.7</b>	<b>Ejemplos de aplicación</b>	<b>163</b>

<b>15.4</b>	<b>Sistema de persianas de tiras y persianas ciegas</b>	165
<b>15.4.1</b>	<b>Descripción técnica</b>	165
	Componentes	165
	Ubicación en el sistema de vanos	165
	Barreras técnicas	165
<b>15.4.2</b>	<b>Aplicación</b>	166
<b>15.4.3</b>	<b>Principios y características físicas</b>	166
	Persianas fijas y móviles	166
	Persianas translucidas	167
	Persianas que dirigen la luz	167
<b>15.4.4</b>	<b>Control</b>	168
<b>15.4.5</b>	<b>Mantenimiento</b>	168
<b>15.4.6</b>	<b>Costo y ahorro de energía</b>	168
<b>15.4.7</b>	<b>Ejemplos de aplicación</b>	169
<b>15.5</b>	<b>Paneles prismáticos</b>	171
<b>15.5.1</b>	<b>Descripción técnica</b>	171
	Componentes	171
	Fabricación	171
	Ubicación en el sistema de vanos	172
	Barreras técnicas	172
<b>15.5.2</b>	<b>Aplicación</b>	173
	Luz natural difusa	173
	Sistema de protección solar fija	173
	Sistema de protección solar móvil	173
<b>15.5.3</b>	<b>Principios y características físicas</b>	173
<b>15.5.4</b>	<b>Control</b>	174
<b>15.5.5</b>	<b>Mantenimiento</b>	174
<b>15.5.6</b>	<b>Costo y ahorro de energía</b>	175
<b>15.5.7</b>	<b>Ejemplos de aplicación</b>	175
<b>15.6</b>	<b>Panel con cortes por laser</b>	176
<b>15.6.1</b>	<b>Descripción técnica</b>	176
	Componentes	176
	Ubicación en el sistema de vanos	177
	Barreras técnicas	177
<b>15.6.2</b>	<b>Aplicación</b>	177
<b>15.6.3</b>	<b>Principios y características físicas</b>	178
	Sistema fijo de redirección de luz	178

	Sistema de redirección de la luz en ventanas	179
	Sistemas de protección solar en ventanas	179
<b>15.6.4</b>	<b>Control</b>	180
<b>15.6.5</b>	<b>Mantenimiento</b>	180
<b>15.6.6</b>	<b>Ahorro de energía</b>	180
<b>15.6.7</b>	<b>Ejemplos de aplicación</b>	180
<b>15.7</b>	<b>Tragaluz selectivo angular (panel de corte láser)</b>	181
<b>15.7.1</b>	<b>Descripción técnica</b>	181
	Componentes	181
	Producción	182
	Ubicación en el sistema de vanos	182
	Barreras técnicas	182
<b>15.7.2</b>	<b>Aplicación</b>	182
	Latitudes tropicales o subtropicales	183
	Latitudes hacia el norte	183
	Tragaluces	184
<b>15.7.3</b>	<b>Principios y características físicas</b>	184
<b>15.7.4</b>	<b>Control</b>	185
<b>15.7.5</b>	<b>Mantenimiento</b>	185
<b>15.7.6</b>	<b>Ahorro de energía</b>	185
<b>15.7.7</b>	<b>Ejemplos de aplicación</b>	185
<b>15.8</b>	<b>Persianas guadoras de luz</b>	186
<b>15.8.1</b>	<b>Descripción técnica</b>	186
	Componentes	186
	Producción	186
	Ubicación en el sistema de vanos	187
	Barreras técnicas	187
<b>15.8.2</b>	<b>Aplicación</b>	187
<b>15.8.3</b>	<b>Principios y características físicas</b>	188
<b>15.8.4</b>	<b>Control</b>	189
<b>15.8.5</b>	<b>Mantenimiento</b>	189
<b>15.8.6</b>	<b>Costo y ahorro de energía</b>	189
<b>15.8.7</b>	<b>Ejemplos de aplicación</b>	190
<b>15.9</b>	<b>Cristal redirector de luz solar</b>	191
<b>15.9.1</b>	<b>Descripción técnica</b>	191
	Componentes	191
	Producción	191

	Ubicación del sistema de vanos	192
	Barreras técnicas	193
<b>15.9.2</b>	<b>Aplicación</b>	193
<b>15.9.3</b>	<b>Principios y características físicas</b>	193
	Desviación vertical	193
	Desviación horizontal	194
<b>15.9.4</b>	<b>Control</b>	194
<b>15.9.5</b>	<b>Mantenimiento</b>	194
<b>15.9.6</b>	<b>Ejemplos de aplicación</b>	195
<b>15.10</b>	<b>Cristal guiador de luz cenital con elementos ópticos holográficos</b>	195
<b>15.10.1</b>	<b>Descripción técnica</b>	195
	Componentes	195
	Producción	195
	Ubicación del sistema de vanos	196
	Barreras técnicas	196
<b>15.10.2</b>	<b>Aplicación</b>	196
<b>15.10.3</b>	<b>Principios y características físicas</b>	196
<b>15.10.4</b>	<b>Control</b>	197
<b>15.10.5</b>	<b>Mantenimiento</b>	197
<b>15.10.7</b>	<b>Ejemplos de aplicación</b>	197
<b>15.11</b>	<b>Sistemas de protección solar selectivos direccionales empleando elementos ópticos holográficos (HOES)</b>	198
<b>15.11.1</b>	<b>Descripción técnica</b>	198
	Componentes	198
	Producción	199
	Ubicación en el sistema de vanos	199
	Barreras técnicas	200
<b>15.11.2</b>	<b>Aplicación</b>	200
<b>15.11.3</b>	<b>Principios y características físicas</b>	201
	Sistemas de protección solar transparente (reflexión total)	201
	Sistema de concentración solar	201
<b>15.11.4</b>	<b>Control</b>	202
<b>15.11.5</b>	<b>Mantenimiento</b>	202
<b>15.11.6</b>	<b>Costos y ahorro de energía</b>	202
<b>15.11.7</b>	<b>Ejemplos de aplicación</b>	202
<b>15.12</b>	<b>Plafones anidólicos</b>	203
<b>15.12.1</b>	<b>Descripción técnica</b>	203

	Componentes	203
	Disponibilidad	204
	Ubicación en el sistema de vanos	204
	Barreras técnicas	204
<b>15.12.2</b>	<b>Aplicación</b>	204
<b>15.12.3</b>	<b>Principios y características físicas</b>	206
<b>15.12.4</b>	<b>Control</b>	207
<b>15.12.5</b>	<b>Mantenimiento</b>	208
<b>15.12.6</b>	<b>Ejemplos de aplicación</b>	209
<b>15.13</b>	<b>Aberturas cenitales anidólicas</b>	210
<b>15.13.1</b>	<b>Descripción técnica</b>	210
	Componentes	210
	Producción	212
	Ubicación en el sistema de vanos	212
	Barreras técnicas	212
<b>15.13.2</b>	<b>Aplicación</b>	212
<b>15.13.3</b>	<b>Principios y características físicas</b>	212
<b>15.13.4</b>	<b>Control</b>	213
<b>15.13.5</b>	<b>Mantenimiento</b>	213
<b>15.13.6</b>	<b>Costo y ahorro de energía</b>	213
<b>15.13.7</b>	<b>Ejemplos de aplicación</b>	214
<b>15.14</b>	<b>Persiana solar anidólica</b>	215
<b>15.14.1</b>	<b>Descripción técnica</b>	215
	Componentes	216
	Producción	216
	Ubicación en el sistema de vanos	216
	Barreras técnicas	217
<b>15.14.2</b>	<b>Aplicación</b>	217
<b>15.14.3</b>	<b>Principios y características físicas</b>	217
<b>15.14.4</b>	<b>Control</b>	218
<b>15.14.5</b>	<b>Mantenimiento</b>	218
<b>15.14.6</b>	<b>Costo y ahorro de energía</b>	248
<b>15.14.7</b>	<b>Ejemplos de aplicación</b>	219
<b>16.0</b>	<b>Calculo de Luz Natural</b>	220
	Introducción	220
<b>16.1</b>	<b>Revisando las herramientas</b>	221



16.1.1	<b>Método simplificado para obtener las dimensiones de un tragaluz dado el FLD</b>	224
	Ejemplo de aplicación	224
16.1.2	<b>Factor de luz de día, componente internamente reflejado</b>	225
	Ejemplo de aplicación	226
16.2	<b>Método simplificado para tamaños mínimos de vanos para vivienda</b>	227
	Ejemplo de aplicación	227
16.2.1	<b>Determinación de factor de luz de día para espacios con iluminación cenital</b>	228
	Ejemplo de aplicación	229
16.3	<b>Factor de luz de día componente interno reflejado por medio de nomogramas</b>	230
	Ejemplo de aplicación	231
16.3.1	<b>Configuración tipo atrio</b>	232
	Nomograma para factor de luz día en oficinas adyacentes a atrios	232
	Ejemplo de aplicación	233
16.4	<b>El horizontoscopio para determinar número de horas de sol, FLD del componente de sol de cielo directo, y de penetración de calor radiante</b>	234
16.4.1	<b>Diagrama waldram para determinar el componente de cielo directo del FLD</b>	235
	Ejemplo de aplicación	235
16.4.2	<b>Determinación de la autonomía de luz natural</b>	237
	Ejemplo de aplicación	237
16.4.3	<b>Método para estimar las horas de encendido de luz eléctrica basado en FLD y en información del clima local.</b>	238
	Ejemplo de aplicación	239
16.5	<b>B.R.S. La determinación del componente del cielo directo en puntos específicos por medio de transportadores B.R.S. de luz natural</b>	240
	Ejemplo de aplicación	240
16.6	<b>Estudio tipológico de los principales parámetros de luz natural</b>	241
	Ejemplo de aplicación	242
16.7	<b>Análisis empleando modelos a escala para determinar el desempeño de luz natural de día</b>	243
	Ejemplo de aplicación	243
16.8	<b>Panorama de las herramientas anteriores</b>	244
	<b>Bibliografía</b>	246

## 1.0 Justificación

Este documento intenta dar un panorama de los sistemas de luz natural de vanguardia, los parámetros de desempeño para calificarlos, y una evaluación del potencial de ahorro de energía y aceptación por parte de los usuarios. Uno de los propósitos de esta investigación es superar la falta de información sobre las ventajas de luz natural en los espacios arquitectónicos y el desempeño de sistemas de luz natural innovadores dentro de los edificios y en diferentes zonas climáticas alrededor del mundo. Esta información debe emplearse desde las etapas iniciales de todo el proceso del diseño arquitectónico.

Los sistemas innovadores de luz natural están diseñados para redirigir la luz solar o del cielo a superficies que la requieran y sin deslumbramiento. Estos sistemas emplean dispositivos ópticos que inician la reflexión, la refracción y/o el uso de la reflexión interna total de luz solar o del cielo. Sistemas de luz natural avanzados pueden diseñarse para activamente rastrear el sol o pasivamente controlar la dirección de la luz solar o del cielo. Los sistemas incluidos dentro de este estudio se han limitado generalmente a dispositivos pasivos.

Este documento describe en detalle el amplio rango de sistemas de luz natural innovadores y disponibles hoy en día en casi todas partes, incluyendo la información sobre sus componentes, principios en que se basan, aplicaciones para las cuales son apropiadas, su fabricación, control, costos y ahorro de energía, mantenimiento, ejemplos de uso, y evaluaciones de desempeño.

Las evaluaciones de desempeño provienen del monitoreo de sistemas que emplean modelos físicos bajo situaciones simuladas, o a través de pruebas de laboratorio o espacios arquitectónicos bajo condiciones reales. Los tipos de sistemas de vanguardia seleccionados están disponibles en el mercado o se han desarrollado recientemente en laboratorios. Los resultados incluidos en este documento demuestran que si se seleccionan los sistemas de luz natural de acuerdo al clima y se integran correctamente a los sistemas de luz artificial y protección solar, la mayoría de estos sistemas pueden mejorar la cantidad y calidad de luz natural al interior de los edificios y de esta manera aumentar el ahorro de energía.

Las estrategias de luz natural raramente se toman en cuenta desde las primeras etapas del proyecto arquitectónico. Esto se debe, en parte, a la ausencia de herramientas sencillas que pueden predecir el desempeño y pueden ser empleados por gente que no es experta. Este estudio también incluye una introducción al uso adecuado de protección solar y controles de luz artificial con el propósito de lograr ahorros de energía.

Desgraciadamente todavía existe resistencia al uso de sistemas de luz natural de vanguardia, especialmente en la transición de la investigación a la práctica. Dos áreas clave que requieren mayor investigación tienen que ver con la dimensión humana de la ecuación de luz natural y la integración de sistemas de luz natural en los espacios arquitectónicos para lograr soluciones de bajo consumo de energía que también satisfagan requerimientos humanos. La información que se presenta en este documento muestra que las tecnologías de vanguardia en luz natural pueden cerrar la brecha entre beneficios potenciales y logros reales en la práctica de la arquitectura.

## 2. Naturaleza de la luz

La luz, abarca un rango estrecho del espectro de energía electromagnética, posee características especiales, ya que puede estimular los dos tipos de fotorreceptores que permiten la visión dentro del ojo (conos y bastones). Por consiguiente, la luz, se denomina como "energía visible", aunque no podamos verla en realidad.

### Luz y energía

La **energía electromagnética** es sólo una de las varias formas de la energía que conocemos. Otras formas son: la **energía térmica**, la **energía química**, la **energía cinética**, la **energía atómica**, la **energía eléctrica**, etcétera. La energía electromagnética también es llamada **energía radiante**, porque existe en forma de ondas ondulatorias que viajan en trayectoria recta, como rayos, en todas las direcciones de la fuente. Así que la luz, siendo energía de forma radiante, también es conocida como **energía radiante visible**.

Considerando que "**la energía no se destruye, sino solo se transforma**", y considerando también la composición fisiológica y las funciones del ojo, podemos entender que la luz se transforma de **energía eléctrica a energía electromagnética radiante**, dentro de una fuente luminosa, luego, viaja en forma de onda de alta frecuencia a gran velocidad y resulta útil al hombre cuando una cantidad suficiente de esta, se transforma en energía química dentro de los fotorreceptores del ojo.

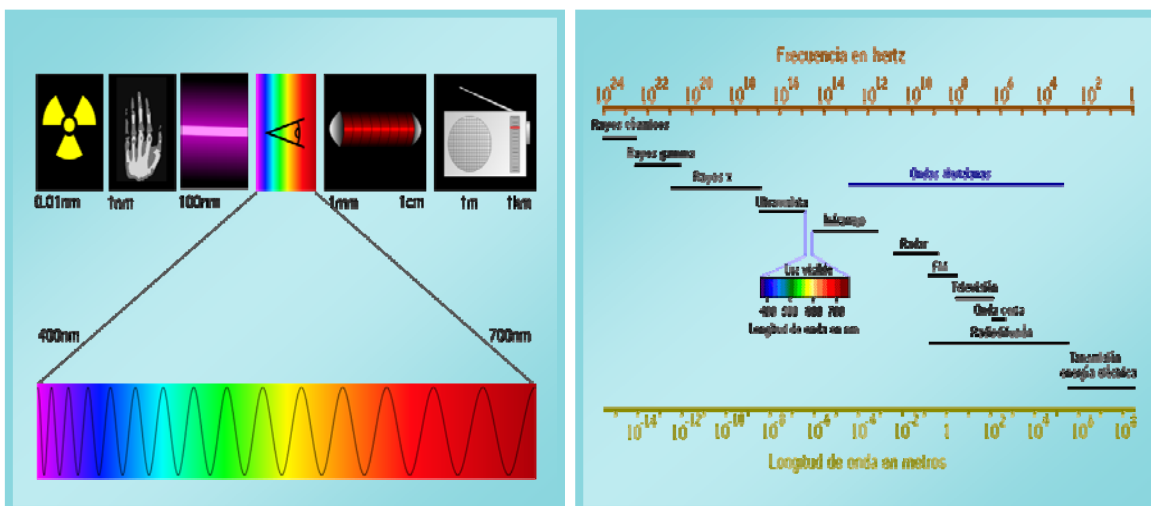
Hay un espectro muy ancho de energía electromagnética radiante, pero la luz, se encuentra en una banda muy estrecha. La energía radiante, viaja a una velocidad de  $3 \times 10^8$  m/s en el aire o en el vacío. En un extremo del **espectro electromagnético** están los rayos cósmicos, y en el extremo opuesto están las ondas de energía eléctrica. Los tipos individuales de energía radiante son identificados por sus rangos de frecuencias, o número de ciclos de onda por segundo. La longitud promedio de una onda de energía radiante de ciclos cortos (rayos cósmicos) es  $1 \times 10^{-5}$  nanómetros (nanómetro = nm =  $1 \times 10^{-9}$ ). En el otro extremo del espectro conocido, las ondas de energía eléctrica, tienen un promedio de longitud de onda de casi  $5 \times 10^6$  metros. El espectro de energía radiante ondulatoria que llamamos luz es muy estrecho, se encuentra aproximadamente entre los 380 nm y los 760 nm. Longitudes de onda más cortas o más largas que éstas, no estimulan los fotorreceptores en el ojo. Más allá de este rango está la oscuridad, ya que aún cuando el ojo puede exponerse a muchas otras longitudes de onda de energía radiante, éstas no son capaces de provocar en el ojo respuesta ni estímulo alguno.

La tabla siguiente muestra el espectro electromagnético, con sus longitudes de onda, frecuencias y energías de fotón:

Tipo	Longitud de onda (m)	Frecuencia (Hz)	Energía (J)
<u>Rayos gamma</u>	< 10 pm	>30.0 EHz	>19.9E-15 J
<u>Rayos X</u>	< 10 nm	>30.0 PHz	>19.9E-18 J
<u>Ultravioleta Extremo</u>	< 200 nm	>1.5 PHz	>993E-21 J
<u>Ultravioleta Cercano</u>	< 380 nm	>789 THz	>523E-21 J
<u>Luz Visible</u>	< 780 nm	>384 THz	>255E-21 J
<u>Infrarrojo Cercano</u>	< 2.5 um	>120 THz	>79.5E-21 J
<u>Infrarrojo Medio</u>	< 50 um	>6.00 THz	>3.98E-21 J
<u>Infrarrojo Lejano/submilimétrico</u>	< 1 mm	>300 GHz	>199E-24 J
<u>Microondas</u>	< 30 cm	>1.0 GHz	>1.99e-24 J
<u>Ultra Alta Frecuencia Radio</u>	<1 m	>300 MHz	>1.99e-25 J
<u>Muy Alta Frecuencia Radio</u>	<10 m	>30 MHz	>2.05e-26 J
<u>Onda corta Radio</u>	<180 m	>1.7 MHz	>1.13e-27 J
<u>Onda Media (AM) Radio</u>	<650 m	>650 kHz	>4.31e-28 J
<u>Onda Larga Radio</u>	<10 km	>30 kHz	>1.98e-29 J
<u>Muy Baja Frecuencia Radio</u>	>10 km	<30 kHz	<1.99e-29 J

### La luz

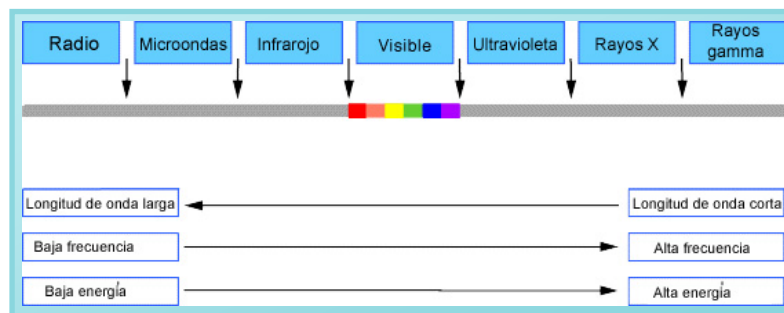
La luz, que llega a nuestros ojos y nos permite ver, es un pequeño conjunto de radiaciones electromagnéticas de longitudes de onda comprendidas entre los 380 nm y los 770 nm.



## El espectro electromagnético

De la amplia gama de fenómenos que exhiben características ondulatorias (desde los rayos cósmicos hasta la corriente alterna), la luz es esa porción del espectro electromagnético que el sistema visual puede percibir (vea la figura de la izquierda). Este modelo es muy útil para explicar ciertos aspectos de la luz como el **color**, la **interferencia**, y la **difracción**.

La teoría electromagnética, proporciona una mejor explicación de las características de la energía radiante, cuya representación gráfica es llamada **espectro**. Las diferentes formas de energía radiante, se ubican a lo largo de un espectro continuo desde los rayos cósmicos hasta la electricidad.

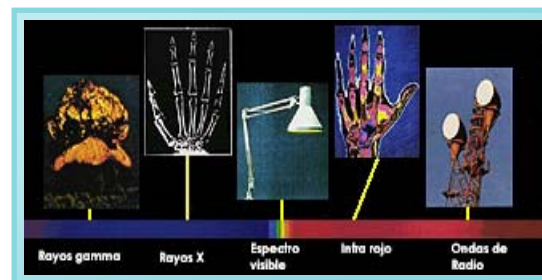


El espectro electromagnético

El espectro electromagnético, o energía radiante, va de los  $10^{-5}$  nanómetros (nm) para los rayos cósmicos hasta los  $10^{15}$  m para la corriente eléctrica de 60 Hz.

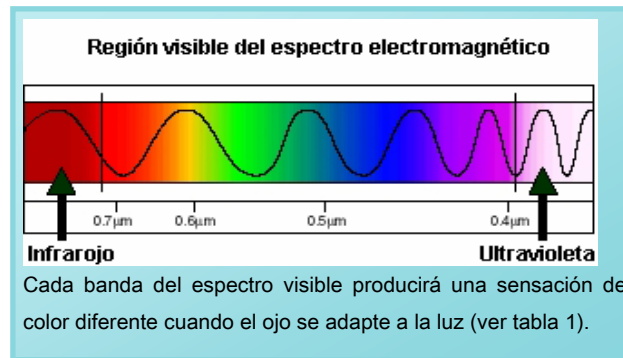
La línea divisoria entre dos formas de energía radiante no es tan definida como lo indica la figura, sino que existe una transición gradual de uno a otro. Debido a la relación recíproca entre la longitud de onda y la frecuencia ( $\lambda = c/f$ ). La energía radiante puede expresarse a lo largo del espectro continuo de acuerdo con su longitud de onda o su frecuencia.

Usualmente, la longitud de onda se ha usado para describir a todas las formas de energía radiante a la izquierda de la línea divisoria entre el infrarrojo y el radio. La energía radiante a la derecha de esta línea divisoria se describe en términos de su frecuencia.



## El espectro visible

En la iluminación, nos preocupamos por una porción pequeña del espectro electromagnético llamada **espectro visible**. El espectro visible deriva su nombre del hecho de que cualquier energía que se produce en esta banda estrecha producirá la sensación de visión cuando estimula el ojo humano normal. El espectro visible tiene el rango de longitud de onda que va del **violeta (380 nm)** al **rojo (760 nm)**.



El color púrpura existe en el espectro; sin embargo, ocurre debido a la interacción de uno de los tipos de fotorreceptores, el cono azul, con el color rojo. Es decir, el púrpura es un artificio del sistema visual y no un color espectral puro.

El fenómeno de percepción del color involucra la interacción de la **energía radiante**, la **energía visible** y el **sistema visual humano**, siendo este un concepto muy importante. Si un sistema visual humano "normal", es estimulado con energía radiante de una sola longitud de onda (500 nm) al adaptarse el sujeto, percibirá luz verde. Si la longitud de onda se cambiara a 585 nm, se percibiría que la luz es amarilla. Por consiguiente, la composición de la longitud de onda de la luz es importante para la sensación de la percepción del color.

Color	Longitud de onda (nm)
Rojo	760-630
Anaranjado	630-590
Amarillo	590-560
Verde	560-490
Azul	490-440
Índigo	440-420
Violeta	420-380
Púrpura	No es un color puro del espectro

Tabla 1. Colores y su longitud de onda

## 2.1 Propiedades de la luz

### Introducción histórica.

El estudio de la visión comienza cuando el hombre trata de explicar el fenómeno de la visión considerándolo como una facultad anímica que le permite relacionarse con el mundo exterior.

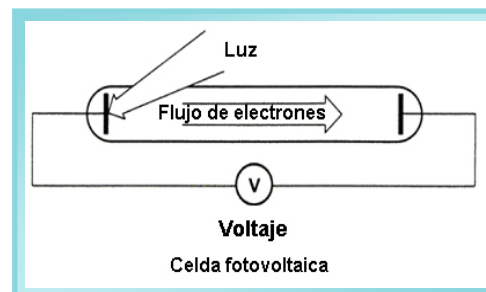
Para las civilizaciones antiguas la percepción visual requería un "algo" que enlazara nuestro espíritu con el objeto visto, y así la escuela atomista sostenía que la visión se producía porque los objetos emiten "imágenes" que desprendiéndose de ellos, venían a nuestra alma a través de los ojos. La escuela pitagórica sostenía, por el contrario, que la visión se producía por medio de un "fuego invisible" que saliendo de los ojos, a modo de tentáculo, iba a tocar y explorar los objetos. Hasta trece siglos después, con el árabe Alhazen (965-1039 d.C.), no hay indicios del menor progreso. Alhazen sienta la idea de que la luz procede de los objetos o que va del Sol a los objetos y de éstos a los ojos.

Hoy en día las propiedades físicas de la luz, en las que se basa el sistema visual para recoger información sobre el mundo que nos rodea, son mejor conocidas.

La luz es un fenómeno muy peculiar al grado que se requiere de dos teorías para explicarla adecuadamente, la **teoría ondulatoria** y la **teoría cuántica**.

### Teoría ondulatoria

El entusiasmo de científicos por la teoría ondulatoria de la luz, fue desalentado temporalmente por el descubrimiento del efecto fotoeléctrico hacia el fin del siglo XIX. Aquí, se muestra en un esquema simplificado una celda fotovoltaica, aparato típico empleado para investigar este efecto.



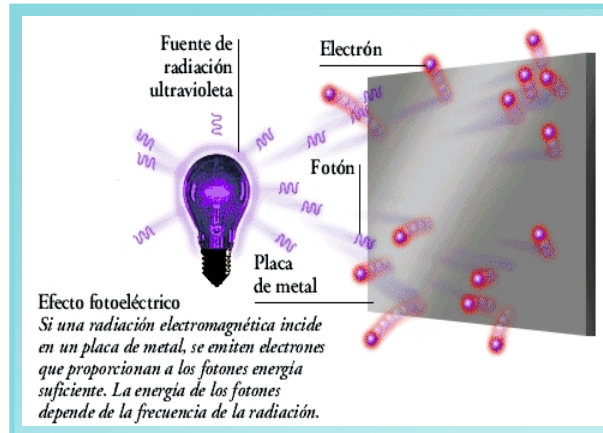
Cuando la luz golpea las placas de metal, se induce el flujo de electrones hacia el otro electrodo, a pesar del voltaje aplicado. Cuando ese voltaje aumenta, alcanza un nivel en el cual se suspende el flujo de electrones (generalmente a bajo voltaje).

Pero, ¿Por qué dudaron los científicos de la teoría ondulatoria de la luz, debido a la observación de este fenómeno? Después de todo las ondas pueden llevar energía, tal vez la suficiente como para provocar el flujo de electrones.



El problema reside en el factor tiempo. Cálculos basados en la teoría ondulatoria indican que aproximadamente tardaría un año en promedio, para que un electrón de la placa de metal recibiera la energía suficiente para desplazarse al otro electrodo.

Los experimentos indican, sin embargo, que ese flujo de electrones empieza inmediatamente en forma de luz, al chocar los electrones con las placas metálicas.



### Teoría cuántica

En 1905, Albert Einstein, demostró cómo una idea propuesta recientemente por Max Planck, podría usarse para explicar el efecto fotoeléctrico. De la teoría de Planck, el concepto del movimiento de la luz como un flujo de paquetes de energía conocidos como **cuantos** o **quantums**.

Para cualquier frecuencia de luz,  $\omega$ , todos estos quantums tienen la misma cantidad de energía expresada por:

$$E = h\nu$$

Dónde **h** es conocida como **constante de Planck** y tiene el valor de  $6.6256 \times 10^{-27}$  erg/seg. Aunque la teoría cuántica resolvió el misterio fotovoltaico, muchos físicos permanecieron escépticos de que la luz pudiera propagarse como un haz de paquetes de energía en lugar de una onda.

### Teoría de la dualidad onda - partícula

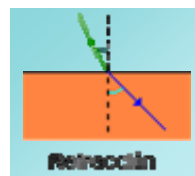
En 1924 De Broglie fue reconocido con el premio Nóbel por su hipótesis que combinó la teoría ondulatoria y la teoría cuántica. Dependiendo de la longitud de onda puede ser dominante el aspecto de onda o el de la partícula. Por ejemplo, las ondas de radio son estrictamente ondulatorias, mientras que los rayos cósmicos se comportan como partículas. Con la luz, algunas de sus características se describen mejor con la teoría ondulatoria, mientras que otras requieren ser analizadas desde el punto de vista de la teoría cuántica. Por lo tanto, se dice que la luz exhibe la dualidad **onda - partícula**.



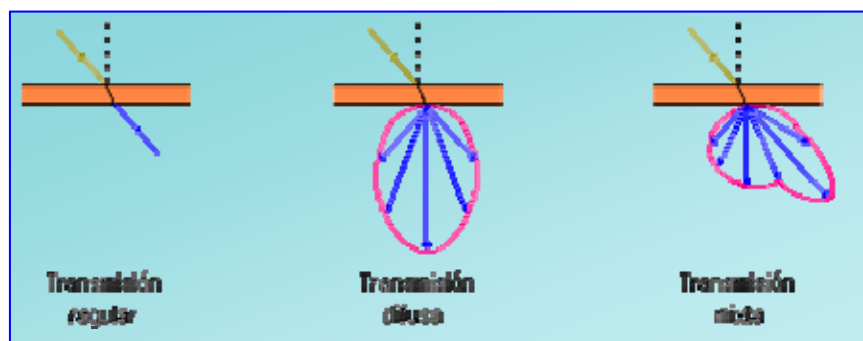
determinada por el tipo de superficie. Si es una superficie brillante o pulida se produce la reflexión regular en que toda la luz sale en una única dirección. Si la superficie es mate y la luz sale desperdigada en todas direcciones se llama reflexión difusa. Y, por último, está el caso intermedio, reflexión mixta, en que predomina una dirección sobre las demás. Esto se da en superficies metálicas sin pulir, barnices, papel brillante, etc.



**La refracción** se produce cuando un rayo de luz es desviado de su trayectoria al atravesar una superficie de separación entre medios diferentes según la ley de la refracción. Esto se debe a que la velocidad de propagación de la luz en cada uno de ellos es diferente.



**La transmisión** se puede considerar una doble refracción. Si pensamos en un cristal; la luz sufre una primera refracción al pasar del aire al vidrio, sigue su camino y vuelve a refractarse al pasar de nuevo al aire. Si después de este proceso el rayo de luz no es desviado de su trayectoria se dice que la transmisión es regular como pasa en los vidrios transparentes. Si se difunde en todas direcciones tenemos la transmisión difusa que es lo que pasa en los vidrios translúcidos. Y si predomina una dirección sobre las demás tenemos la mixta como ocurre en los vidrios orgánicos o en los cristales de superficie labrada.



La **absorción** es un proceso muy ligado al color. El ojo humano sólo es sensible a las radiaciones pertenecientes a un pequeño intervalo del espectro electromagnético. Son los colores que mezclados forman la luz blanca. Su distribución espectral aproximada es:

Tipo de radiación	Longitudes de onda (nm)
Violeta	380-436
Azul	436-495
Verde	495-566
Amarillo	566-589
Naranja	589-627
Rojo	627-770

### Luz blanca

Cuando la luz blanca choca con un objeto una parte de los colores que la componen son absorbidos por la superficie y el resto son reflejados. Las componentes reflejadas son las que determinan el color que percibimos. Si las refleja todas es blanco y si las absorbe todas es negro. Un objeto es rojo porque refleja la luz roja y absorbe las demás componentes de la luz blanca. Si iluminamos el mismo objeto con luz azul lo veremos negro porque el cuerpo absorbe esta componente y no refleja ninguna. Queda claro, entonces, que el color con que percibimos un objeto depende del tipo de luz que le enviamos y de los colores que este sea capaz de reflejar.

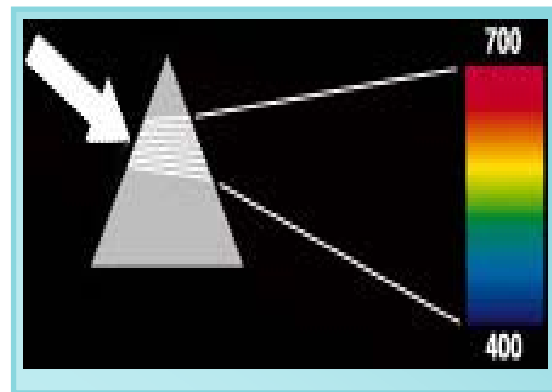
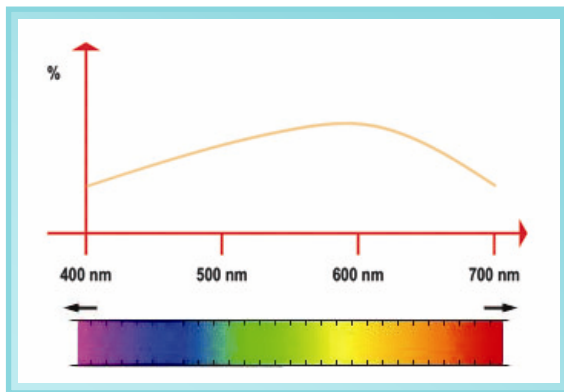
Hay diversos tipos de luz blanca. Sin proceder a clasificarlos rigurosamente se pueden agrupar en **cálidas** (como la luz de las lámparas con filamento de tungsteno), **frías** (como la de las lámparas de mercurio) y **normal** (como la luz del sol al medio día, en las grandes alturas). La luz blanca aquí analizada es la del sol.

Un **espectroscopio** muestra, la sucesión de los colores del arco iris, desde el violeta hasta el rojo. Nótese que el amarillo aparece al ojo humano como el color más luminoso y deslumbrante, mientras que el rojo y el violeta (los colores extremos del espectro) surgen bastante más débiles y, aun siendo luminosos, no deslumbran.

Estos últimos colores tienen más o menos la misma intensidad, aunque sea difícil percibir a simple vista la diferencia entre ellos.

Estas observaciones se pueden entender mejor si se traza, aunque solo sea de manera aproximada, el gráfico de los distintos colores en el espectro. En la línea vertical (eje de las ordenadas) se coloca el porcentaje de intensidad de cada uno de los colores presentes en la luz solar. En la horizontal (eje de las abscisas) va la escala de longitudes de onda visibles.

Estas van de los **400 nm** a los **700 nm**, que corresponden, respectivamente al violeta y al rojo. El gráfico de la figura es una curva que alcanza su máximo en el punto correspondiente al amarillo.



Por ello la luz del Sol denominada **normal**, contiene equilibradamente, todos los colores del arco iris. Ya la luz de una lámpara con filamento de tungsteno contiene más rojo que amarillo y violeta, y la luz de una lámpara de vapor de mercurio contiene más violeta que amarillo y rojo.

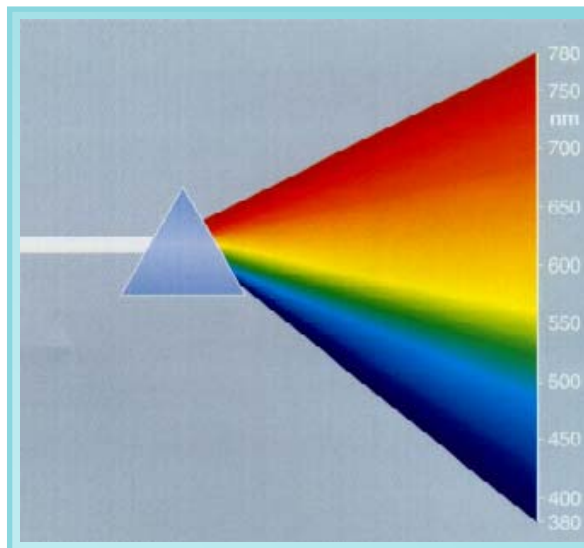
La primera, más rica en rojo que la luz del Sol, se denomina habitualmente de color **cálido**. A su vez, la luz rica en tonos violáceos recibe el nombre de **fría**.

Este análisis de la luz blanca (obtenido al apuntar el espectroscopio directamente hacia la fuente luminosa, el Sol) habría dado iguales resultados con el instrumento enfocado hacia una hoja de papel blanco, iluminada por la misma luz. Esto significa que cuando un objeto es blanco (como la hoja de papel citada), difunde todos los colores que recibe. La luz solar que le llega contiene todos los colores del arcoíris, y cuando la difunde, la hoja blanca continúa manteniéndolos, aunque uniformemente atenuados.

## 2.3 Medición de la luz

### Intensidad lumínica

Para poder definir más claramente la intensidad luminosa vamos a especificar una fuente patrón o manantial patrón. Un manantial patrón es cualquier cuerpo que radia energía, ahora bien, no toda la energía que radia es considerada energía luminosa (aquella que percibimos con el sentido de la vista) sino que parte de esa energía se transforma en calor y radiaciones no visibles, así que parte de esa energía emitida por un manantial no es energía visible. Las radiaciones luminosas provienen pues del calentamiento de un determinado material a consecuencia del cual radia energía.



Este manantial patrón es un tubo cilíndrico de material refractario (Torio), de punto de fusión muy elevado, rodeado de platino puro. El tubo se ensancha en su extremo formando un ángulo sólido de un estereorradián.

Cuando este radiador total está calentado a la temperatura de 2045°K emite una determinada cantidad de energía radiante,  $1\text{m}^2/600000$  de esta energía es nuestra medida de referencia y es lo que llamamos candela (cd).

La **intensidad luminosa (I)**, característica fundamental de la fuente de radiación, viene dada por el flujo luminoso F emitido por unidad de ángulo sólido W en una dirección especificada o, lo que es lo mismo, la potencia luminosa propia de la fuente que se expresa en vatios.

$$I = \frac{F}{W}$$

Como el flujo luminoso se mide en lúmenes, la unidad de intensidad luminosa será el lumen por estereorradián, dicha unidad se llama candela (cd).

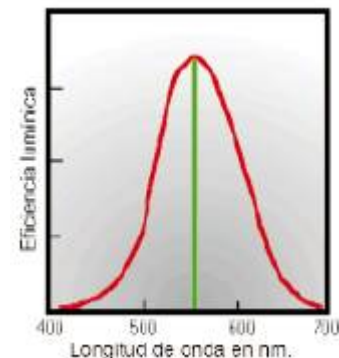
Sin embargo, no resulta fácil medir la potencia que corresponde exclusivamente a la región visible, ya que la mayoría de las fuentes emiten en una zona más amplia del espectro electromagnético.

Para medir la intensidad de una fuente, es necesario definir una unidad que debe ser constante e invariable en relación a una superficie determinada.

El Sistema Internacional de Unidades (SI) incorporó a la CANDELA como unidad de medida de intensidad luminosa de una fuente.

La **candela (cd)** se define como la intensidad luminosa en una determinada dirección, de una fuente emisora de radiación monocromática de frecuencia  $540 \times 10^{12}$  Hz, equivalente a 555 nm en el vacío, y que posee una intensidad de radiación en esa dirección de 1/683 vatios por estereorradián.

La 'frecuencia escogida' es aquella a la que el ojo es más sensible y normalmente es cuantificada en la Literatura Lumínica como la correspondiente a una longitud de onda de 555 nanómetros. La longitud de onda varía según el medio a través del cual pasa la luz, así que, para precisar esto, nuestra común descripción de longitud de onda luminosa no es la usada de modo estándar



La extraña elección del factor 683 es a fin de que el valor sea idéntico al obtenido con la previa versión de la unidad: la emisión de  $1\text{cm}^2$  de brillo de platino solidificado.

El **estereorradián (sr)** es el cono de luz difundido desde la fuente que ilumina  $1\text{m}^2$  de la superficie oscura de una esfera de un metro de radio alrededor de la fuente. (O sea, 1 estereorradián cubre  $1\text{m}^2$  de la superficie de una esfera de 1m de diámetro.)

El aparente brillo de una fuente cuando se mira directamente no se debe confundir con su emisión lumínica. El brillo de una fuente es medido en candela por metro cuadrado ( $\text{cd}/\text{m}^2$ ) y a su magnitud se la llama luminancia.

La **luminancia (L)** es la magnitud luminotécnica que determina la impresión de mayor o menor claridad producida por una superficie. La luminancia es un concepto propio del brillo de un objeto, bien con relación a la luz de producción propia, bien reflejada (fuente que emite luz, fuente de luz sólo reflejada o fuente de luz de ambas emisiones). Se define como la sensación luminosa, que por efecto de la luz, se produce en la retina del ojo. Es la densidad superficial de la intensidad luminosa y se expresa como la relación entre la intensidad luminosa y la superficie desde la cual se emite:

$$L = \frac{I}{S}$$

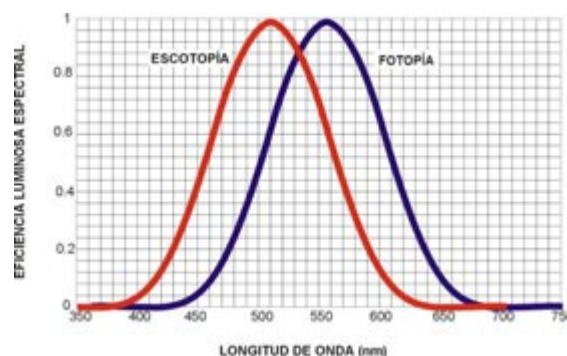
### Curva V-LAMBDA

La medida de la intensidad luminosa requiere información sobre la sensibilidad relativa del ojo humano para diferentes longitudes de onda.

El ojo posee dos sensibilidades diferentes según el tipo de iluminación. La visión fotópica para iluminaciones normales o fuertes y la escotópica para iluminaciones bajas. Debido a este hecho para iguales cantidades de flujo luminoso de distintas longitudes de onda no se produce la misma sensación de brillo, así por ejemplo, para igual flujo radiante se obtiene una mayor sensación de brillo para el amarillo-verde que en los extremos del rojo-violeta.

La intensidad luminosa de una fuente de luz blanca está definida por el producto de los vatios emitidos para cada longitud de onda por el rendimiento de esa longitud de onda excitando el ojo, relativo el rendimiento a 555nm. Este factor de rendimiento se conoce como curva V-lambda.

La curva define la relación entre la sensación de luz humana y el concepto físico de luz, que es la cantidad a la cual los instrumentos de medida reaccionan.





Los vatios emitidos por una fuente de luz pueden ser medidos por absorción de toda la luz en una superficie negra ideal y midiendo el calor producido. Un filtro correspondiente a la curva V-lambda puede ser colocado delante de la superficie negra para transformar el resultado para que el ojo y cerebro humano estimen la luminosidad. Los instrumentos de medida tienen sensores de filtrado que transforman la luz absorbida por la V-lambda a corriente eléctrica.

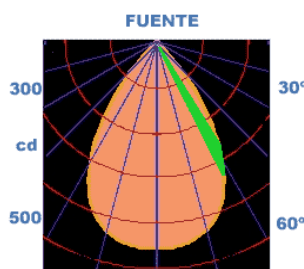
### El lumen y el lux

El **flujo luminoso (f)** es la potencia (energía por unidad de tiempo) de la energía luminosa medida en relación con su efecto visual (equivale a una candela x estereorradián). Es decir, indica la cantidad de luz emitida por unidad de tiempo en una determinada dirección (distribución espacial de la luz emitida por la fuente). Su unidad es el lumen (lm). 683 lúmenes equivalen a un vatio, emitidos a la longitud de onda de 555 nm, que corresponde a la máxima sensibilidad del ojo humano

La definición de lumen, la unidad de flujo luminoso, es:

**“El flujo luminoso (dF) de una fuente de Intensidad luminosa I (cd) en ángulo con un elemento sólido está dado por  $dF=IdR$ ”**

Esto significa que el flujo de una fuente de luz es igual a su intensidad en candela multiplicado por el ángulo sólido sobre el cuál la luz es emitida, teniendo en cuenta la variación de intensidad que produce en diferentes direcciones.



En la imagen observamos como un punto de luz del rayo de color verde emite una intensidad luminosa de 300 cd para un ángulo de 30°.

Ya hemos visto el concepto de ángulo sólido; si consideramos una fuente que emite una determinada energía radiante y que supuestamente lo haga en todas direcciones podemos considerar ésta como una esfera. El ángulo sólido determinará un cono que abarca la superficie o área (s) determinada, con relación al radio unidad.

En estas condiciones, la medida en estereorradianes del ángulo sólido  $W$  viene definido por la siguiente razón:

$$W = \frac{S}{r^2}$$

Como el área de una esfera es  $4\pi r^2$  al sustituir nos quedará:

$$W(\text{máximo}) = \frac{4\pi^2}{r^2} \text{ estereorradianes}$$

Cuando  $S = r^2$  el ángulo sólido será de un estereorradián. Según esto podemos definir el lumen de la siguiente forma:

“Es el flujo luminoso que atraviesa en un segundo un ángulo sólido de un estereorradián, emitido por una fuente puntual cuya intensidad es de una candela.”

$$F = 4\pi I \Rightarrow F = W$$

Una magnitud derivada del flujo luminoso es el rendimiento. Ya mencionamos al hablar de intensidad luminosa que no toda la energía eléctrica consumida por una lámpara (bombilla, fluorescente, etc.) se transforma en luz visible. Parte se pierde por calor, parte se pierde por radiación no visible (infrarrojo o ultravioleta) etc.

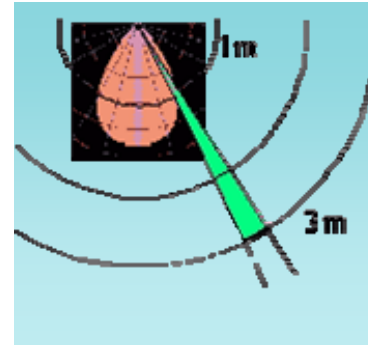
Definimos el **rendimiento luminoso (h)** como el cociente entre el flujo luminoso producido y la potencia eléctrica consumida, que viene con las características de las lámparas (25 W, 60 W...). Mientras mayor sea mejor será la lámpara y menos gastará. La unidad es el lumen por vatio (lm/W).

$$h = \frac{\Phi}{W}$$

El lumen formalmente deriva de la candela, basada en una luz de longitud de onda simple. Una lámpara de varias longitudes de onda tiene una salida de lúmenes calculada desde los vatios emitidos como radiación multiplicados por la eficiencia luminosa en cada longitud de onda, como se describió en el caso de la candela.

El diseñador necesita traducir los valores de cd en Energía Lumínica que alcanza a un objeto a determinada distancia de la lámpara. Es ésta energía lo que hace visible al objeto y empalidece sus matices de color. La densidad energética que alcanza al objeto está expresada en lúmenes por metro cuadrado ( $\text{Lm}/\text{m}^2$ ), lo que se conoce como lux.

Este valor puede ser calculado fácilmente desde el diagrama por un punto de origen. El valor candela (300cd) dado para 60° corresponde a 300 lúmenes fluyendo en el cono de un estereorradián (sr), que por definición cubre 1m<sup>2</sup> de la superficie de una esfera de 1m de diámetro.



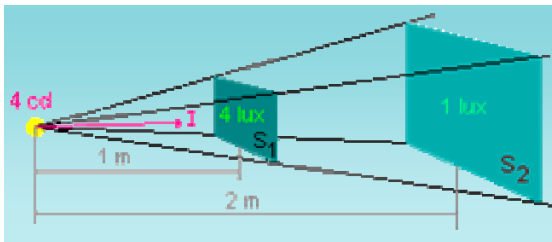
Si nuestro objeto estuviera a esa distancia, estaría recibiendo 300 lm/m<sup>2</sup>.

Para deducir el valor de cualquier otra distancia, sólo se debe usar la misma regla en forma inversa. A 3 m de la lámpara, el flujo sobre 1m<sup>2</sup> decae a 1/9 de los 300lm. Así que el valor lux es de 33.

La **iluminancia (E)** es el flujo luminoso que incide sobre una superficie, dividido por el tamaño de dicha superficie (S). La iluminancia es la magnitud de valoración del nivel de iluminación de una superficie o de una zona espacial.

$$E = \frac{\Phi}{S}$$

Su unidad de medida es el **Lux (Lx)**, equivalente a la iluminación que incide sobre cada m<sup>2</sup> de una superficie y sobre la cual se distribuye uniformemente un flujo luminoso de un lumen.



La iluminancia depende de la distancia del foco al objeto iluminado. Es algo similar a lo que ocurre cuando oímos alejarse a un coche; al principio se oye alto y claro, pero después va disminuyendo hasta perderse. Lo que ocurre con la iluminancia se conoce por la ley inversa

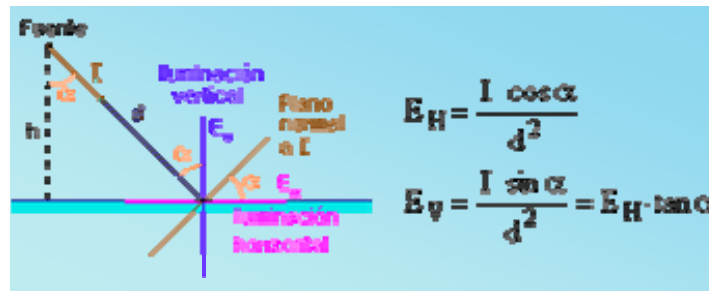
de los cuadrados que relaciona la intensidad luminosa y la distancia a la fuente. Esta ley sólo es válida si la dirección del rayo de luz incidente es perpendicular a la superficie.

Ley inversa de los cuadrados:

$$E = \frac{I}{r^2}$$



En el caso de que el rayo de luz incidente no sea perpendicular hay que descomponer la iluminancia en una componente horizontal y otra vertical a la superficie.



A la componente horizontal de la iluminancia ( $E_H$ ) se le conoce como la ley del coseno. Es fácil ver que si  $\alpha = 0$  nos queda la ley inversa de los cuadrados. Si expresamos  $E_H$  y  $E_V$  en función de la distancia del foco a la superficie ( $h$ ) nos queda:

$$E_H = \frac{I \cdot \cos^3 \alpha}{h^2}$$

$$E_V = \frac{I \cdot \cos^2 \alpha \cdot \sin \alpha}{h^2}$$

En general, si un punto está iluminado por más de una lámpara su iluminancia total es la suma de las iluminancias recibidas:

$$E_H = \sum_{i=1}^n \frac{I_i \cdot \cos^3 \alpha_i}{h_i^2}$$

$$E_V = \sum_{i=1}^n \frac{I_i \cdot \cos^2 \alpha_i \cdot \sin \alpha_i}{h_i^2}$$

Tabla de unidades y conversión.

Medida	Unidades	Símbolo	Conversión
Intensidad luminosa	Candela	cd	cd = lm/sr
Flujo luminoso	Lumen	lm	lm = cd/sr
Iluminancia	Lumen por pie cuadrado	Lm/ft <sup>2</sup>	1lm/ft <sup>2</sup> = 10.79lm/m <sup>2</sup>
	Pie candela = lm/ft <sup>2</sup>	fc o ft cd	1fc = 10.76lx
	Phot = lm/cm <sup>2</sup>	Phot	1Phot = 10 <sup>-4</sup> lx = 0.929fc
	Nox = millilux	Nox	1Nox = 10 <sup>-3</sup> lx
	m-candle = lux	m-cd	1m-cd = 1lm/m <sup>2</sup> = 1lx

## Fuentes luminosas

El sol y las lámparas eléctricas, son considerados como fuentes luminosas, porque transforman la energía en longitudes de onda de energía radiante a las que llamamos luz. Pero estas fuentes de iluminación también emiten otros tipos de energía útil con longitudes de onda más cortas o más largas que las ondas de iluminación. La energía ultravioleta, por ejemplo, es valiosa para matar gérmenes, para los bronceados, y por sus propiedades fotoquímicas, tiene longitudes de onda más cortas que las de la luz. Las ondas de energía infrarroja, son las ondas más largas de la luz. Esta energía radiante, cuando es absorbida, puede transformarse en calor.

## El color espectral

Una fuente luminosa que emite energía radiante equilibrada entre las longitudes de onda visibles, parecerá blanca al ojo. De igual forma, si hacemos pasar un haz de luz blanca a través de un prisma de material transparente, este se descompondrá en las diferentes longitudes de onda de la energía visible que el ojo puede distinguir. El fenómeno visual resultante se llama **color espectral**.



Un “ojo normal” verá tres bandas anchas de color mezclado (violeta, verde, y rojo), con varias bandas estrechas (azul, amarillo, y naranja), mezcladas entre bandas más anchas. Al sufrir un **deslumbramiento**, el ojo verá sólo graduaciones de gris, o quizás algunos de estos colores y algunos grises, dependiendo de la magnitud del deterioro fisiológico del ojo.

Es sumamente importante saber que las longitudes de onda más largas de 610 nm, producen el efecto de color que llamamos rojo, aquéllas entre los 440 nm y los 500 nm producen los azules, y así sucesivamente, para controlar apariencia así como los efectos de las fuentes luminosas que dan el aspecto de los colores a los objetos a nuestro alrededor.

### 2.4 La naturaleza del color

**Color**, es un término que describe un desequilibrio de energía radiante visible que alcanza al ojo desde las fuentes luminosas y los objetos; desequilibrio que se define en absoluto como cualquier desviación de la cantidad promedio de energía de las longitudes de onda. Tales desviaciones, o combinaciones de desequilibrios, son casi incalculables en número, ya que son muchos los colores o nombres que podemos dar para describir las distintas **mezclas** o **combinaciones** de la energía electromagnética visible.

## ¿Qué es el color?

Una fuente de iluminación de color, radia mucho más energía de algunas longitudes de onda que de otras, y un objeto de color refleja o transmite algunas longitudes de onda más prontamente que otras. En cualquier caso, hay un desequilibrio de energía, ya que algunas longitudes de onda se pierden en la mezcla que alcanza al ojo. Así, vemos que ese color tiene características cualitativas y cuantitativas. Las **características cualitativas** se refieren a la información acerca de las longitudes de onda presentes; mientras que, las **características cuantitativas** se refieren a la cantidad de energía presente para cada longitud de onda. **Las características cualitativas son una descripción cromática, y esta dada en términos de la longitud de onda dominante y de su pureza. La característica cuantitativa es una relación de la luminancia, anteriormente llamada brillo fotométrico.** La longitud de onda dominante es la longitud de onda que parece ser más abundante. Sin embargo, no necesariamente es la longitud de onda que tiene la intensidad más alta, aunque ambas longitudes de onda son normalmente las mismas para nosotros.

## El color

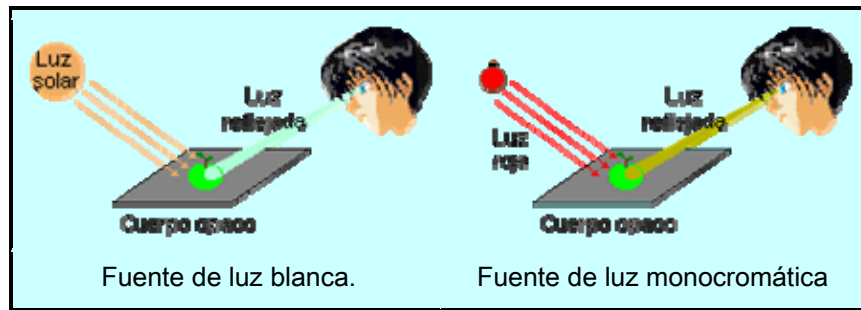
Al hablar del color hay que distinguir entre el fenómeno físico donde intervienen la luz y la visión (sensibilidad y contraste) y el fenómeno sensorial. Como fenómeno físico comentaremos, además, los sistemas de especificación y la realización de mezclas.

## El color como fenómeno físico

Recordemos brevemente que la **luz blanca** del sol está formada por la unión de los colores del arco iris, cada uno con su correspondiente longitud de onda. Los colores van del violeta (380 nm) hasta el rojo (770 nm) y su distribución espectral aproximada es:

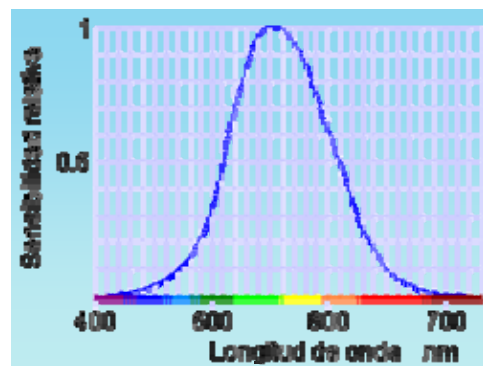
Color	Longitud de onda (nm)
Violeta	380-436
Azul	436-495
Verde	495-566
Amarillo	566-589
Naranja	589-627
Rojo	627-770

Cuando un cuerpo opaco es iluminado por luz blanca refleja un color o una mezcla de estos absorbiendo el resto. Las radiaciones luminosas reflejadas determinarán el color con que nuestros ojos verán el objeto. Si las refleja todas será blanco y si las absorbe todas negro. Si, por el contrario, usamos una fuente de luz monocromática o una de espectro discontinuo, que emita sólo en algunas longitudes de onda, los colores se verán deformados. Este efecto puede ser muy útil en decoración pero no para la iluminación general.



Efecto de la luz coloreada sobre los objetos de color.

El ojo humano no es igual de **sensible** a todas las longitudes de onda que forman la luz diurna. De hecho, tiene su máximo para un valor de 555 nm que corresponde a un tono amarillo verdoso. A medida que nos alejamos del máximo hacia los extremos del espectro (rojo y violeta) esta va disminuyendo. Es por ello que las señales de peligro y advertencia, la iluminación de emergencia o las luces antiniebla son de color amarillo.



### El color como fenómeno sensorial

El color como otras sensaciones que percibimos a través de los sentidos está sometido a criterios de análisis subjetivos. Depende de las preferencias personales, su relación con otros colores y formas dentro del campo visual (el contraste, la extensión que ocupa, la iluminación recibida, la armonía con el ambiente...), el estado de ánimo y de salud, etc.

Tradicionalmente distinguimos entre **colores fríos** y **cálidos**. Los primeros son los violetas, azules y verdes oscuros. Dan la impresión de frescor, tristeza, recogimiento y reducción del espacio. Por contra, los segundos, amarillos, naranjas, rojos y verdes claros, producen sensaciones de alegría, ambiente estimulante y acogedor y de amplitud de espacio.

Sensaciones asociadas a los colores.	
Blanco	Frialdad, higiene, neutralidad.
Amarillo	Actividad, impresión, nerviosismo.
Verde	Calma, reposo, naturaleza.
Azul	Frialdad
Negro	Inquietud, tensión.
Marrón	Calidez, relajación.
Rojo	Calidez intensa, excitación, estimulante.

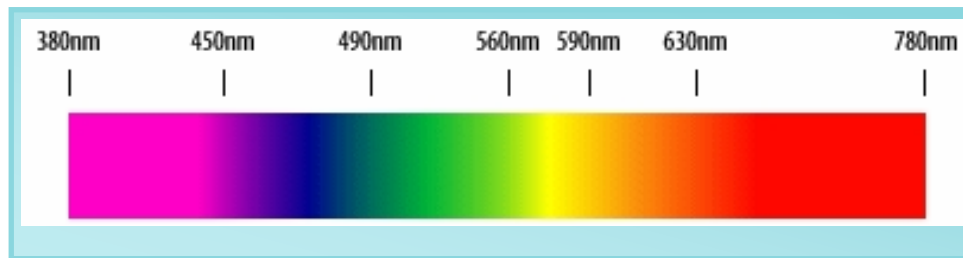
Hay que destacar también el factor cultural y climático porque en los países cálidos se prefieren tonos fríos para la decoración de interiores mientras que en los fríos pasa al revés.

### Pureza del color

Puede describirse como el porcentaje de color contra el porcentaje de blanco en cualquier color. Para demostrar que ese color es resultado de un desequilibrio de energía radiante visible; considere dos objetos teóricos que reflejan la mitad de la luz de una fuente de luz blanca, absolutamente equilibrada. Uno refleja la mitad de la energía absoluta de las longitudes de onda del espectro visible (parece gris y no produce sensación de color porque todas las longitudes de onda están presentes todavía, aunque sólo con intensidad media). El otro objeto refleja toda la energía de la mitad del espectro es decir, las longitudes de onda más cortas, de 380 nm a 570 nm, pero no energía de la otra la mitad del espectro. Este objeto producirá una fuerte impresión de color azul, pero sólo será una sensación secundaria ya que sólo la mitad de la energía de la fuente luminosa está reflejándose. Así, está claro que el color no es un resultado de cualquier cambio en el volumen de la energía radiante total, pero sí es resultado de deficiencias de energía de las longitudes de onda individuales.

Un caso extremo de desequilibrio de ondas luminosas, sería aquel en qué la situación monocromática (sólo un color), o longitud de onda de energía visible, está presente. El color percibido sería de la más pura calidad ya que ninguna otra longitud de onda de energía (color) está presente para diluir su pureza.





### El color que se observa en los objetos

Ahora está claro, que sin la luz no puede haber colores, los nombres de estos, sirven simplemente para describir las mezclas de energía electromagnética, que sólo existen en el estado transitorio de la radiación. Ya que los colores son descripciones dinámicas o en movimiento de los fenómenos, estos tampoco pueden ser propiedades físicas estacionarias de los objetos. Entonces, ¿los colores están en los objetos?

Los colores que vemos en los objetos son el resultado de ondas de energía radiante que alcanzan al ojo, después de que se han modificado de muchas maneras por cada objeto. Los objetos físicos tienen un efecto que modifica las ondas luminosas, reduciendo la cantidad de energía y los tipos de ondas que alcanzan al ojo desde la fuente luminosa. Incluso las partículas en la atmósfera de la tierra, filtran la radiación del sol antes de que alcance nuestros ojos (esta es una explicación parcial del porque los cambios en los colores del cielo y las nubes en el ocaso). Damos el nombre de un color a los objetos que conocemos, por ejemplo: decimos que los rábanos son de color rojo, los limones son de color amarillo, y al follaje de los árboles el verde. El hecho de que estos objetos parezcan tener los mismos colores bajo todas las condiciones de iluminación se llama **color constante**, ya que esos objetos reflejan de forma consistente o transmiten las ondas de luz de un rango particular de color, mientras que absorben todas las otras. El agua no tiene color constante, porque reflejará y transmitirá todas las ondas de luz; al parecer cualquier color es dominante en este ambiente.

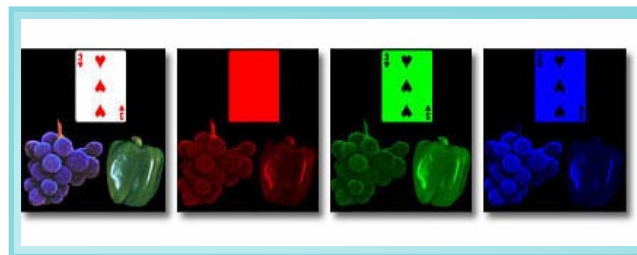
Las dos maneras fundamentales en que los objetos y los medios modifican los colores de la luz son la **transmisión** y la **reflexión**, pero los objetos y los medios normalmente son **selectivos** en cuánto a la energía, ya que sus longitudes de onda también transmitirán o reflejarán la luz. Así, la manera en que se modifica el color e intensidad de la luz transmitida dependerá de la composición molecular de los materiales a través de los cuales pasa la luz. Por ejemplo, en algunas lámparas con color, se usan capas de pigmentos y tintes que absorben selectivamente

las longitudes de onda o colores no deseados y que transmiten las longitudes de onda deseadas. En otros casos, el vidrio o el difusor se colorea para lograr el mismo efecto.



Cuando la luz actúa uniformemente de manera difusa sobre una superficie rugosa, el resultado son ondas luminosas que se reflejan en todas las direcciones, luego de haber sido modificadas por las cualidades de absorción de la superficie. Motivo por el cual la superficie parece tener un color propio, distinto al color de la fuente luminosa. Pero eso es sólo porque la superficie ha absorbido algunas longitudes de onda de la energía espectral. Por ejemplo, la arenisca es un material muy difuso con cualidades de absorción espectrales relativamente regulares. Una mano de pintura en un objeto también tiene una calidad absorbente uniformemente distribuida, de tal manera que reflejará uniformemente cualquier color, o longitud de onda de energía que no sea absorbido por la pintura.

Es importante recordar que, ya que todas las ondas luminosas se modifican de alguna manera para todos los objetos físicos, **la apariencia del color de un objeto se determinará por la mezcla de las ondas de energía luminosa que permanecen intactas hasta alcanzar nuestros ojos.** Los objetos sólo tienen un color característico debido a la manera en que reflejan, transmiten o modifican selectivamente las longitudes de onda luminosas.



La mantequilla por ejemplo, parece "amarilla" porque absorbe la luz azul y refleja un alto porcentaje de los otros colores. La combinación resultante, o la longitud de onda dominante, es la amarilla. De manera similar, la lechuga refleja principalmente la luz de longitudes de onda en el rango de entre de 500 nm a 600 nm (los verdes) y absorbe la mayoría de la energía de otras longitudes de onda. Un tomate, entonces, es rojo porque refleja la energía radiante de 610 nm a

780 nm, mientras que absorbe la mayoría de la energía de otras longitudes de onda. Pero así como es importante el color aparente de objetos, también lo es el tipo de ondas luminosas que se reflejan hacia los objetos desde las fuentes luminosas.

### Colores y mezclas

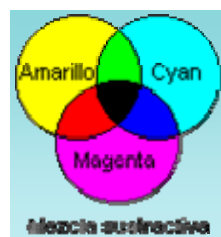
A todos aquellos que hayan pintado alguna vez les sonarán términos como colores primarios, secundarios, terciarios o cuaternarios. Los **colores primarios o básicos** son aquellos cuya combinación produce todos los demás. En pintura son el cian, el magenta y el amarillo y en iluminación el azul, el verde y el rojo. Cualquier otro color se puede obtener combinándolos en diferentes proporciones. Así los **secundarios** se obtienen con mezclas al 50%; los **terciarios** mezclando dos secundarios entre sí, etc.

Las mezclas, que en luminotecnia se consiguen mediante filtros y haces de luces, pueden ser aditivas o sustractivas.

Las **mezclas aditivas u ópticas** se obtienen sumando haces de luces de colores. El color resultante dependerá de la componente que se halle en mayor proporción y será más intenso que estas. Si la suma diera blanco se diría que son **colores complementarios**.



Las **mezclas sustractivas o pigmentarias** se consiguen aplicando a la luz blanca una serie de sucesivos filtros de colores que darán un tono de intensidad intermedia entre las componentes.



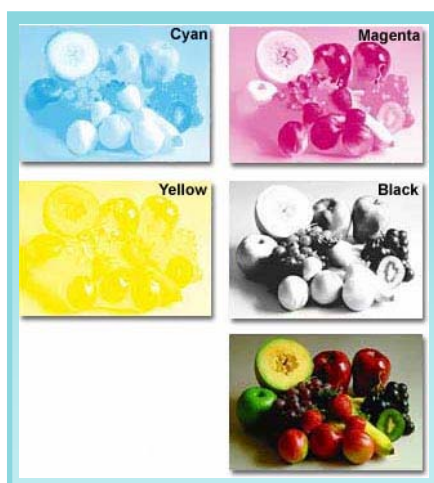
Para definir los colores se emplean diversos sistemas como el RGB o el de Munsell. En el **sistema RGB** (Red, Green, Blue), usado en informática, un color está definido por la proporción de los tres colores básicos - rojo, verde y azul - empleados en la mezcla. En el **sistema de**

**Munsell** se recurre a tres parámetros: tono o matiz (rojo, amarillo, verde...), valor o intensidad (luminosidad de un color comparada con una escala de grises; por ejemplo el amarillo es más brillante que el negro) y cromaticidad o saturación (cantidad de blanco que tiene un color; si no tiene nada se dice que está saturado).

### Colores en las fuentes luminosas

Las fuentes luminosas con color emiten energía de longitudes de onda en una banda selectiva, las fuentes luminosas generalmente emiten energía en longitudes de onda visibles. Pero algunas fuentes luminosas, carecen de la energía de varias longitudes de onda de tal forma que emiten lo que se conoce como **luz blanca**. Esta deficiencia afecta la percepción de los colores de los objetos (conocido como **rendimiento del color**) y provoca diferencias en su color, volviendo un poco grises algunos colores, mientras que aumenta la intensidad relativa de otros.

Hay fuentes luminosas **cálidas** como las incandescentes y algunas lámparas fluorescentes. Éstas producen luz blanca, la cual, tiende a aproximarse hacia las longitudes de onda del rojo, naranja, o amarillo. Correspondientemente, hay fuentes luminosas de colores **fríos**, como las lámparas de mercurio y otras fuentes fluorescentes, las cuales producen luz blanca cargada hacia las longitudes de onda del azul y el verde. Al iluminar alternadamente una superficie con lámparas cálidas y frías, se producirá un claro cambio en el color percibido sobre esa superficie a pesar del hecho de que en ambos casos se emplean fuentes luminosas de **luz blanca**. Este efecto es aun más pronunciado si los cambios son rápidos, y el observador no tiene tiempo para adaptarse a la diferencia de la luz.



Algunas fuentes luminosas, son hechas intencionadamente con sólo un color predominante, para lograr un efecto deseado específicamente. Por ejemplo, si una pared que parece blanca al ser iluminada con una luz blanca, se ilumina con una fuente predominantemente roja, la pared parecerá roja, ya que sólo las longitudes de onda de energía visible roja están presentes para ser reflejadas desde la pared hacia el ojo del observador.

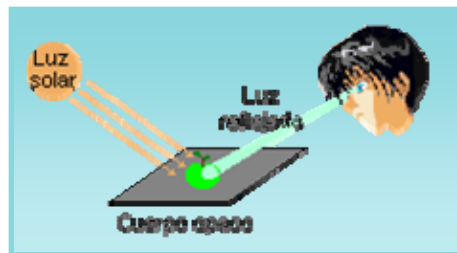
Si la misma pared blanca se ilumina con luz verde, la pared parecerá verde. Si se ilumina una superficie blanca con un color "rojo", la fuente luminosa hará parecer roja esa superficie (porque se reflejan sólo las longitudes de onda de luz roja hacia el ojo del observador), todas las otras longitudes de

onda se absorben. Por otro lado, si un tomate es iluminado con una luz verde, éste parecerá más oscuro y básicamente descolorido (gris parduzco) porque hay poca energía roja en la luz verde reflejada. El punto importante es que sin tomar en cuenta las características del acabado de una superficie, el ojo no puede ver ningún color si la fuente luminosa no lo contiene.

### Psicología de color

Hasta este punto hemos tratado al color en el lenguaje del Ingeniero o del Físico. La definición para color era: "Color, es un término que describe un desequilibrio de energía radiante visible que alcanza el ojo desde las fuentes luminosas y los objetos". Pero considerando esta definición, "Color, es un concepto", tendríamos que, "Color, es la interpretación humana de los impulsos nerviosos transmitidas del ojo al cerebro cuando es estimulado por varios desequilibrios de la energía radiante visible". Esta última definición no es más verdadera que la anterior (simplemente es más completa) porque abarca las tres ciencias involucradas: la física, la fisiología, y la psicología. De esta manera tenemos que:

"el color es un concepto, resultado de la interacción de la fuente luminosa, los objetos, el ojo, y el cerebro".



### Percepción del color

El proceso y los mecanismos por que el cerebro **percibe** el color, o cualquier otro concepto, no se definen todavía totalmente, pero la ciencia y la tecnología están avanzando continuamente hacia ese extremo. Quizás algún día entenderemos cómo es que pensamos los colores, por el momento nos ocuparemos por lo ya establecido en el contexto del campo de la luz y el color.

La definición de color como concepto, es precisa, si consideramos que ese color no existe independiente de la **visión a color normal**. Como ya se mencionó, una persona totalmente ciega no puede distinguir entre las distintas longitudes de onda de la luz, sino que sólo puede distinguir entre cantidades de luz, para él no hay color, todo es negro, blanco o sombras grises.

Más importante aun, es tener claro el hecho de que las ondas luminosas recibidas por una persona ciega o por una persona con visión de color normal, no cambian por la condición de los

receptores en los ojos. Sólo cambia el concepto, la interpretación o bien la percepción de lo que ve cada persona. Por consiguiente, el rojo, o cualquier otro color, es exclusivamente el concepto mental resultado de la interpretación del cerebro a estímulos visuales específicos.

### **Asociación del color**

Ahora que hemos traído el color al reino de lo abstracto, inmediatamente se convierte en parte de lo que pensamos respecto a todo lo que nos rodea, los objetos, las situaciones, las actitudes, los humores, las condiciones medioambientales, etcétera. Asimilamos el color inconscientemente en todas nuestras impresiones o conceptos porque nuestros ojos proporcionan a nuestro cerebro, información a color que es automáticamente asociada con toda la información sobre cualquier asunto determinado o situación similar.

Quizás, más que cualquier otro elemento en el diseño, las reacciones de las personas al color afectan sus preferencias individuales. Pero, algunas reacciones al color son universales. Por ejemplo, ciertos colores son asociados con ciertos estados de ánimo. El color rojo, el naranja, y el amarillo, se aceptan generalmente como estimulantes, mientras que el azul, azul-violeta, y violeta son considerados como menos estimulantes.

Las reacciones de las personas a los colores asociados con los materiales no siempre corresponden a sus reacciones a los mismos colores asociados con la luz. Por ejemplo, el verde en el follaje se acepta generalmente como reanimante, refrescante, y tranquilizante; dentro de los materiales el fondo verde en los objetos es psicológicamente tranquilo. Pero el verde en una fuente luminosa es antinatural, y su uso, tiende a producir un efecto macabro o siniestro.

En lugares donde la apariencia de las personas es importante, hay una fuerte preferencia hacia las fuentes luminosas blancas ricas en luz roja; estas lámparas ayudan a dar una impresión saludable, roja o morena de la piel y resaltan el cutis. Hay también indicios de que las personas prefieren la luz cálida en áreas con bajos niveles de iluminación, mientras que la luz fría suele ser más aceptable para niveles de iluminación más altos. En espacios con colores más saturados, la percepción generalmente recae en que los colores cálidos parecen adelantarse, es decir, oprimen, mientras que los colores fríos retroceden y ayudan a brindar una impresión de amplitud. En un sentido más sutil, los cambios en el color de la luz parecen alterar la percepción del espacio.

## Visión a color

Como tratamos anteriormente, el proceso de ver la luz y el color es complejo ya que involucra la física, la psicología, la ingeniería, la fotometría, etcétera, ahora llegamos a la fisiología del propio ojo.

Hay muchas teorías para explicar el fenómeno de la visión a color. La más fácilmente comprensible, es la teoría de los **tres componentes** que supone tres tipos de elementos sensibles a la luz (fotorreceptores) los **conos** (cada uno receptivo a los colores primarios de la luz, rojo, azul y verde). Cada ojo tiene aproximadamente siete millones de conos. Se localizan principalmente en la porción central de la retina llamada **fovea**, y son muy sensibles al color. Las personas pueden observar detalles finos con estos conos, porque cada uno se conecta a su propia terminal nerviosa. Los músculos que controlan el ojo rodean el globo ocular hasta que la imagen del objeto de nuestro interés cae en la fovea. La visión del cono es conocida como **visión fotópica** o **visión de día**.

Otros fotorreceptores son los **bastoncillos**, también están presentes en el ojo pero no están implicados en la visión a color. Sirven para dar un panorama global del campo visual, y sólo son receptivos a la cantidad de iluminación que entra en el ojo. Varios bastoncillos se conectan a una sola terminal nerviosa, por lo que no pueden distinguir con precisión ningún detalle. Son sensibles a niveles bajos de iluminación y permiten al ojo ver por la noche o bajo condiciones de iluminación sumamente bajas. Por consiguiente, objetos que parecen tener colores brillantes a la luz del día, (cuando son vistos por los conos sensibles al color), a la luz de la luna parecen descoloridos (ya que sólo son estimulados los bastones). Esto es conocido como **visión escotópica** o **visión de noche**.

## Efecto Purkinje

El ojo no es igualmente sensible a todas las longitudes de onda. En la oscuridad, hay un cambio particularmente en el brillo aparente de los diferentes colores. Esto fue descubierto por Johannes Von Purkinje. Un día, mientras caminaba al alba por los campos, Von Purkinje observó que las flores azules parecían más brillantes que las de color rojo, mientras que a plena luz del día las flores rojas eran más luminosas que las azules. Esto se conoce ahora como **Efecto Purkinje** y es particularmente importante en el proceso de la medición de la luz.

## Deficiencias del color

Una persona totalmente ciega al color no puede distinguir entre el color y cantidad de luz porque los conos están parcial o totalmente dañados (sólo funcionan los bastones). Los ojos de esta persona sólo son sensibles a la **luminancia**, o cantidad de luz. Como resultado, las fuentes luminosas parecen más brillantes o más oscuras, y los objetos aparecen como brillantes u oscuros.

Una persona totalmente ciega al color, tiene apreciación plena del ambiente (pero en escala de grises), tal como una persona con visión de color normal tiene la apreciación de un programa de televisión que se ve en blanco y negro. El tipo más predominante de deficiencia de visión de color es conocido como anomalía de Deuter (o ceguera a los colores rojo y verde), en donde la persona ve normalmente los colores amarillo y azul, pero tiene problemas para diferenciar el rojo y el verde. Aproximadamente sólo el 5% de la población masculina tienen esta deficiencia, y sólo el 0.38% de las mujeres. Un número aun más pequeño de las personas 0.003% de varones y 0.002% de mujeres, son ciegos totalmente al color.

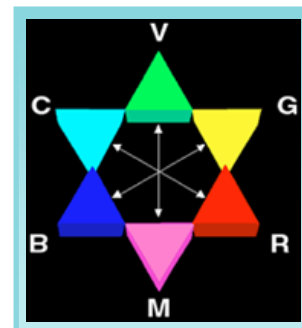
## Colorimetría

La colorimetría es la ciencia que se encarga de medir y designar los colores sistemáticamente. Es una ciencia importante, ya que exige sistemas precisos de medición del color que identifiquen, reproduzcan y regularicen los miles de colores que se emplean hoy en día (han sido establecidos muchos sistemas útiles para organizar y especificar estos colores). Antes de poder describir cualquiera de los sistemas, es esencial entender la relación que existe entre los colores primarios de la luz y los colores primarios de los pigmentos.

## Los colores primarios y los colores secundarios

Los colores primarios de la luz (**rojo**, **verde** y **azul**), pueden mezclarse para producir los colores secundarios de la luz es decir, el **magenta** (rojo más el azul), el **cian** (verde más el azul), y el **amarillo** (rojo más el verde). Por lo que se llaman colores de luz "aditivos."

Un color secundario de luz, mezclado en proporciones correctas con su primario opuesto, producirá luz blanca. Por ejemplo, una mezcla de luz amarilla y luz azul producirá luz blanca. Así, el amarillo y el azul son colores complementarios de luz, como lo son el cian y el





rojo, el magenta y el verde. Por otra parte, en pigmentos o colorantes, un color primario se define como aquel que **subtrae** o **absorbe** uno de los tres colores primarios de la luz y **refleja** o **transmite** los otros dos. Así los colores primarios en los pigmentos (a veces llamados substractivos de los primarios de la luz) son: el **magenta**, el **cian**, y el **amarillo** (es decir, los colores secundarios de la luz).

Esta naturaleza substractiva de los pigmentos se demuestra fácilmente colocando filtros de los colores magenta, cian y amarillo, sobre una fuente de luz blanca. Cada uno de los filtros absorben o substraen uno de los colores primarios de la luz. Donde se traslapan dos filtros, se transmite uno de los colores primarios. Por ejemplo, el filtro amarillo absorbe el azul (transmitiendo rojo y verde) y el filtro magenta absorbe el verde (transmitiendo rojo y azul). Juntos, los filtros sólo transmiten el rojo (en efecto, substraieron los otros dos colores primarios de la luz blanca). Cuando los tres filtros se sobreponen al centro, toda la luz es absorbida. Los colores complementarios de los pigmentos son igual que los de la luz: amarillo y azul, cian y rojo, magenta y verde.

La recepción de la televisión a color es un ejemplo la naturaleza aditiva de los colores de la luz. En la cara interior del cinescopio son aplicados aproximadamente 100,000 modelos triangulares de puntos de fósforo sensibles a los electrones, cada tríada consiste en un punto de fósforo el cual, radiará la luz azul, la luz roja, y la luz verde, respectivamente.

En ésta operación, los puntos de fósforo emiten el color rojo en todas las tríadas que son estimuladas por los pulsos de un cañón de electrones dentro del cinescopio, que genera pulsos que corresponden al color "rojo", energía vista por la cámara de TV. De igual forma son estimulados los puntos de fósforo de las tríadas azules y verdes del color azul y el verde. El efecto, visto en el caso del receptor de TV a color, es que los tres colores primarios de fósforo son "mezclados" juntos y captados por los conos sensibles al color en el ojo, y se percibe una imagen completa a color.



## El triángulo de color

Aunque los pigmentos negros y blancos no son considerados como colores reales, su adición a los pigmentos de color produce tintes, sombras, y tonos. Hay una relación triangular implicada (la adición de un pigmento negro a un color produce una sombra, al mismo tiempo que agregando un pigmento blanco, se produce un tinte). Cuando un pigmento gris (una mezcla de pigmentos negros y blancos) se agrega a un color, se produce un tono.

## El sistema del color de Ostwald

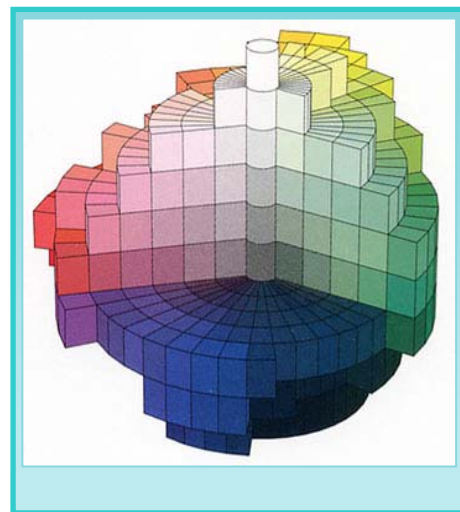


Similar en su arreglo al triángulo de color, el sistema de color de Ostwald, coloca las placas de color rotuladas en los triángulos y los describe en cuanto a su pureza, blancura, y oscuridad. Los colores más puros son aquellos que no contienen ningún pigmento blanco o negro. El sistema como originalmente fue publicado, divide el espectro en 24 colores elementales esenciales, con 28 variaciones de

cada uno en luminosidad u oscuridad (tintes, sombras, y tonos).

## Sistema de color de Munsell

El sistema de notación del color de Munsell, es similar a un globo irregular. El eje vertical está graduado en nueve escalas de gris, con el negro en la base como el cero, y el blanco en la punta como el diez. Los colores del espectro son divididos en 20 colores básicos que se representan de manera similar a las secciones verticales de un pastel, con sus colores más puros localizados alrededor del perímetro, o ecuador. El sistema de Munsell también usa un juego de placas de colores codificadas y regularizadas para cada color. Las variables en el sistema de Munsell son: **color**, **valor** y **cromaticidad**.



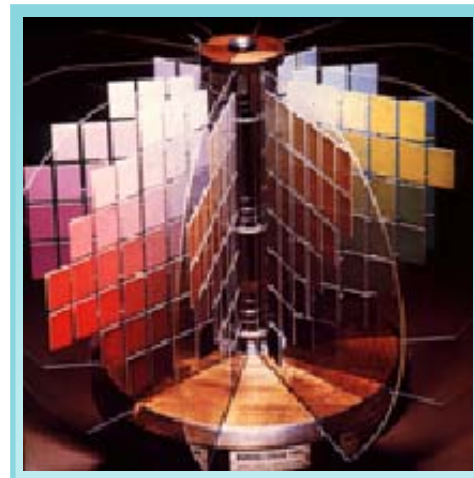
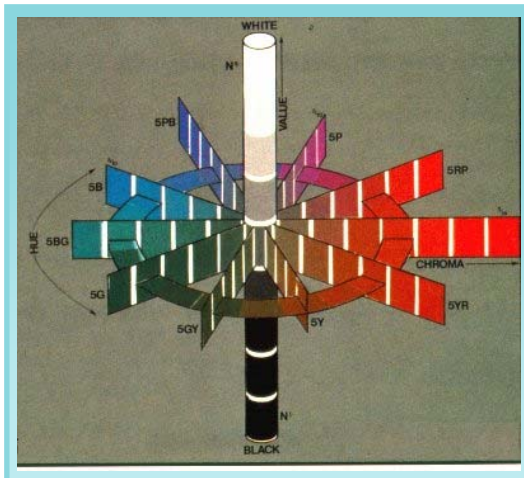


El **color** es la clasificación de un color por la forma como el ojo lo ve, se llama rojo, azul, verde, amarillo, etc. En cambio un color de Munsell se designa por una sola letra, R para rojo, G para verde, o pares de letras, como YG, para amarillo-verde.

El **valor** (similar a la escala de gris en el Sistema de Ostwald) indica luminosidad u oscuridad de un color en una escala que va de 0 para el negro a 10 para el blanco. Así, un color puede ser oscuro o de luz roja,

indicando una posición en una escala que va de luz a oscuridad, el valor de Munsell es aproximadamente igual a la raíz cuadrada del porcentaje de la reflectancia del color.

La **cromaticidad** indica la pureza o saturación del color, o recíprocamente, su capacidad de dilución. La cromaticidad se indica mediante un número precedido por una línea inclinada, que se antepone a la acotación del valor.



### El sistema del color ISCC-NBS

El Consejo de la Sociedad Internacional del Color (Agencia Nacional de Normas ISCC-NIBS) ha regularizado 267 nombres para describir los colores de los pigmentos. Cada nombre se iguala con una placa de color, con límites establecidos para cada uno, de acuerdo con los límites definidos en el sistema de color de Munsell.

### ISCC-NBS Nombres de colores comunes y sus abreviaturas

Nombre	Abreviación	Nombre	Abreviación
rojo	R	púrpura	P
naranja rojiza	rO	púrpura rojizo	rP
naranja	O	púrpura rojo	PR
amarillo	Y	rosa	Pk
verdoso amarillo	gY	rosa amarillo	yPk
verde amarillo	YG	rosa pardusco	brPk
verde amarillento	yG	naranja pardusco	brO
verde	G	castaño rojizo	rBr
verde azulado	bG	castaño	Br
azul verdoso	gB	castaño amarillento	yBr
azul	B	castaño verde oliva	OIBr
azul púrpura	pB	aceituna	OI
violeta	V	verde oliva	OIG

Adicionalmente, se usan adverbios y adjetivos en combinación con los nombres de los colores anteriores, para identificar completamente las 267 placas de colores básicas en el sistema. Los modificadores adicionales son:

Light	Very	Strong
Medium	Grayish	Vivid
Dark	Moderate	Brilliant
Deep	Pale	

### Sistema de color CIE

El sistema de color **CIE** fue inventado y adoptado en 1931 por la CIE y se ha vuelto una norma internacional subsecuentemente para medir, designar, y comparar los colores.

En el sistema CIE los porcentajes relativos de cada uno de los colores primarios (rojo, verde y azul) de un color en particular, son identificados por deducción matemática, y entonces se traza un **diagrama cromático**. Como se obtiene la longitud de onda dominante, entonces se puede determinar la pureza del color. Pueden designarse los colores en el diagrama cromático, si

estos se emiten, transmiten, o reflejan. Así, el sistema CIE puede coordinarse con los otros sistemas para la designación de colores.

Para especificar el diagrama cromático de un color por el sistema CIE, es necesario medir primero el valor del espectro fotométrico del color (**reflectancia, emitancia, o transmitancia**), de cada longitud de onda. Estos valores deben compararse entonces con los valores de los tres primarios y el cómputo resultante representará la cantidad de los primarios, (rojo, verde, y azul) necesarios para provocar en el observador la percepción del color de esa longitud de onda en el espectro.

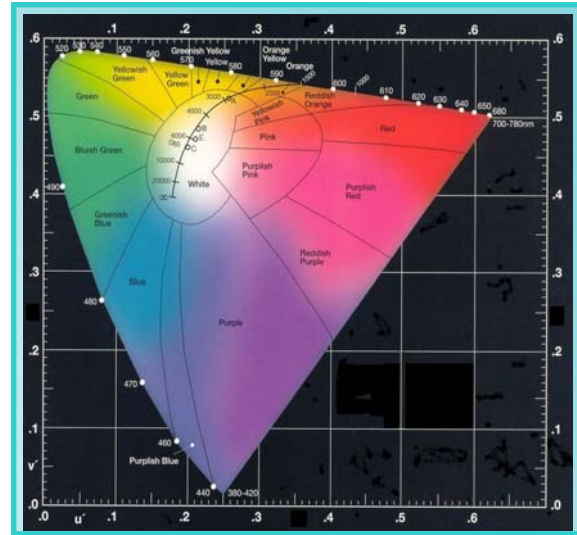
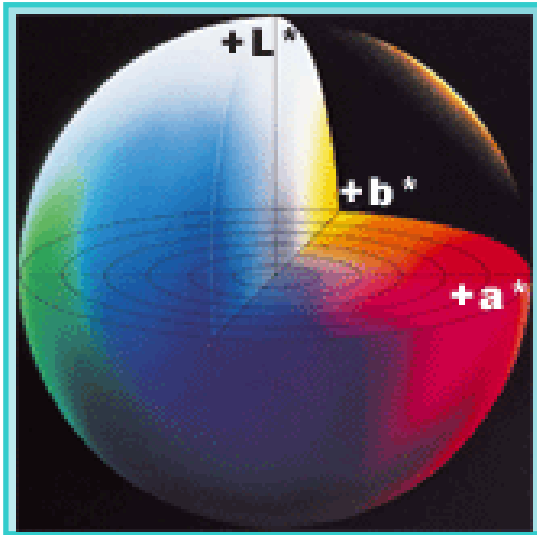
La suma resultado de estos cálculos es llamada, **valor del triple estímulo** para ese color. Los valores del triple estímulo son denotados por las letras mayúsculas, **X** (para el rojo), **Y** (para el verde), y **Z** (para el azul). El Y (verde) también es el valor de la luminosidad de ese color. Los valores del triple estímulo se usan para calcular las coordenadas de la cromaticidad de dicho color.

Las coordenadas de cromaticidad de un color representan los porcentajes relativos de cada uno de los colores primarios presentes en un color dado. Se usan letras minúsculas para designar las coordenadas del valor: **x** = rojo, **y** = verde, y **z** = azul. Los valores fraccionarios se calculan fácilmente con los valores del triple estímulo, X, Y, Z, de acuerdo a la ecuación siguiente

$$X/(X+Y+Z) = x$$

Sustituyendo Y y Z, respectivamente, en ecuaciones similares, las coordenadas de cromaticidad (**y**) para el verde y (**z**) para el azul también pueden calcularse. Ya que las coordenadas representan valores fraccionarios, entonces la suma de **x**, **y**, o **z** siempre igualará a la unidad.

El sistema de CIE es más exacto que los sistemas Ostwald y Munsell porque especifica el color en una base física eliminando la necesidad humana de juicios y comparaciones subjetivas. **Una medición más completa del color, necesariamente tendría que incluir entonces, el CIE, la cromaticidad, el color dominante, y los datos de la pureza del color, junto con los datos de distribución de energía espectral para indicar con precisión todas las variables.**



### Temperatura del color

Todos los objetos emitirán luz si se calientan a una temperatura suficientemente alta. También, cuando se eleva la temperatura de un objeto, el color de la luz emitida por él cambiará. Por ejemplo, una barra de hierro parece iluminada de rojo cuando se calienta, después cambia a rojo-naranja, luego pasa a blanco, y finalmente alcanza el blanco azulado, cuando está más caliente. De la misma manera, el filamento de tungsteno en una lámpara incandescente cambia de color cuando se aplican diferentes voltajes. Este fenómeno fue estudiado por Max Planck en 1900 y es la base para su ley del **radiador de cuerpo negro**. En esencia, esta ley predice la distribución de la radiación térmica en función de la temperatura, y define el límite superior de la radiación térmica. Un cuerpo negro se define como:

**“un cuerpo que absorberá toda la radiación que cae en él”.**

Esta ley puede usarse para designar la temperatura relativa al color de cualquier objeto caliente. La designación de la temperatura del color, aplicada a una fuente luminosa, se refiere a la temperatura absoluta en grados Kelvin de un cuerpo negro teórico o un radiador completo, cuya apariencia de color sea similar a la de la fuente luminosa en cuestión.

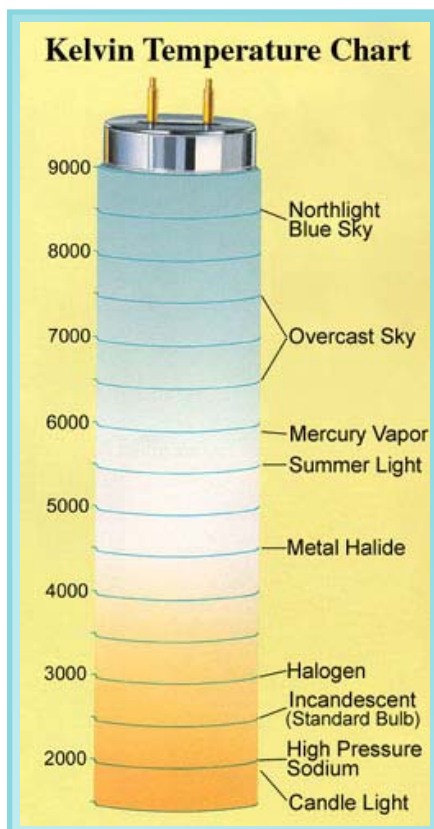
Así, dicho cuerpo es negro a temperatura ambiente, color rojo a 900 K, color azul brillante a 60,000 K.

Las lámparas de filamento de tungsteno empleadas para la iluminación en general tienen temperatura de color en el rango de 2600 K a 3000 K. Las lámparas de baja potencia,



empleadas donde la luminancia no es demasiado importante, operan aproximadamente a 2000 K. Lámparas como la TV y los reflectores operan en el rango de los 3100 a 3400 K, simplemente el punto de fusión del tungsteno es de 3500 K.

En la mayoría de los casos, la temperatura real del filamento está ligeramente por debajo de la temperatura aparente del color. Técnicamente, la designación de **temperatura del color** sólo puede aplicarse a las fuentes incandescentes, y como tal, es una especificación del grado de blancura y la composición de energía espectral de la fuente. Sin embargo, para especificar el grado de blancura de las lámparas fluorescentes, de las lámparas de vapor de mercurio, así como la de la luz del cielo, el término que se usa a menudo es **temperatura del color aparente**.



Ejemplos típicos de la temperatura de color aparente y sus valores son como sigue:

- Blanco Cálido (WW) y Blanco Cálido de Lujo (WWX) Lámparas Fluorescentes – 3,000K
- Blanco Frío (CW) y Blanco Frío de Lujo (CWX) Lámparas Fluorescentes – 4,000K
- Blanco (W) Lámpara Fluorescente – 3,500K
- Luz de día (D) la Lámpara Fluorescente – 7,000K
- Luz de sol a salida del sol -1800K
- Luz de sol a mediodía – 5,000K
- Cielo nublado 6,500K
- Cielo sumamente azul (noroeste despejado) – 25,000K

Desgraciadamente, la designación de la temperatura de color aparente para cualquier fuente de luz no da la información sobre su distribución de energía espectral específica. Por ejemplo, las lámparas de luz “Blanco Frío”, y “Blanco Frío de Lujo” parecen ser del mismo color pero sus curvas de distribución espectral son bastante diferentes y sus efectos en los objetos colores y materiales son definitivamente diferentes.

La misma limitación se aplica cuando se emplea la notación de temperatura del color para especificar la luz del cielo, las lámparas de vapor de mercurio, etcétera.

### Fuentes estándar de iluminación

Tres fuentes han sido seleccionadas por el CIE como estándar en la colorimetría. Estas fuentes se designan como **fuentes A, B, y C**. Las lámparas calibradas pueden obtenerse en la Agencia Nacional de Normas.

La **fuentes A** es una lámpara de filamento de tungsteno que opera a 2854 K. la **fuentes B** utiliza una lámpara que tiene la calidad espectral de la fuente A, en combinación con un filtro específico. La temperatura de color claro de la fuente B se aproxima a la luz del sol del mediodía (4870 K), la **fuentes C** es la fuente A, con un filamento de tungsteno, pero con un filtro diferente. El filtro y la combinación de la lámpara producen una calidad de color que se asemeja a la luz del día con 6770 K.

### Instrumentos para la medición del color

Los dos instrumentos más comúnmente empleados hoy en día para la medición del color, son el **espectrofotómetro** y el **colorímetro**. Sus principios de operación son bastante diferentes.

El espectrofotómetro, da la energía radiante a cada unidad de longitud de onda a través del espectro visible completo, mientras el colorímetro da sólo la suma de energía radiante para cada color primario. Pueden usarse datos de energía espectrales de cualquiera de estos instrumentos para calcular la cromaticidad de un color en el CIE, pero es obvio que los cálculos del espectrofotómetro serán más exactos ya que de entrada los datos son más completos.





La curva de distribución de energía espectral del espectrofotómetro se usa a menudo cuando se iguala un color donde la precisión es esencial. Recíprocamente, los colorímetros no son tan exactos como el espectrofotómetro en rangos amplios, pero son eficaces en general, cuando las variaciones de color son menores.



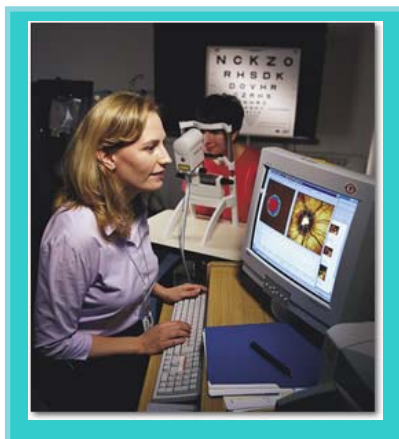
**Espectrofotómetro**

### 3.0 La Iluminación y la Vista

Los ojos son nuestra ventana al mundo que nos rodea. Sin luz no podemos ver; con luz inadecuada o con una iluminación incorrecta la tarea de ver puede resultar ineficiente, incómoda e inclusive peligrosa. Ningún procedimiento único o fórmula sencilla garantizará la solución de cualquier o todos los problemas de iluminación en la arquitectura. Más bien, son múltiples los factores que deben considerarse y su importancia relativa puede variar considerablemente, dependiendo de los requerimientos visuales que deben cumplirse o satisfacerse.

Las tareas visuales pueden ser desde las muy exigentes que tienen que ver con el discernir detalles muy pequeños durante períodos prolongados de tiempo hasta lo que podría denominarse la vista casual de objetos de gran tamaño durante un momento. Es decir, el objeto visual puede variar de tamaño general y en el tamaño de sus características. El tiempo en que se efectúa la observación puede ser de corta o larga duración. Los objetos visuales pueden requerir una discriminación en cuanto a color o meramente una diferenciación entre blanco, gris y negro.

Le corresponde al especialista en iluminación o, si no se da éste, al arquitecto, la responsabilidad de proporcionarle al usuario las condiciones ambientales luminosas que le permitan realizar las tareas visuales requeridas con exactitud, relativa rapidez, comodidad, mínimo esfuerzo y seguridad.



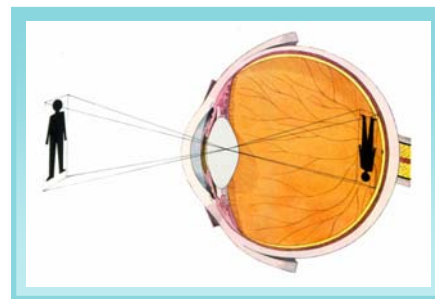
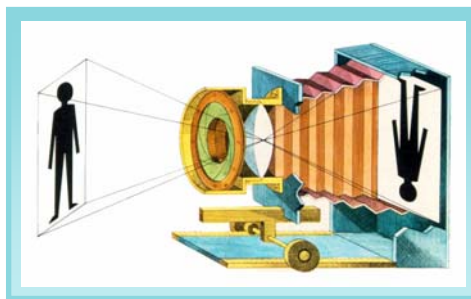
## Los Procesos Visuales

### El ojo

De todos los instrumentos elaborados por el ser humano, ninguno se asemeja tanto a una parte de su cuerpo como la cámara fotográfica al ojo. Sin embargo, esto no fue intencional. Si se parecen tanto es porque ambos cumplen funciones y resuelven problemas semejantes, siendo uno más de los ejemplos de lo que los científicos denominan evolución convergente, con la peculiaridad de que una de estas evoluciones es orgánica, mientras que la otra es tecnológica.

A través de los siglos mucho hemos aprendido sobre la vista por medio de la cámara fotográfica, pero poco sobre fotografía por medio del ojo. La cámara hizo su primera aparición no como un instrumento para producir imágenes, sino como una cámara oscura que solamente trataba de proyectar una imagen invertida sobre una pantalla. Mucho después de que se conocía y comprendía bien la óptica de la cámara oscura, seguía siendo un misterio el funcionamiento del ojo. En particular, dos eran los conceptos problemáticos. Uno era el que la radiación de la luz sale del ojo, el otro el que una imagen invertida sobre la retina es de alguna manera incompatible con el ver un objeto de pie y no de cabeza.

No fue sino hasta el siglo XVII que los principios básicos de la óptica de la formación de imágenes en el ojo fueron claramente expresados. Esto lo logró Johannes Kepler en 1611 y luego nuevamente en 1664 René Descartes. A fines de ese siglo el primer tratado sobre óptica escrito en inglés por William Molyneux de Dublín, Irlanda, contenía varios diagramas simples y claros comparando la proyección de una imagen real e invertida en un estenoscopio (cámara de abertura diminuta sin lente), en una cámara oscura equipada con lente y en el ojo.



Hoy en día supuestamente todo niño en edad escolar sabe que el ojo es como una cámara fotográfica.

En ambos instrumentos un lente proyecta una imagen invertida de una vista sobre una superficie sensible a la luz: la película de la cámara y la retina del ojo.

En ambos la abertura del lente se regula a través de un dispositivo que cambia de tamaño: el diafragma en la cámara y el iris en el ojo.

En ambos el interior de la cámara está cubierta con una capa de material negro que absorbe la luz errática que de otra manera se reflejaría múltiples veces dentro de la cámara y borraría la imagen. También se supone que todos sabemos cuales son las diferencias principales entre una cámara fotográfica y el ojo.

Una cámara se enfoca cambiando la distancia entre el lente y la película, mientras que en el ojo la distancia entre el lente y la retina está fija, y el enfoque se logra cambiando el grosor del lente. El fotógrafo amplía la abertura del diafragma al hacer una exposición en niveles bajos de luz. La pupila del ojo también se abre, gobernada por la actividad de la retina de acuerdo al nivel de intensidad de la luz. Ambos ajustes tienen como objeto el de admitir una mayor cantidad de luz a través del lente. Esto se logra a algún costo con respecto a la calidad de la imagen, puesto que el lente más expuesto define la imagen con menor precisión y con menor profundidad de enfoque.

Cuando requiere aún mayor cantidad de luz el fotógrafo, cambia la película a una de mayor sensibilidad. Esto generalmente implica una nueva pérdida de definición en la imagen. Con un solo tipo de emulsión, mientras más sensible la película, más grueso el grano y menos resolución de la imagen.

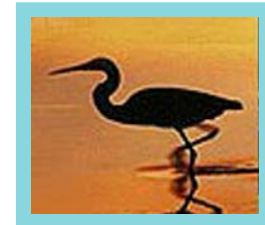
La retina del ojo tiene granulosidad al igual que la película fotográfica. En la película el grano consiste de cristales de bromuro de plata embebidos o incrustados en gelatina. En la retina, se compone de células receptoras dispuestas de lado a lado para formar un mosaico de elementos sensibles a la luz.

Existen dos tipos de receptores en las retinas de los ojos del ser humano y la mayor parte de los animales vertebrados: los conos y los bastoncillos. Cada uno de éstos se compone de un segmento interior muy parecido al de cualquier célula nerviosa, y un segmento exterior en la forma o de cono o de bastoncillo, la porción especial sensible a la luz. Los conos son los órganos de la vista que funcionan a niveles altos de intensidad de luz y también son los responsables de la visión a color. Los bastoncillos son los que responden a niveles bajos de luz y su excitación sólo produce sensaciones de color gris.

Por eso se dice que “**en la oscuridad todos los gatos son pardos**”.

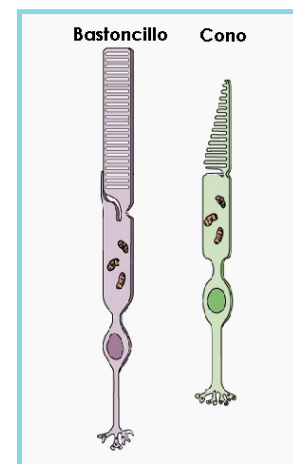
El cambio de visión de conos a visión de bastoncillos involucra un cambio de mosaico de grano fino a grano grueso. No es que los conos sean más pequeños que los bastoncillos, sino que los conos actúan de manera individual, mientras que los bastoncillos actúan en grupo. Cada cono está generalmente conectado al cerebro a través de una sola fibra del nervio óptico, mientras que grandes grupos de bastoncillos se conectan por medio de una fibra del nervio óptico, por lo que los bastoncillos no tienen casi ninguna capacidad para resolver imágenes más que de manera muy burda.

*¡No solamente es cierto que de noche todos los gatos son pardos, sino que ni siquiera se tiene la seguridad de que sean gatos!*

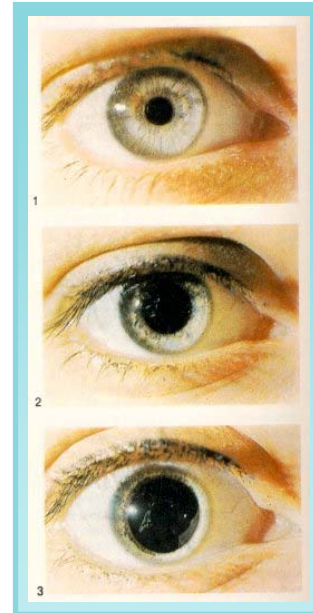


La visión en luz de muy bajo nivel de intensidad, como la luz de las estrellas o de la luna involucra sólo a los bastoncillos; los relativamente insensibles conos no son estimulados. A intensidades de luz moderadamente bajas, aproximadamente 1000 veces mayor que la intensidad más baja a la que responde el ojo, los conos empiezan a funcionar. Su entrada es marcada por sensaciones diluidas de color. Sobre un rango intermedio de intensidades de luz los conos y bastoncillos funcionan conjuntamente, pero al aumentar la intensidad, los conos empiezan a dominar. No sabemos con certeza si los bastoncillos dejan de funcionar a muy altos niveles de iluminación, pero en luz brillante su contribución relativa a la visión decae tanto que es casi negligible.

Los conos y bastoncillos comparten con los granos de la placa fotográfica otra propiedad importante. Desde hace mucho se sabe que en una película expuesta a la luz, cada grano de bromuro de plata ennegrece totalmente o para nada si se le dota de suficiente revelador y que un grano es susceptible a ser revelado a través de la absorción de un solo quantum de luz o cuando mucho de muy pocos quanta. Igualmente resulta cierto que un cono o bastoncillo es excitado por la luz para aportar ya sea su respuesta máxima o ninguna. Esto es cierto de las fibras nerviosas a las que están conectados los conos y bastoncillos, y ahora sabemos que para producir este efecto en un bastoncillo y probablemente en un cono también solo se requiere absorber un quantum de luz.



Es un principio básico de la fotoquímica que un quantum de luz es absorbido por y, en general, puede activar sólo una molécula o átomo. ¿Cómo puede un comienzo tan diminuto ocasionar un resultado tan significativo como el revelado de un grano fotográfico o la descarga de un receptor en la retina? En el proceso fotográfico la respuesta parece ser que la absorción de un quantum de luz causa la reducción de un ion de plata a un átomo de plata, el cual luego sirve como un centro catalítico para el revelado del grano entero. Es posible que un mecanismo semejante opere en un cono o bastoncillo. La absorción de un quantum de luz por una molécula sensible a la luz en cualquiera de estas dos estructuras la convierte en un agente catalítico biológico o enzima, lo cual promueve consiguientes reacciones que producen la descarga en la célula receptora.



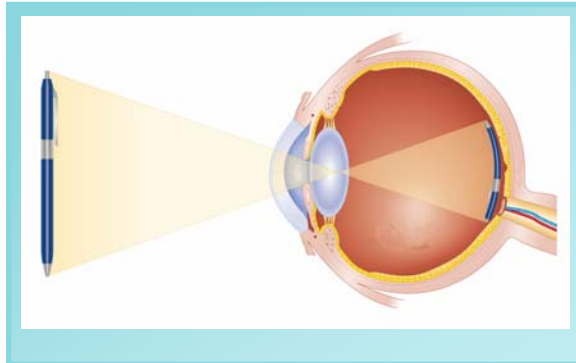
Una de las características más extrañas del ojo a niveles muy bajos de iluminación es resultado de los fenómenos que acabamos de describir. Al enfocar, el ojo se guía por medio de su evaluación sobre el grado de definición de la imagen sobre la retina. Al deteriorarse la imagen cuando se abre la pupila en luz tenue y al bajar la capacidad de la retina para resolver la imagen al transferirse la función visual de los conos a los bastoncillos, la habilidad de enfoque también disminuye. En luz de muy bajo nivel de intensidad, el ojo casi pierde totalmente su capacidad de ajustar su enfoque. Se parece a una cámara fotográfica muy corriente que tiene el foco fijo.

Con respecto a su funcionamiento, el ojo es un tipo de dispositivo en luz intensa y muy otro en luz tenue. A bajas intensidades todos sus recursos se concentran a lograr sensibilidad sin importar el sacrificio que esto implique con respecto a la forma, es predominantemente un instrumento para percibir luz, no forma ni detalle. En luz brillante todo esto cambia. Al disminuir su tamaño la pupila, y al pasar de visión de bastoncillos a visión de conos, mas otros recursos que describiremos, el ojo sacrifica cantidad de luz para lograr lo máximo en forma, detalle y color.

El uso de un lente para proyectar una imagen ha creado problemas para el ojo y la cámara. Todo lente simple está sujeto a errores en la formación de imágenes: las denominadas aberraciones lenticulares. La aberración esférica la poseen todos los lentes limitados por superficies esféricas. Las porciones marginales del lente hacen que los rayos de luz enfoquen a distancias más cortas que las porciones centrales del lente. La imagen de un punto en el espacio no es propiamente un punto sino un pequeño círculo más o menos borroso. El costo de

una cámara se determina en gran medida por la cantidad que se ha corregido esta aberración, modificando el lente.

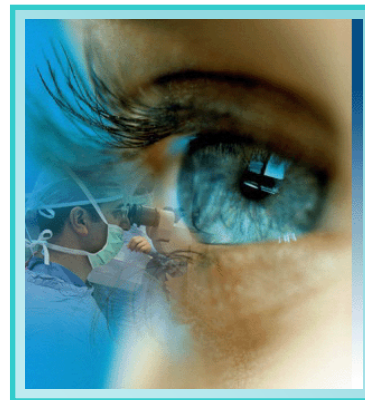
El ojo humano está sorprendentemente bien corregido, a veces sobre-correcto, en cuanto a la aberración esférica. Esto lo logra de dos maneras: La cornea, que es la superficie principal de refracción del ojo, tiene una curvatura más plana en sus orillas que en el centro. Esto se compensa en parte por la tendencia de una superficie esférica



de refractar la luz en mayor cantidad en sus márgenes. De mayor importancia, el lente cristalino es más denso en su parte central que en sus capas exteriores por lo que refracta más en su centro.

Otro error lenticular principal es el denominado aberración cromática o error de color. Todo lente simple de un solo material refracta los rayos de menor longitud de onda más que los de mayor longitud de onda, y de esta manera enfocan la luz azul a distancia más corta que la luz roja. Como resultado se tiene una imagen de un punto blanco no como blanco sino un círculo borroso rodeado de color. Dado que esto distorsiona gravemente la imagen, hasta los lentes de las cámaras corrientes están corregidos con respecto a la aberración cromática.

Desde los tiempos de Newton se conoce que el ojo humano tiene gran aberración cromática. Su sistema lenticular parece estar absolutamente sin corregir con respecto a este defecto. Los organismos vivos probablemente no pueden fabricar materiales transparentes con características de refracción y dispersión tan distintos como los que requiere la corrección de la aberración cromática. La magnitud del error de color en el ojo humano podría causar serias dificultades en la visión de imágenes. En la realidad el error es pequeño entre el extremo



rojo y azul-verde del espectro luminoso, pero aumenta rápidamente a longitudes cortas de onda, como lo son los de la luz azul, violeta y ultravioleta. Estos últimos presentan el problema más grave para el ojo y para la cámara y para el cual el ojo encuentra una solución especial.



El primer dispositivo de corrección de la aberración cromática es el lente amarillo. El cristalino es no sólo un lente sino también un filtro de color. Hace pasar la luz de longitud de onda larga y media, y filtra la violeta en la región de longitud de onda de 400 milimicras. Es esta acción del lente y no la falta de sensibilidad de los conos y bastoncillos la que hace que no veamos en la región cercana al ultravioleta. Precisamente las personas que han perdido sus cristalinos en la operación de cataratas y que les han sido reemplazados por lentes artificiales quienes tienen excelente visión en el rango violeta y ultravioleta. Tienen estas personas la capacidad de leer un cartel de optometrista de arriba hasta abajo en luz ultravioleta que deja a las personas normales en absoluta oscuridad.

Es entonces el cristalino el que resuelve el problema de la porción del espectro luminoso cercano al ultravioleta, la región en que el error cromático es el mayor, simplemente eliminando esta porción de la visión humana. El lente cristalino se hace de color amarillo más profundo al aumentar la edad de las personas y elimina una mayor parte del rango de luz correspondiente al azul y al violeta. Se dice que por este motivo los pintores de edad avanzada tienden a usar menos estos colores en sus obras.

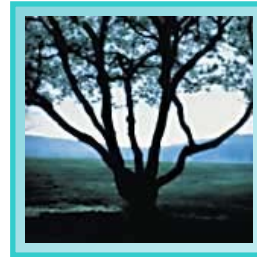
El lente filtra toda la porción ultravioleta. Los dispositivos restantes que contrarrestan la aberración cromática se concentran sobre la visión de los conos a altas intensidades de luz. Esto es muy conveniente puesto que los bastoncillos no tienen la capacidad de evaluar las imágenes con la precisión requerida para efectuar la corrección.

Al pasar de luz tenue a luz brillante, de visión de bastoncillos o llamada visión escotópica a visión de conos o visión fotópica, la sensibilidad del ojo se desplaza hacia la porción roja del espectro luminoso. Este fenómeno fue descrito en 1825 por el fisiólogo checoslovaco Johannes Purkinje y se le conoce como el efecto Purkinje. El se dio cuenta que con la primera luz del amanecer los objetos azules tienden a verse más brillantes que los rojos, pero que al transcurrir la mañana se ven relativamente menos luminosos. La fundamentación de este cambio radica en la gran diferencia que poseen los bastoncillos en relación a los conos en sensibilidad luminosa espectral. Los bastoncillos logran su máxima sensibilidad a la luz en la porción azul-verde de aproximadamente 500 milimicras; la sensibilidad de los conos está desplazada hacia la porción roja logrando su máxima sensibilidad en el rango correspondiente al amarillo-verde de cerca de 562 milimicras.

La importancia en este fenómeno radica en varias cuestiones, una de las cuales es que, al pasar de luz tenue, en que las imágenes en todo caso son borrosas a luz brillante, en que se va ganando agudeza visual, la sensibilidad del ojo se aleja de la región espectral en que el error de



color es grande hacia la porción del espectro en que es mínima esta aberración. El fenómeno Purkinje también tiene implicaciones importantes para la iluminación. A bajos niveles de iluminación la luz roja es la que menos se distingue, mientras que la azul es la que se percibe más brillante; por otro lado, en la luz de día o a niveles normales y altos de luz natural y artificial, es la luz amarilla-verde la que se percibe mejor.

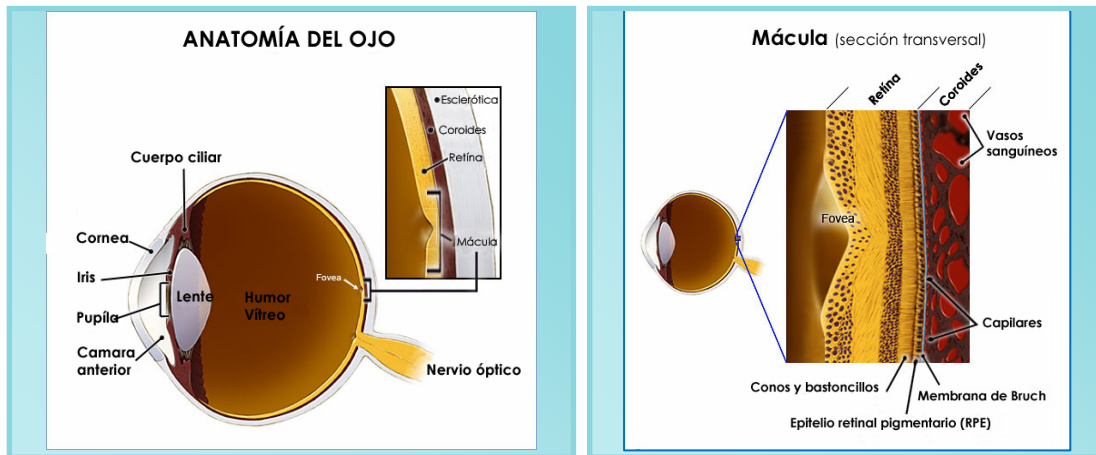


La corrección de la aberración cromática en el ojo humano se completa a través de un tercer mecanismo. Hacia la parte central de la retina existe una pequeña depresión de poca profundidad conocida como la fovea y que contiene exclusivamente un tipo de receptor — conos. Mientras que la retina en su totalidad alcanza un ángulo visual de hasta 240 grados, la fovea subtende un ángulo de escasos 1.7 grados. La fovea es considerablemente más pequeña que la cabeza de un alfiler, sin embargo, con este pequeñísimo pedacito de retina el ojo logra casi toda la visión de detalle.

La fovea también incluye el punto de fijación del ojo. El mirar directamente un objeto implica dirigir la vista de tal manera que la imagen del objeto se proyecte sobre la fovea. En los límites de la fovea aparecen los bastoncillos, y se vuelven cada vez más numerosos conforme se aleja uno más de la fovea sobre la retina. El aparato para la visión de luz brillante se concentra hacia el centro de la retina, el de luz tenue hacia la periferie de la retina, conociéndose también como visión periferal, en contraste con la visión foveal. En luz de muy baja intensidad, demasiado tenue para excitar los conos, la fovea es ciega. En esas condiciones sólo se perciben los objetos si se les mira ligeramente del lado para capturar sus imágenes sobre superficies de la retina que contengan muchos bastoncillos.

En el ser humano y simios, exclusivamente de todos los mamíferos, la fovea y la región de la retina inmediatamente a su alrededor, es de color amarillo y se le conoce como mácula lutea. Su pigmentación proviene de una pantalla amarilla que descansa sobre los receptores de luz de la retina central, subtendiendo un ángulo visual de 5 a 10 grados en diámetro. Este pigmento en la mácula lutea absorbe la luz en las porciones violeta y azul del espectro luminoso

exactamente en la región en que la absorción lenticular cae a niveles muy bajos. De esta manera la mácula lutea elimina en la retina central las regiones residuales del espectro en que la aberración cromática es alta.



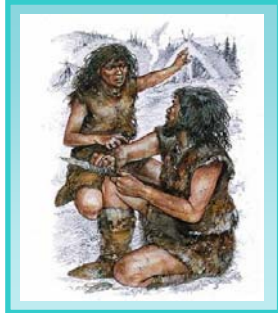
Así es que el ojo humano se deshace de las partes del espectro luminoso que mayores problemas le causarían, dado que no tiene otras maneras de corregir el defecto. El lente amarillo elimina el ultravioleta lejano para el ojo en su totalidad, la pigmentación macular se deshace de la mayor parte de las porciones azul y violeta para la retina central, y el desplazamiento de visión escotópica o periferal a visión fotópica o foveal mueve la percepción visual hacia la región roja. Por medio de estos tres mecanismos el aparato visual de máxima agudeza evita todo el rango espectral en el que se presenta la mayor aberración cromática.

Uno de los capítulos más interesantes en la historia de la visión es el que se refiere a la diferenciación entre los colores y las texturas. Es precisamente en las últimas décadas en las que se han hecho los mayores avances en conocimientos y comprensión al respecto. Dedicaremos un capítulo posterior a estas cuestiones.

### Generalidades de interés sobre el ojo y la vista

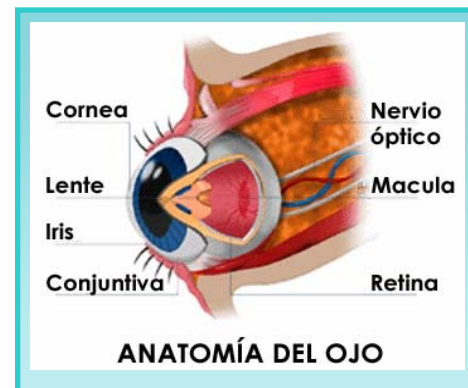
De todos los órganos del cuerpo, ninguno puede igualarse, en complejidad concentrada, al ojo. Siendo relativamente pequeño tiene decenas de millones de conexiones eléctricas y puede procesar, de manera simultánea, un millón y medio de mensajes. De él depende la transmisión del 80% de los conocimientos que absorbe un ser humano. Es mucho más sensible que la cámara de televisión más grande y sofisticada que jamás se haya construido.

Originalmente, la función principal del ojo en el ser humano de la prehistoria, era la de ver las cosas de lejos para evitar peligros y para cazar. Sin embargo, hoy en día utilizamos la vista para observar los objetos de cerca.



En la parte de enfrente del ojo se encuentra la córnea que es la ventana transparente al mundo y que mide cerca de un centímetro y medio de diámetro y que inicia el proceso visual refractando los rayos de luz para enfocarlos y empezar a formar una imagen. Inmediatamente le sigue la pupila que es la abertura de un diafragma ajustable para admitir cantidades variables de luz y cuyo tamaño es controlado por el músculo anular denominado iris y que es la parte de color del ojo. Con sol brillante, la pupila está casi cerrada, mientras que en una noche oscura se encuentra muy abierta. Luego se encuentra el lente o cristalino que está constituido por una bolsita que contiene líquido y que tiene la forma y tamaño de una gragea de vitaminas.

El cristalino se encuentra rodeado por un anillo de músculos, llamados ciliares, extremadamente fuertes, con una enorme capacidad de trabajo y que se contraen comprimiendo el cristalino y haciendo que engruese para enfocar los objetos cercanos. Cuando los músculos ciliares se relajan, el cristalino está tensado o jalado, y así adelgazado para enfocar de lejos. Es decir, la posición normal que requiere menos esfuerzo es la visión de lejos, que está perfectamente



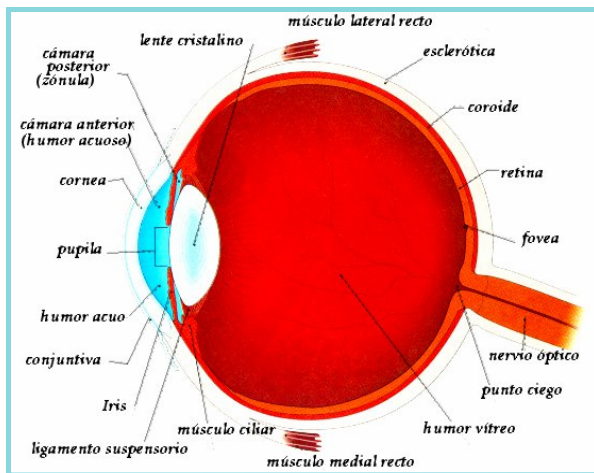
adaptada a los requerimientos de nuestros antepasados prehistóricos a quienes les interesaba divisar un intruso lejano o algún otro peligro cuando estaban trepados sobre los árboles. Pero hoy en día nuestras actividades se centran en los alrededores cercanos, en los objetos pequeños con características de detalle pequeño, de lectura, de miniaturización, en un escritorio o mesa de trabajo, frente a una computadora o herramienta y con un manual, llevando a cabo tareas minuciosas, haciendo que los músculos ciliares estén en constante tensión y que produzcan cansancio y hasta agotamiento, por lo que muchas personas requieren de anteojos y también tienen padecimientos de la vista, aparte de dolores de cabeza y tensión nerviosa.

Por delante y por detrás del cristalino se encuentran dos cámaras llenas de líquido. En la delantera, el líquido, llamado humor acuoso, es como agua; en la de atrás, éste tiene una consistencia como el de la clara de huevo y se le conoce como humor vítreo. Estos líquidos son completamente transparentes para permitir el paso de la luz y tienen como propósito fundamental mantener el ojo firmemente inflado.

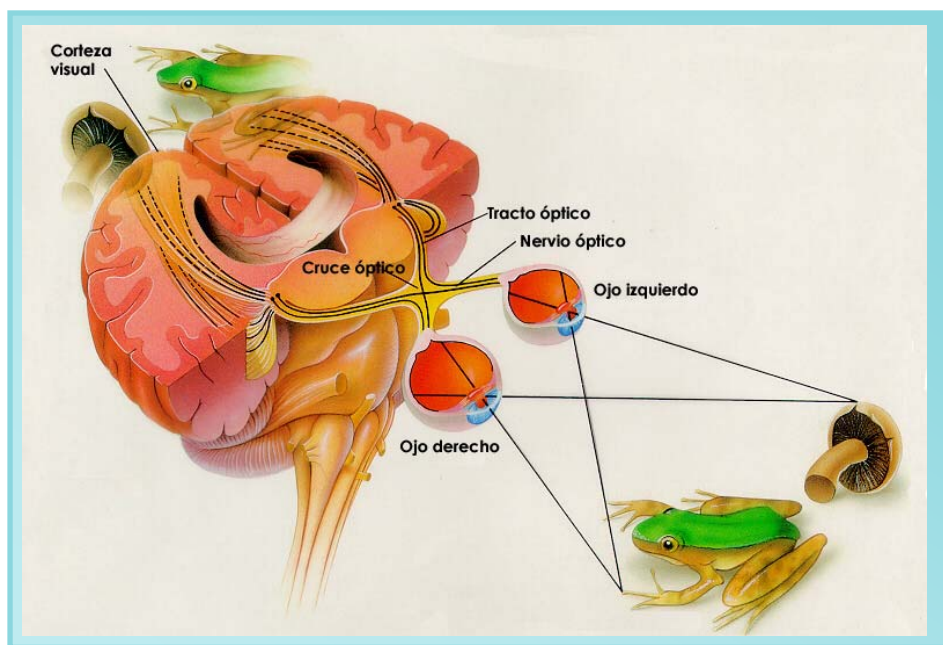
Al mirar un objeto la luz pasa a través de la cornea y el cristalino que son el sistema óptico lenticular que refractan los rayos de luz para enfocarlos sobre la retina, formando una imagen en ella. La retina es una especie de tapiz como papel de cebolla que cubre las dos terceras partes posteriores del interior del ojo. A excepción del cerebro, probablemente en ninguna otra parte del cuerpo existe tal cantidad de elementos encerrados en tan poco espacio. En cinco centímetros cuadrados la retina contiene 137 millones de células receptoras sensibles a la luz: 130 millones de éstos son bastoncillos, los demás, conos. Los bastoncillos están dispersos por toda la retina y al ser estimulados por muy pequeñas cantidades de luz, su pigmento rojo violáceo o rodopsina es activado generando una corriente eléctrica de unas cuantas millonésimas de voltio que pasa al nervio óptico y se transmite al cerebro a una velocidad de 500 kilómetros por hora, y éste interpreta las señales como una imagen erecta, aún cuando la que se produce en la retina es real e invertida. Toda esta actividad electroquímica ocurre en aproximadamente dos milésimas de segundo.

Los conos, concentrados en la fovea tienen también pigmentos activados pero por luz de mayor intensidad, uno para el rojo, otro para el verde, y aún otro para la luz azul. El cerebro los combina para hacer toda la enorme gama de distintos colores.

Aún cuando vemos a través de los ojos, es en el cerebro donde se interpretan las imágenes y se completa el proceso visual. Un golpe muy fuerte en la parte de posterior de la cabeza, lo suficientemente intenso para destruir el centro óptico del cerebro, causaría ceguera permanente. Un golpe menos intenso provocará una alteración eléctrica desordenada y nos hará ver "estrellas". Los sueños son prueba del papel que cumple el cerebro en la visión, y las personas que nacen ciegas sueñan en función de otros estímulos sensoriales como el tacto, el oído y hasta el olfato.



Para ver un objeto es necesario: (1) que exista el objeto, (2) que éste sea iluminado, (3) que por lo menos parte de esta luz sea reflejada por el objeto y que ésta llegue al ojo, (4) que el ojo tenga el sistema óptico lenticular adecuado, con los músculos necesarios para modificar la curvatura del cristalino, con los músculos necesarios para dirigir la vista hacia el objeto, con la pupila para admitir luz en cantidades correctas y el iris para controlarlo, con una retina provista de conos y bastoncillos funcionando bien, y con un nervio óptico para transmitir las señales al cerebro; y (5) un cerebro, con la parte responsable de vista en condiciones correctas de funcionamiento para que la imagen proyectada sobre la retina sea recibida, procesada y comunicada a nuestra conciencia.

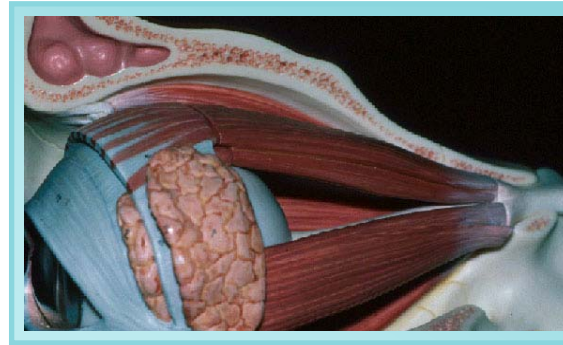
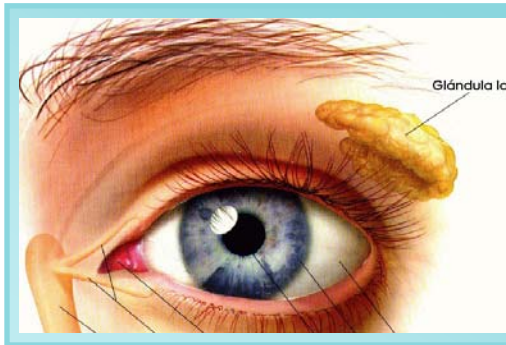


Aunque minúsculos, los músculos que controlan las distintas partes del ojo son relativamente los más resistentes del cuerpo. En un día normal, el ojo se mueve un promedio de 100,000 veces para enfocar con precisión los objetos. Sería necesario recorrer ochenta kilómetros diarios para darles a las piernas un ejercicio comparable.

El equipo de limpieza del ojo es sorprendente. Las glándulas lagrimales producen una corriente continua de humedad para lavar el polvo y otras materias extrañas. Los párpados funcionan como limpia brisas, abriendo y cerrándose de tres a seis veces por minuto, manteniendo húmeda y limpia la córnea. Las lágrimas contienen también un potente antimicrobiano llamado lisozima que protege de las bacterias infectantes.



La cavidad de hueso en la que se encuentra el ojo, junto con las prominencias de los pómulos y la frente, actúan como amortiguadores de golpes directos; las pestañas son persianas protectoras y las cejas, junto con las prominencias óseas en las que reposan, funcionan como toldos o volados que proporcionan protección adicional, fundamentalmente con respecto a la luz y el aire.



Por lo anterior, se puede concluir también, que es necesario mantenerse actualizado con respecto a los adelantos científicos que se dan continuamente para ir transformando el ejercicio profesional para que éste sea cada vez más acorde con los requerimientos del usuario del producto arquitectónico.

## 4.0 La importancia de la luz natural

En un mundo que se preocupa por las emisiones que producen los compuestos de carbono, por el calentamiento global y por diseño un sustentable, el uso planificado de luz natural en edificios no residenciales se ha convertido en una estrategia importante para mejorar la eficiencia energética, minimizando las cargas de iluminación, calefacción y



refrigeración. La introducción de estrategias y sistemas avanzados e innovadores de luz natural pueden reducir considerablemente el consumo de electricidad en un edificio y también significativamente mejorar la calidad de la iluminación en un espacio arquitectónico interior.

Se puede encontrar evidencia en investigaciones, que la luz natural es deseable, al igual que en observaciones sobre la conducta humana y la disposición de espacios en edificios de oficinas. Los vanos que admiten luz natural dentro de los edificios son importantes, debido a la vista y conexión que proporcionan con los espacios exteriores. La luz natural también es importante debido a su calidad, composición espectral y variabilidad. Las reacciones del usuario a los ambientes interiores sugieren que es deseable la luz natural por que cumple dos requerimientos humanos muy básicos: ver bien la tarea visual y conocer el espacio arquitectónico, a la vez que experimentar estimulación ambiental. Existen estudios que indican que el trabajar largas horas en espacios con iluminación artificial dañan la salud; el trabajar en ambientes de luz natural parece producir menos estrés e incomodidad.

La luz natural proporciona una iluminancia elevada y permite distinguir color de manera excelente. Estas dos propiedades significan que la luz natural proporciona las condiciones que se requieren para una buena visión. Sin embargo, la luz natural también puede producir deslumbramiento solar incómodo y reflejos de alta luminancia en las pantallas utilizadas en todos los lugares de trabajo hoy en día. Ambos, deslumbramiento y reflejos que incomodan e incapacitan, impiden la buena visión. Por esto el efecto de la luz natural en el desempeño de tareas visuales que requieren alto desempeño depende mucho de cómo se proporciona la luz natural.

Todos estos factores deben considerarse en el diseño de la iluminación natural dentro de los edificios. Los sistemas y estrategias de luz natural no siempre han cumplido la promesa de ser estrategias de uso eficiente de energía que a la vez mejoran la comodidad y desempeño del usuario. Una de las razones de esto es la falta de sistemas apropiados de bajo costo y alto rendimiento, de herramientas simples para predecir el desempeño de estas estrategias de luz natural de vanguardia y de técnicas para integrar la planificación de luz natural al proceso del desarrollo arquitectónico.

Barreras usuales del pasado que han impedido la integración de la luz natural dentro de los edificios han sido:

- Falta de conocimientos con respecto al desempeño de sistemas de vanguardia de luz natural y estrategias de control de iluminación.
- Falta de herramientas de diseño de fácil uso.
- Falta de evidencia de las ventajas que proporciona la luz natural dentro de los edificios.

Afortunadamente, se han llevado a cabo evaluaciones del desempeño de sistemas y estrategias de control de iluminación, se han logrado avances en la integración de herramientas de diseño de iluminación y se han estudiado casos específicos para proporcionar evidencias sobre el desempeño de luz natural en edificios reales.

Para remediar la falta de información sobre desempeño de sistemas de iluminación natural avanzados se han evaluado sistemas específicos utilizando procedimientos de monitoreo en espacios de prueba, en edificios reales y en modelos a escala, bajo cielos simulados. Se han fijado parámetros para medir iluminancia, luminancia, comodidad visual y aceptación de luz natural por parte del usuario. En general los resultados que arrojan estos estudios, indican que, cuando se ubican de manera adecuada, la mayor parte de los sistemas puestos a prueba, mejoraron el desempeño de luz natural en zonas perimetrales del edificio, comparados con ventanas convencionales.

La iluminación natural en los edificios es esencialmente un reto de integración sistémica para un equipo multidisciplinario de diseño que involucra, desde la selección y orientación del predio, hasta la optimización de los detalles de las ventanas y de los sistemas de control de iluminación.

Este documento va dirigido a arquitectos, especialistas en iluminación, y fabricantes en la construcción. La información debe emplearse en las etapas más tempranas en el proceso de diseño, debido a que las primeras imágenes de la envoltura construida; la ubicación, tamaño y



forma de los vanos, y los sistemas de control solar y luz natural, son cruciales para el diseño de la iluminación.

### **Objetivos y alcances**

El objetivo de este estudio es promover el diseño arquitectónico que integra la iluminación natural debido a las ventajas que representa. Se describen un buen número de sistemas de vanguardia en detalle, al igual que maneras en que estos sistemas se pueden integrar al proceso general de diseño.

Una parte de este estudio incluye los parámetros de planificación en las etapas iniciales de diseño, tales como decisiones básicas de forma y tamaño de vanos, al igual que objetivos específicos de las estrategias de iluminación natural. También se tratan aplicaciones de estrategias de luz natural en vanos y espacios específicos, junto con recomendaciones de qué sistema seleccionar para ambientes y climas específicos.

Los sistemas de luz natural de vanguardia funcionan a través de redirigir la luz solar o del cielo a superficies que lo requieran, pero, al mismo tiempo, controlando el deslumbramiento. Estos sistemas son particularmente adecuados cuando un espacio interior es demasiado profundo para que las ventanas convencionales proporcionen una iluminación uniforme o cuando existan obstrucciones externas. Sistemas que controlan deslumbramiento, al igual que cantidad de luz natural que penetra a un espacio, también pueden constituir buenas soluciones para espacios de menor tamaño.

Una estrategia de luz natural puede ser caracterizada por sus parámetros de desempeño. Estos parámetros incluyen cantidad y distribución de luz, deslumbramiento, costo y uso de energía. Estos parámetros se definen y describen en un contexto global e internacional. Se incluyen aspectos de ahorro de energía y sistemas de control y evaluación.

Se incorporan aspectos de sistemas de vanguardia de luz natural que pueden aplicarse a edificios nuevos y a remodelación, especialmente en los casos de gran potencial de ahorro, tales como edificios de oficinas, escuelas y edificios comerciales e institucionales. Los sistemas también se clasifican de acuerdo a si cuentan o no con sistemas de protección solar, y se incluyen matrices y tablas para muy diversas situaciones. Las descripciones de sistemas detallados incluyen: repisas lumínicas, persianas, paneles y películas prismáticas, paneles fabricados por medio de rayo láser, materiales que redirigen y desvían la luz, elementos ópticos holográficos y sistemas anidólicos. Se proporciona, en cada caso, una matriz seguida por información detallada sobre cada sistema. Esta información incluye, para cada sistema, una

descripción técnica, factores relacionados a su aplicación, métodos de control, costos, y potencial de ahorro de energía, ejemplos de su uso, y, en la mayor parte de los casos, resultados medibles.

La correcta integración de la luz natural con la luz artificial asegura que se utilice de manera eficiente la energía y que se controle el deslumbramiento. Esta integración solo puede lograrse a través de una cuidadosa coordinación entre la iluminación artificial y natural.

Este documento resume las herramientas de diseño de luz natural más novedosas, con énfasis en aquellas que se abocan a los sistemas de vanguardia. El diseño de la iluminación natural es un proceso analítico, dado que tiene como objetivo generar soluciones arquitectónicas y técnicas adecuadas, a la vez que reducir el consumo de energía en los edificios y debe tener una fundamentación científica. Información cualitativa al igual que retroalimentación visual sobre un concepto específico son igual de importantes al diseñador que solamente información cuantitativa. Dado que hay tantos parámetros que deben considerarse para el diseño de luz natural, las herramientas de diseño juegan un papel muy importante en el proceso de la toma de decisiones, por lo que deben incorporarse en todas las fases del proyecto arquitectónico. Estas herramientas proporcionan el apoyo que requiere el diseñador, o los diseñadores, al desarrollar la secuencia de decisiones que conduce a la formulación de conceptos de luz natural hasta la implementación final de las estrategias de luz natural en edificios reales.

Todavía se requiere mucha investigación en las áreas de la respuesta humana y aceptación por parte del usuario en los sistemas de luz natural, elemento crítico para cualquier diseño de luz natural. También se necesita trabajar mucho con los equipos y programas que deberán desarrollarse para la integración de la iluminación natural en el proyecto arquitectónico.

## 5.0 La próxima revolución en el diseño arquitectónico y las estrategias de luz natural

Estamos al borde de una revolución en el diseño arquitectónico. Están a la mano estrategias y materiales que consumen menos energía para operar, que contaminan menos, que son mucho más confiables y habitables y que pueden integrarse a los edificios modernos, y con un costo menor que aquellos que emplean sistemas y materiales tradicionales. El



éxito requiere un acercamiento sistemático que empieza en el prediseño y continúa a través del proceso del proyecto a la construcción y ocupación y operación. El ingrediente importante requerido para lograr el éxito es una herramienta que le facilita al diseñador entender las consecuencias de sus decisiones conforme evoluciona el proyecto y que puede usarse para evaluar el funcionamiento del edificio. El equilibrio apropiado de estrategias y su aplicación correcta es un asunto complejo, dependiendo de cómo se usa el edificio, del clima, y del contexto local. Los conflictos que surgen entre aprovechar el calor solar en invierno, pero evitarlo durante el verano, en obtener suficiente luz natural, y seleccionar el equipo apropiado, pueden resolverse a través del uso más eficaz de elementos de diseño. La luz natural de día surge como la directriz de diseño en la mayoría de los edificios comerciales e institucionales.

Ahorro en la reducción de equipos de climatización al aprovechar los efectos de radiación solar usando luz natural de día puede proporcionar los recursos para lograr otras mejoras. Las herramientas apropiadas de diseño permiten evaluar estos problemas interrelacionados de una manera conjunta. Resultados monitoreados de muchos de los edificios más exitosos, muestran que se puede economizar hasta en más del 50% en la energía empleada para climatización e iluminación si se toman las decisiones correctas durante las etapas de proyecto—sin aumentar el costo de la construcción—resultando en edificios que proporcionan mejor calidad de vida y mejores ambientes de trabajo para los usuarios.

Enfatizo la necesidad de considerar sistemáticamente la triple interacción entre los requerimientos de calefacción, refrigeración e iluminación en un edificio. Contrario a los criterios tradicionales se puede demostrar que, a través de un buen proyecto, pueden reducirse las cargas de energía de los tres y sin un incremento en el costo inicial.

Utilizando un enfoque sistémico y con un procedimiento de evaluación de manera paralela al proceso de desarrollo del proyecto desde las primeras etapas, se pueden lograr cambios revolucionarios en el futuro del diseño arquitectónico.

¿Qué pasaría si se pudieran proyectar edificios que requiriesen mitad de la energía que hoy consumen, que contaminaran mitad de lo que contaminan, que esto no significara un aumento en su costo, y que proporcionaran una mejor calidad de vida y mejores condiciones de trabajo para los usuarios? Y ¿Qué sucedería si el secreto de estos logros radicara en un mejor diseño y no en tecnologías de vanguardia con todo tipo de instalaciones y dispositivos de moda, que tanto encantan a fabricantes, vendedores y demasiados arquitectos, como también, muchos clientes? Se pensaría que tales resultados atraerían la inmediata y muy difundida atención de toda la comunidad dedicada a la construcción. La realidad es que ambos supuestos son ciertos. También es verdad que no se les da atención a estos hechos. Posiblemente suena demasiado bueno para ser realidad.

Eventualmente la noticia penetrará a los reaccionarios gremios de la arquitectura y la construcción, tan repletos de tradición y malas costumbres. Al crecer las evidencias; al aumentar el número de diseñadores que conocen y usan las técnicas correctas de diseño; al aumentar la cantidad de edificios que demuestran que sí se puede construir de otras maneras más eficientes y funcionales a la vez que agradables para el usuario, y sin requerir de muchas complicaciones; al incrementar las presiones sociales para intentar resolver algunos de los problemas de contaminación y emisión de gases con efecto invernadero, resultados directos de la construcción; y, mientras más personas experimenten esos edificios “*verdes*” de primera mano, se alcanzará un momento crítico en que la arquitectura sustentable tendrá que ser la norma.

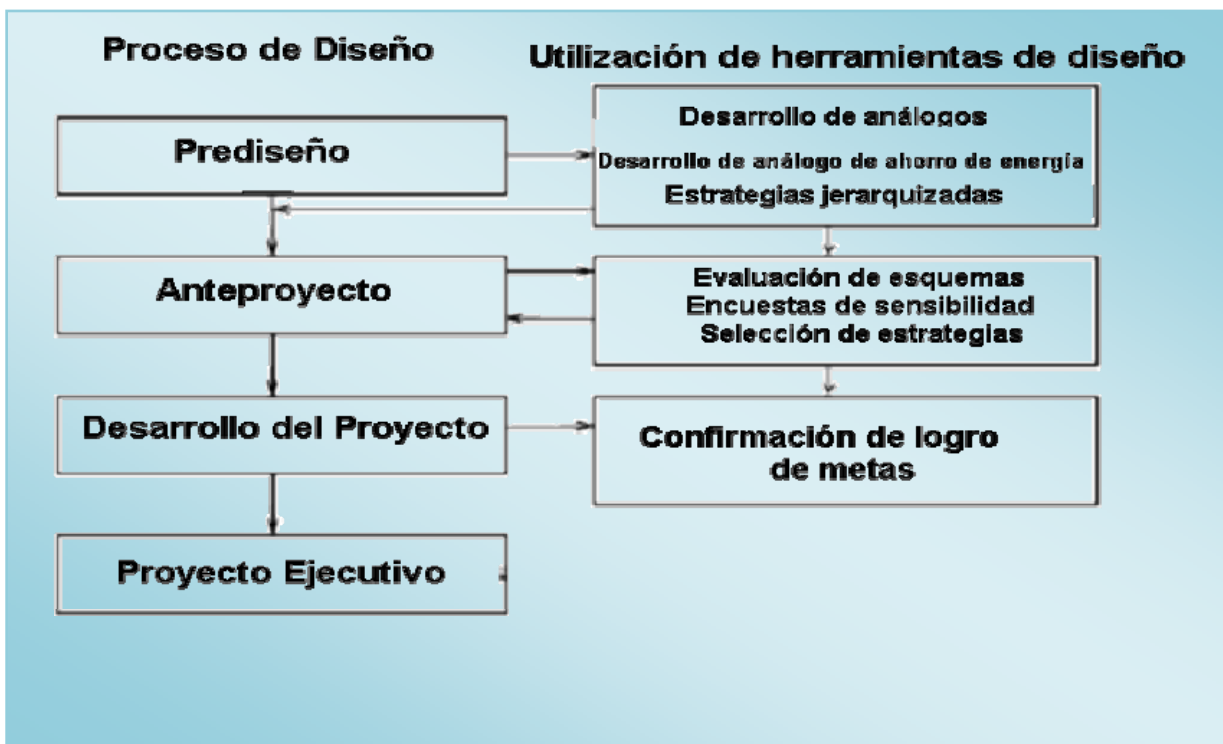
La experiencia nos enseña que la evolución no es necesariamente un proceso monótono, gradual, incremental, como aparenta ser, sino que se caracteriza frecuentemente por cambios abruptos debidos a desilusión, aburrimiento, o presión externa irresistible. Históricamente, el diseño arquitectónico ha sufrido esos tipo de cambios abruptos. Después de tales transformaciones, se dan procesos de refinamiento y elaboración hasta que ocurra la siguiente modificación abrupta.



Entre las estrategias del diseño arquitectónico, el empleo de la iluminación natural de día — o sea, el uso de la luz solar y del cielo para reemplazar la luz artificial — llena un nicho único. *Se puede establecer como el punto más importante del reto del diseño arquitectónico actual.* Debido a que la iluminación natural determina en gran medida la forma y la disposición de los distintos espacios y elementos de un edificio, la decisión de utilizar la luz de día tiene que tomarse desde las primeras etapas del proceso de diseño. Se puede fundamentar que las razones más importantes por las que debemos aprovechar la iluminación natural son, en orden de importancia:

1. Mejorar las condiciones ambientales de los espacios interiores
2. Promover el bienestar y las actividades productivas de los usuarios
3. Disminuir las cargas de energía eléctrica
4. Reducir las emisiones de contaminantes de las plantas generadoras de energía, incluyendo CO<sub>2</sub>, SO<sub>2</sub>, y NO<sub>2</sub>, y
5. Ahorrar energía y costos de operación.

Proponemos paralelamente el siguiente proceso para asegurar el logro de objetivos con respecto al empleo de la luz natural y su consecuente apoyo a la meta de una arquitectura sustentable a través del ahorro de energía resultante.



## 5.1 Panorama de iluminación a través de luz natural de día

La luz natural se refiere a la admisión de luz del cielo hacia espacios interiores y es el factor clave en el diseño de edificios comerciales eficientes en el uso de energía. Bien empleada, puede resultar en ahorro de energía substancial, reduciendo la necesidad del uso de luz artificial. El objetivo principal de la luz natural es el de proporcionar suficiente luz para cualquier situación en que se realizan tareas visuales dentro de un espacio. Si no se puede lograr el nivel de iluminación adecuado por medio de la luz natural, se debe emplear luz artificial suplementaria sobre la tarea visual.

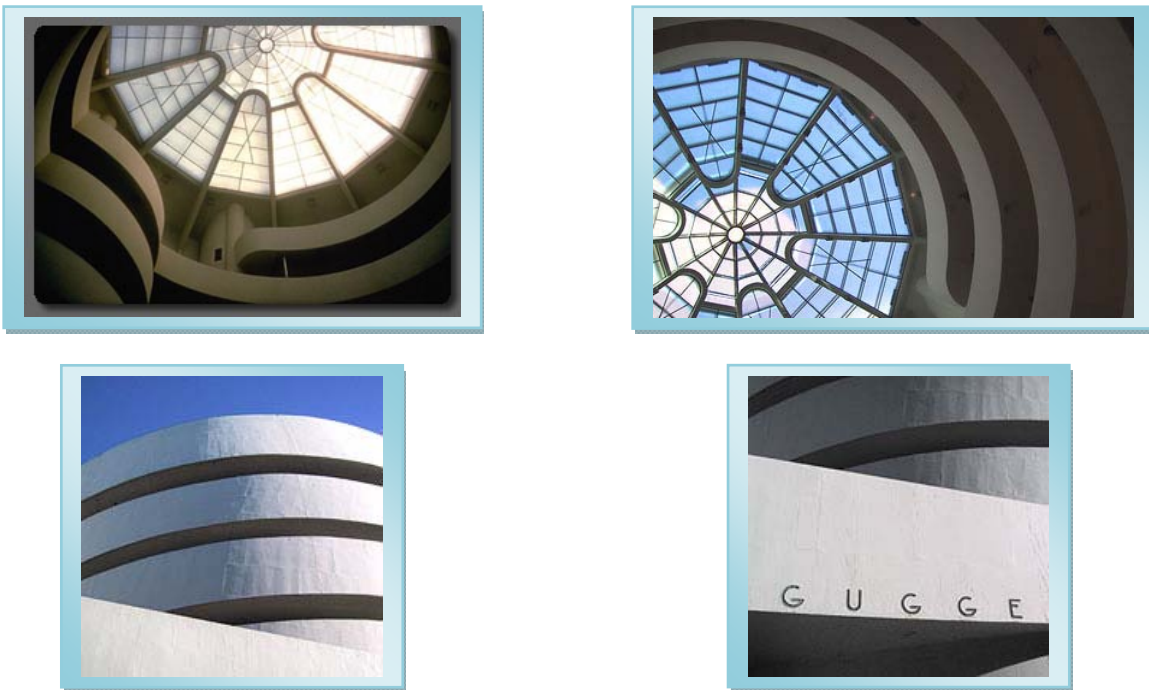


Figura1 - Museo Guggenheim, Nueva York, obra de Frank LLOYD Wright

En un día de verano despejado los niveles de luz al exterior pueden llegar a alcanzar de 100,000 a 120,000 luxes sobre una superficie horizontal, mientras que en un día oscuro nublado de invierno este nivel puede bajar de entre 4000 y 5000 luxes, dependiendo de la latitud del lugar. Los niveles de iluminación dentro de los edificios cubren un rango desde 100 luxes en un pasillo de acceso, 300 luxes en un escritorio de una oficina normal, 800 sobre un escritorio y hasta 1200 luxes para aparadores en un supermercado. Con análisis y diseño innovador la iluminación natural puede proporcionar suficiente luz para casi cualquier situación en cualquier tipo de edificio.



## Luz natural de día y luz solar

Luz natural de día se refiere al nivel de luz natural difusa que proviene de la bóveda celeste circundante o reflejada por superficies adyacentes. Luz solar se refiere a la luz directa del sol y es de mucha mayor intensidad que la luz natural ambiental.

La posición del sol en el cielo varía a lo largo de un día y, en muchos casos, cuando se le observa desde un punto en particular, frecuentemente está obstruida por nubes, árboles, u otros edificios. También experimenta cambios significativos de intensidad en distintas épocas de año, por lo que no es una fuente muy confiable ni constante de luz para iluminar el interior de un edificio. También su intensidad es tal que puede ser una fuente importante de deslumbramiento cuando incide sobre una superficie de trabajo o cuando es reflejada por la pantalla de una computadora. Debido a esto, la luz solar directa rara vez se incluye en los cálculos de iluminación natural arquitectónica.

La luz natural de día, sin embargo, puede ser una fuente de luz muy efectiva, aún en los días más oscuros y nublados. Los niveles de luz natural también pueden ser muy variables y dependen de la cantidad y tipo de nube en el cielo y la hora del día. Sin embargo, existe un rango de modelos matemáticos que permiten calcular qué tan luminosas son las distintas partes del cielo en distintas condiciones. Estos modelos nos permiten seleccionar las situaciones que se encuentran en las peores condiciones, para que, alrededor de éstas, se determine la iluminación del edificio. Para mayor información véase el tema Distribución Lumínica.



Figura 2 - La diferencia entre un espacio iluminado con luz solar o luz natural de día

## Eficiencia Lumínica

La luz y el calor normalmente se dan simultáneamente; sin embargo, la cantidad de calor que producen distintas fuentes de luz con la misma intensidad pueden variar de manera importante. Sucede que, en función del número de lúmenes por watt de energía calorífica, la luz de día difusa es aproximadamente 5 veces más eficiente que un bulbo incandescente y hasta 2 veces más que un tubo fluorescente. En un edificio típico de oficinas el apagar la luz artificial y sustituirla por luz natural de día puede reducir las cargas de calor total hasta en un 40 por ciento, especialmente en los espacios cercanos a las ventanas de la periferia.

Fuente le luz	Eficiencia ( lúmenes de luz / Watt de calor)
Sol directo (altitud baja)	90 lm/w
Sol directo (altitud elevada)	117 lm/w
Sol directo (altitud media)	100 lm/w
Cielo difuso (despejado)	150 lm/w
Cielo difuso (promedio)	125 lm/w
Global (promedio entre sol y cielo)	115 lm/w
Incandescente (150 w)	16-40 lm/w
Fluorescente (40 w, CWX)	50-80 lm/w
Lámparas de sodio a alta presión	40-140 lm/w

Tabla 1 - Eficiencia de diferentes tipos de luz natural y lámparas eléctricas.

La tabla anterior muestra el hecho de que la eficiencia lumínica de la luz directa solar también es mucho más elevada que la de casi todas las alternativas comunes eléctricas. Sin embargo, también es considerablemente más intensa, por lo que va a introducir fuertes ganancias de calor si penetra en el edificio de manera directa en épocas del año equivocadas. Es obvio que en muchos climas esta ganancia de calor puede ser muy útil en invierno. Esto requiere un uso cuidadoso de dispositivos de control solar y de difusores de luz para proteger de la penetración solar directa en verano pero distribuyendo la luz natural dentro de los espacios arquitectónicos. Una correcta selección del tipo de cristal también es un factor importante.

Sin embargo, el factor más importante en el diseño de iluminación por luz natural es la selección de los vanos más apropiados por medio de los cuales cada espacio estará conectado con la luz natural exterior. Para mayores detalles véase el tema Sistemas de Luz Natural.

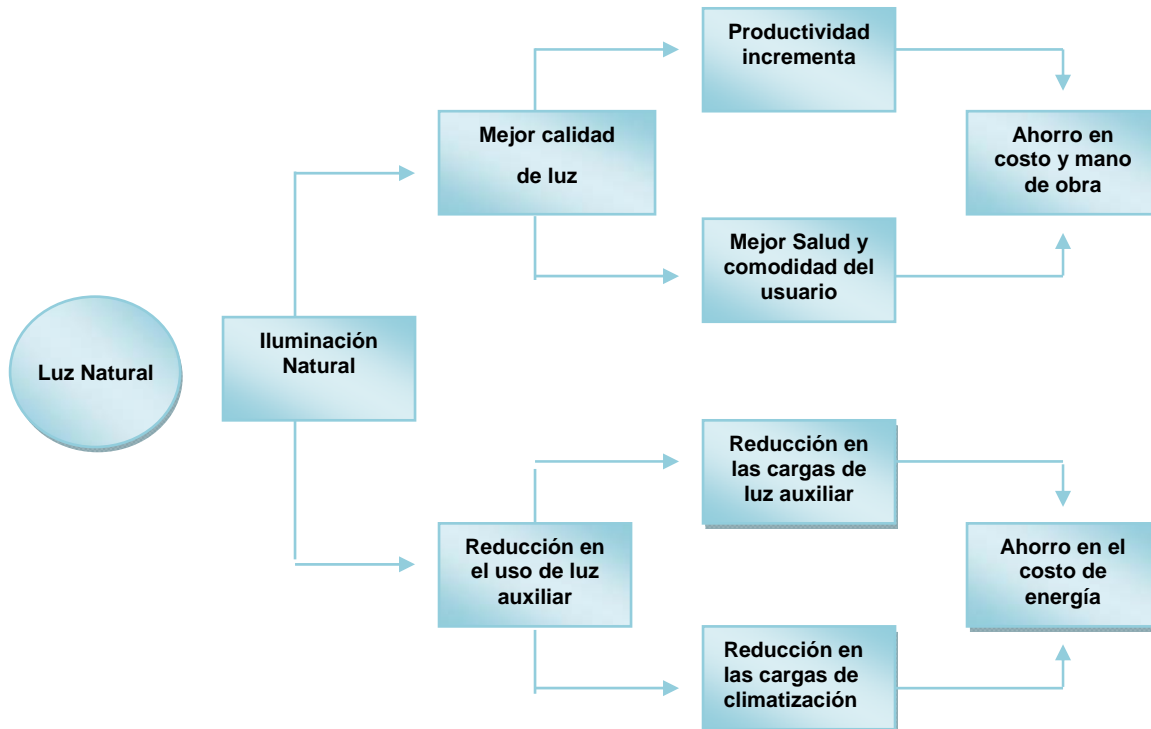


### ¿Por qué iluminación natural?

En un mundo preocupado por emisiones de carbono, calentamiento global y diseño sustentable, el uso de la iluminación natural, específicamente en edificios que no son de vivienda, se ha convertido en una muy importante estrategia para aumentar el ahorro de energía, minimizando las cargas de iluminación artificial y de climatización. La introducción de estrategias y sistemas de iluminación natural puede reducir considerablemente el consumo de energía eléctrica y también mejorar significativamente la calidad de la iluminación en espacios interiores.

Todos los edificios reciben luz natural. Sin embargo, un edificio iluminado por medio de luz natural está específicamente diseñado para utilizar luz natural de manera eficiente a través de componentes adaptados y estrategias de control. La meta del diseño de iluminación natural en minimizar el uso de energía y maximizar el bienestar del usuario.

Los beneficios de la iluminación natural son de gran alcance, tal como lo ilustra el siguiente diagrama:



## 5.2 Ventajas de iluminar un edificio a través de luz natural

### Mejor calidad de luz

La calidad de luz se refiere a desempeño visual, comodidad y capacidad visual. La luz natural representa la fuente de luz visible de espectro completo. Es decir, proporciona la misma distribución espectral que la luz solar, en otras palabras, la misma mezcla de colores y tipos de luz.

A diferencia de la luz eléctrica, que a veces proporciona un rango espectral limitado a que se concentra en el rango azul-verde o amarillo-verde, la luz natural de día es mejor para la visión humana.

La iluminación natural también puede proporcionar cualquier nivel de iluminación (iluminancia) a través de un adecuado diseño. Estas características inherentes de la luz natural contribuyen a mejorar la calidad de la iluminación aumentando la capacidad de discriminación de los colores y del detalle.

### Mejor salud y comodidad para el usuario

Otro aspecto de la iluminación natural es su variabilidad durante el día, lográndose mayor interés visual, evitando de esta manera la monotonía sensorial que aburre y cansa. La vista humana se adapta fácilmente a cambios graduales en la iluminación; cambios que se logran difícilmente por medio de la luz artificial.

La investigación indica que la variación que se da a través de la luz natural da como resultado una reacción biológica positiva. También se cree que el trabajar en un ambiente con iluminación natural produce menos stress y molestar emocional.

Bajos niveles de iluminación en el invierno son causa de grandes alteraciones en estados de ánimo. Esta escasez de luz puede dar lugar a lo que se le conoce como síndrome de desorden afectivo estacional (Seasonal Affective Disorder - SAD) en que las personas experimentan depresión, fatiga, hipersomnia y un aumento en el consumo de alimentos, y por ende un edificio mal iluminado con bajos niveles de iluminación durante todo el año puede también ser causa de obesidad que es uno de los principales problemas de México.

La falta de luz también afecta la secreción de la hormona melatonina producida por la glándula pineal. Cambiando la cantidad de secreción de la melatonina puede afectar el sueño, la temperatura corporal, y puede dar lugar al desarrollo de tumores.

Un efecto fisiológico importante de exposición a la luz mediante la vista es la sincronización de los biorritmos al tiempo u hora locales. Estorbando el reloj corporal puede causar desordenes en el dormir y en el comer. Se requieren niveles relativamente altos de iluminación (arriba de 2000 luxes) para reajustar el reloj biológico del cuerpo. Debemos considerar si conviene establecer niveles de iluminación variables en los edificios siguiendo un patrón diario con iluminancias pico a medio día, en vez de mantener niveles fijos constantes. Cuando las medidas de iluminación natural resultan en vanos de mayor tamaño, la sensación de bienestar por parte de los usuarios aumenta a través de una mayor exposición a los entornos exteriores. La calidad del panorama visual se determina por su contenido de información y se maximiza cuando se incluyen los siguientes tres elementos:

El Horizonte, los objetos verticales contenidos inmediatamente de bajo del horizonte por ejemplo árboles y edificios, y los objetos horizontales en la parte inferior del panorama (por ejemplo calles, prados).

### **Productividad incrementada**

Las personas expuestas a luz natural son más productivas, más eficientes, faltan menos al trabajo debido a enfermedad.

## 6.0 Iluminación natural de día

Cuando se diseña correctamente y se integra de manera eficaz al sistema de iluminación artificial, la iluminación natural puede ofrecer un ahorro importante de energía, reemplazando una buena parte del consumo de electricidad que se emplea para iluminar. Un beneficio colateral resultante es la reducción en la capacidad de los equipos y uso de energéticos para el aire acondicionado al bajar las ganancias internas de calor debido a la iluminación artificial. Aparte del ahorro de energía, la iluminación natural generalmente da como resultado que esté más satisfecho el usuario. Estudios recientes indican que la iluminación natural aumenta la productividad y produce mejoras en la salud de los usuarios en oficinas y escuelas. Las ventanas también producen un descanso visual, un contacto con la naturaleza, una orientación con respecto a la hora del día, la posibilidad de ventilación natural y posibilidad de egreso en caso de emergencia.

Esta sección incluye los siguientes temas:

- Zona de luz natural de día
- Consideraciones sobre el diseño de vanos
- Abertura efectiva
- Repisas luminosas
- Estrategias de iluminación cenital
- Controles de luz natural de día
- Coordinación de diseño
- Modelación de luz natural de día

### Zona de luz natural de día

Un alto potencial para el empleo de luz natural se encuentra especialmente en aquellos espacios que se ocupan predominantemente de día. Un análisis solar del predio puede ayudar a evaluar el acceso a la luz natural al observar lo que “se puede percibir” desde distintas ubicaciones y orientaciones posibles de vanos.

- ¿Qué porción del cielo puede verse desde diversos lugares típicos en el espacio en donde puedan darse tareas visuales?
- ¿Cuáles son las obstrucciones en el exterior al paso de la luz natural y cuáles serían las fuentes de deslumbramiento?

- ¿El edificio que se pretende proyectar y construir va a impedir el paso de luz a algún espacio en un edificio adjunto que lo requiera y que depende de que ingrese la luz solar?

Es importante establecer cuáles son los espacios que más se van a beneficiar por el acceso de la luz natural y cuáles espacios menos lo necesitan. Dentro de los espacios que pueden hacer uso de la luz natural de día, los lugares en que van a darse las tareas visuales más exigentes deben ubicarse cerca de las ventanas. Se debe evitar colocar los vanos en línea directa con el campo visual del usuario, puesto que esto puede causar contraste extremo y deslumbramiento. Resulta óptimo orientar al usuario a 90 grados del vano. En aquellas situaciones en las que la privacidad no es importante, conviene colocar separaciones interiores de cristal que permitan la penetración de luz de un espacio que se comparte con otro por medio de una apertura sobre una puerta, cristal esmerilado, o paneles traslucidos cuando se requiere privacidad.

La configuración del proyecto en planta debe maximizar la zona de luz natural perimetral. Esto puede dar como resultado un edificio con una relación envoltura a volumen más elevado que un diseño típico compacto. Una ventana normal puede producir iluminación útil hasta una profundidad de aproximadamente 1.5 veces la altura de ese vano. Con repisas lumínicas u otros sistemas reflectores esto puede incrementarse dos o más veces. Como regla general mientras más alta sea la ubicación del vano en el muro, más profunda la penetración de luz natural.

### Consideraciones sobre el diseño de vanos

La luz natural de día que llega a una superficie de trabajo proviene de tres fuentes:

1. **El componente exterior reflejado.** Esto incluye las superficies del terreno, los pavimentos, los edificios adyacentes, las repisas, volados y elementos en el exterior cuyas dimensiones requieren que se les tome en cuenta.
2. **El componente directo sol/cielo.** Generalmente se impide el acceso al sol directo a los espacios habitados debido a las ganancias de calor y deslumbramiento que produce, y a los daños debido a radiación UV. En esos casos el domo cenital contribuye de manera importante a la iluminación natural de los espacios interiores, siempre y cuando el proyecto permita su empleo.

**3. El componente interno reflejado.** Una vez que penetra la luz natural al espacio interior, los muros interiores alrededor de los vanos, el plafón, y los pisos son reflectores de luz importantes. Conviene que todas las superficies interiores que puedan reflejar la luz natural tengan reflectancias elevadas, es decir, colores claros; de ser posible blanco, lo que resultará en niveles de iluminación adecuados y reducirá los contrastes excesivos de luminancias. Conviene que la manguitería de las ventanas sea de color claro para reducir los contrastes entre estos elementos y la vista del exterior. Los acabados de todo lo que rodea la ventana no solo debe ser de color lo más claro posible, sino también de acabado mate para evitar puntos brillantes y deslumbramientos molestos. Las repisas pueden ser reflectores de luz y, si tienen dimensiones que destacan, deben ser inclinadas hacia adentro, para reducir contrastes entre ventana y alrededores a la ventana.

Recuérdese que la superficie interior reflejante de luz más importante es siempre el plafón. Hoy en día se tiene acceso a acabados con coeficientes de reflexión del .90 o más. Cambiar la inclinación del plafón hacia la fuente de luz natural aumenta la cantidad de luz natural que se refleja por esta superficie. En locales pequeños, el muro posterior constituye la siguiente superficie más importante porque esto impacta directamente en la luz reflejada dentro del espacio.

Las instalaciones y mobiliario básicos tales como cubículos o mamparas pueden tener un impacto significativo sobre la cantidad de luz que se refleja, por lo que hay que seleccionar acabados con colores claros.

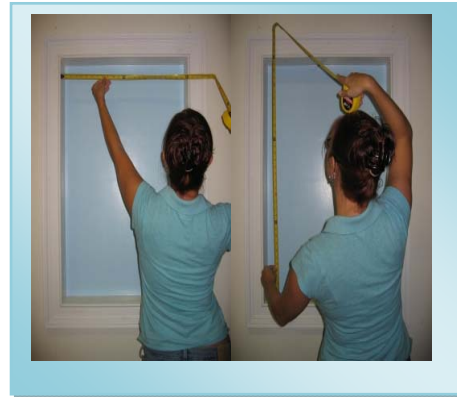
Reflectancias recomendables de las superficies del local.	
Plafones	> 80%
Muros	50 % al 70%
Pisos	20% al 40%
Muebles y otros acabados	25 al 45%

Dado que la luz no tiene escala para propósitos arquitectónicos, las proporciones de un local son más importantes que las dimensiones. Un local que tenga un plafón más alto en comparación con su profundidad va a tener una penetración de luz natural mayor que la que puede obtener de luz lateral (ventanas) o luz cenital (tragaluces, domos, etc). Elevando la parte superior de la ventana también dará como resultado una mayor penetración y una iluminación más pareja en todo el espacio. Vanos pequeños cuadrados separados por superficies opacas

en los muros resultan en iluminación muy dispareja con contrastes muy pronunciados entre la ventana y superficies de muro adyacentes. Una distribución de luz natural más pareja se logra con ventanas horizontales en forma de tiras.

### Abertura efectiva

Una manera de estimar la relación entre la cantidad de luz visible y el tamaño del vano es el **método de apertura efectiva**. La **apertura efectiva** (AE) se define como el producto de la **transmitancia visible** (TV) y la relación ventana a muro. La **relación de ventana a muro** (RVM) es la proporción de área de ventana comparada con el área total del muro en que se ubica la ventana. Por ejemplo, si una ventana cubre 5 metros cuadrados en un muro de 20 metros cuadrados,



entonces el RVM es de  $5/20$  ó  $0.25$ . Una buena selección inicial para AE está en el rango de  $0.20$  al  $0.30$  para una AE dada. Mientras mayor sea el RVM (o sea una ventana mayor) menor será la transmitancia visible.

Ejemplo:

Si  $RVM = 0.5$  (o sea la ventana equivale a mitad del muro) entonces  $TV = 0.6$ , y  $AE = 0.3$

O  $RVM = 0.75$ ,  $TV = 0.4$  para la misma de  $0.3$

Típicamente, el reducir la transmitancia visible, también reducirá el coeficiente de sombreado; pero esto debe verificarse con la información que proporcione el fabricante de cristal, dado que esto no siempre es el caso.

### Repisas lumínicas

Dado que la relación entre luminancias, conocida también como brillantez, es una consideración fundamental con respecto a ventanas que ofrecen vistas, conviene separar las aberturas para vista de las aberturas para luz natural. Esto permite una mayor transmitancia visible del cristal, en una abertura de luz natural, si esta se encuentra fuera del campo visual normal. Dado que el plafón es la superficie reflejante de luz más importante, el emplear esta superficie para rebotar la luz natural de manera profunda dentro del espacio, puede ser altamente eficaz.

Ambas de estas estrategias se utilizan en el diseño de repisas lumínicas. Una repisa lumínica es un volado horizontal que refleja luz colocada por encima del nivel de la vista, con un cristal por encima de la repisa. Este diseño, que es lo más efectivo en orientaciones que dan al sur, mejora la penetración de luz natural, crea sombra cerca de la ventana, y ayuda a reducir el deslumbramiento producido por la ventana. Repisas exteriores son dispositivos de sombreado más efectivos que las repisas interiores. Una combinación de repisas exteriores e interiores son la mejor solución, proporcionando un gradiente de iluminación parejo.



Repisas lumínicas

La luz rebota de la parte superior de la repisa lumínica hacia el plafón de la planta baja de oficinas. El volado proporciona sombra a la ventana que se encuentra por debajo de esta.

### Estrategias de luz cenital

Edificios grandes de un solo nivel y espacios que ocupan el último piso de edificios de muchas plantas, pueden aprovechar la luz cenital. Los tipos generales de luz cenital incluyen tragaluces y domos, claraboyas, monitores y techos de dientes de sierra.

### Tragaluces

Los tragaluces horizontales pueden constituir un problema de energía porque tienden a recibir las ganancias máximas solares al medio día. La contribución de luz natural también llega a su máximo al medio día y se reduce enormemente en la mañana y tarde. Existen diseños de tragaluces de alto desempeño que incorporan reflectores o lentes prismáticos que reducen el



máximo de luz natural y el máximo de ganancias de calor mientras que aumentan la cantidad natural correspondiente a las mañanas y tardes. Otra opción son los tubos de luz en los que ductos con altas reflectancias canalizan la luz del tragaluz hacia abajo a un lente difusor dentro del espacio. Estos pueden ser muy ventajosos cuando la techumbre es muy elevada.



## Claraboya

Una claraboya es cristal vertical ubicado en la parte superior de un muro interior. Claraboyas orientadas hacia el sur pueden protegerse de la luz solar directa de manera eficaz utilizando un volado bien diseñado. En este diseño el muro interior que da al norte puede tener una pendiente para aumentar la penetración de luz hacia el interior del espacio. Deben emplearse volados de color claro y adyacentes a las superficies de techos para aumentar el componente reflejado. Si no es posible proteger por el exterior, considérense deflectores

verticales interiores para difundir la luz. Una claraboya con orientación sur va a producir una cantidad mayor de luz natural que una claraboya orientada al norte. Claraboyas orientadas al oriente y poniente tienen los mismos problemas que las ventanas con la misma orientación: es muy difícil protegerlos del sol directo y tienen, potencialmente, muy elevadas ganancias de calor.



Claraboyas

Aquí las ventanas claraboya escalonadas proporcionan luz natural de día al espacio de trabajo interior

## Monitores de Techo

Un monitor de techo consiste de una sección de azotea elevada por encima de la sección de techo adyacente y a la que se le ha dotado de cristal vertical en todos sus lados. Este diseño frecuentemente resulta en un área excesiva de cristal, que, a su vez, resulta en mayores pérdidas y ganancias de calor que un diseño de claraboya. Las múltiples orientaciones del cristal también pueden causar problemas de protección solar.



## Techo de Diente de Sierra

Un techo de diente de sierra es un diseño antiguo que todavía se puede ver en edificaciones industriales. Típicamente una superficie con pendiente es opaca y la otra es de



crystal. Una techumbre contemporánea con dientes de sierra puede tener colectores solares o celdas fotovoltaicas en la superficie inclinada, con la orientación hacia el sur y cristal para penetración de luz natural en la superficie inclinada orientada al norte. Cristal sin protección en la superficie de diente de sierra orientada al sur puede dar como resultado altas ganancias de calor. En este tipo de situación un panel difusor con aislamiento puede ser una buena opción.

### Controles de luz natural de día

Un edificio diseñado para ser iluminado por luz natural, pero que no cuenta con un sistema de luz eléctrica integrada, va a ser un perdedor de energía neta debido al incremento de cargas térmicas. Sólo cuando la carga eléctrica por iluminación se reduce podrán haber ahorros de energía contrarrestando cargas de refrigeración y de electricidad. Los beneficios del uso de luz natural se maximizan cuando los sensores de ocupación e iluminación se emplean para controlar el sistema de luz artificial eléctrica.

- Sensores de ocupación detectan el que se esté empleando un espacio utilizando tecnologías pasivas de infrarrojo, ultrasónico, o combinados. Cuando ya no se detecta ni el calor ni el movimiento del usuario, y después de un intervalo de tiempo preestablecido el sensor va a emitir una señal para apagar las luces. Sensores de ocupación utilizados sin detectores térmicos funcionan bien para espacios de poco uso o uso intermitente, tales como bodegas, espacios para descansar, o hasta pasillos.
- Sensores de nivel de iluminación tienen un “ojo” fotoeléctrico que mide la iluminancia en el espacio. Umbrales de encendido y apagado pueden establecerse para responder a condiciones específicas de iluminación. Estos sensores pueden operar con interruptores de encendido y apagado para varias luminarias o lámparas dentro de las luminarias y también pueden operar a través de un sistema de atenuación continuo. Sistemas de atenuación continua obviamente van a costar más que sistemas de interrupción, pero proporcionan una mayor satisfacción al usuario por que el cambio en el nivel de iluminación no es tan perceptible.
- Sistemas de luz fluorescente son las fuentes de control de luz natural más usuales por la disponibilidad de interrupción escalonada y de sistemas de atenuación. Fuentes de descarga de alta intensidad (HID) no son generalmente una buena selección para interrumpir los sistemas integrados a la luz natural debido a que requieren tiempos de encendido y reencendido muy extensos. Existen hoy en día fuentes HID de dos pasos que pueden ser útiles en ciertos casos de interrupción escalonada cuando la modalidad

apagado no es deseable durante un día típico. Un diseño de luz natural debe usar ambos sensores de ocupación e iluminación. Con las dos estrategias de control las luces se encenderán solo cuando el espacio está ocupado y sólo si la luz natural es insuficiente. En la mayor parte de los diseños se proporciona un sistema manual de suplante para la conveniencia del usuario.

### **Coordinación de Diseño**

Al usar la luz natural la iluminación eléctrica y el diseño interior requieren de consideración muy especial.

- **Coordinación de diseño de luz eléctrica artificial**

La coordinación del diseño de luz eléctrica con el diseño de luz natural es de extrema importancia para el éxito del sistema. El proyecto e instalación del sistema debe corresponder al tipo de abertura de luz natural.

En un sistema típico de luz natural lateral, por medio de vanos a lo largo de un muro resulta mejor colocar las luminarias en filas paralelas al muro de los vanos y con circuitos ubicados de tal manera que la fila más cercana a las ventanas sea la primera en atenuarse o apagarse, seguida por las filas sucesivas.

- **Coordinación del diseño interior.**

Con el propósito de mantener el desempeño proyectado por parte del sistema de iluminación natural, el diseñador responsable de los acabados interiores y el mobiliario debe conocer los valores de reflectancia deseados. Acabados interiores oscuros pueden dar al traste con un diseño excelente de luz natural.

### **Modelando la luz natural de día**

Los modelos físicos son un método muy efectivo de analizar el desempeño de luz natural. Los modelos más simples pueden empezar a informar al diseñador de cómo se va a comportar la luz natural dentro del edificio. Es importante que las aberturas de luz natural se modelen con precisión y que los materiales empleados para construir el modelo tengan los valores correctos de reflectancia. Entonces el modelo puede ser evaluado en el lugar real del espacio o bajo condiciones artificiales en un laboratorio de luz natural. Un reloj solar para latitud de 36 grados norte anexo a la base del modelo le permite al diseñador simular varias fechas o épocas del año. Un análisis por computadora es otro método de probar una solución de luz natural. Varios

programas de iluminación tales como *Lumen-micro*, *Radiance*, y *Lightscape* tienen integrados cálculos de luz natural. Típicamente un modelo tridimensional digital se construye utilizando software tipo CAD que posteriormente se importa dentro del software de iluminación. Los programas luego requieren que el operador defina todas las características de todas las superficies, las condiciones del cielo, la ubicación, la fecha y la hora. Muchos de estos programas producen dibujos de presentación que parecen fotografías del diseño propuesto.



## 7.0 Diseño de luz natural

La dificultad con el diseño de la iluminación consiste en que no sólo se tiene que tomar en cuenta una enorme cantidad de fenómenos físicos, sino también un igualmente grande número de factores funcionales, formales y emocionales; y todos deben equilibrarse y combinarse. Frecuentemente algunos de éstos entran en conflicto con algunos otros; pero todos tienen que considerarse para producir un enfoque holístico al diseño de la iluminación.

Los diseños de la iluminación generalmente se basaban en la información que se encuentra en reglamentos y normas. Casi todos los métodos del diseño de la iluminación se derivan de la investigación empírica y de la experiencia. Tales métodos requieren de revisiones continuas, dado que la tecnología de la iluminación en la que se fundamentan progresa continuamente. Una solución potencial a esta necesidad recurrente de actualizar los métodos empíricos de diseño consiste en desarrollar modelos generales basados en una comprensión teórica de los requerimientos de la vista humana.

Una manera en que el diseño de la iluminación puede concebirse es utilizando un enfoque estructurado con una lista de los requerimientos principales. Una situación específica va a necesitar sus propias adecuaciones a una lista básica, pero el siguiente cuadro incluye los elementos principales:

- Iluminación para la función visual
- Iluminación para deleite visual
- Iluminación e integración arquitectónica
- Iluminación y eficiencia energética y mantenimiento

Vistas de manera conjunta los puntos anteriores pueden presentarse como un marco de referencia para el diseño como se ilustra a continuación.

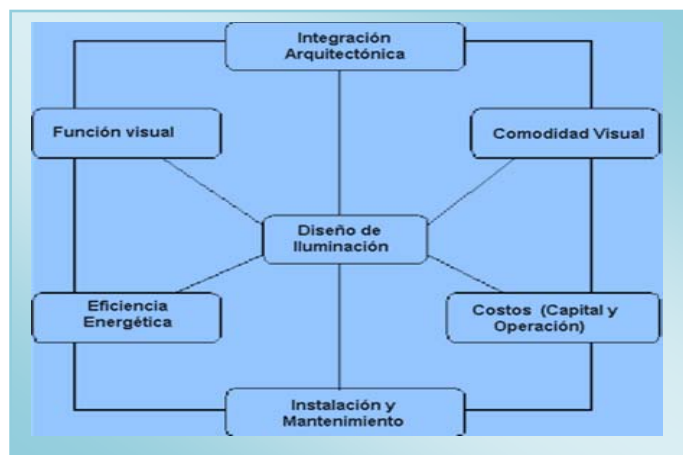


Figura1 – Marco de referencia para iluminación

## Iluminación para la función visual

Qué tan bien quieren poder ver los usuarios dentro de un edificio es el factor clave que afecta el diseño constructivo, la productividad y la satisfacción del usuario, y la operación, consumo de energía y costos a largo plazo. De esta manera, la consideración para lograr un edificio sustentable debe comenzar con el tema de calidad de iluminación que se ha de proporcionar y, posteriormente, debe pensarse en las técnicas más apropiadas para lograrlo.

Es imperativo que un diseño de iluminación satisfaga los requerimientos que impone la actividad del usuario para que puedan realizar sus actividades de manera eficiente sin incomodidad ni estrés. Cada medio ambiente requiere un nivel mínimo de iluminancia y una distribución de luminancia que no produzca incomodidad o incapacidad. De igual manera, requiere tener un grado de iluminancia y variación de luminancia para mejorar la visibilidad y proporcionar estímulo visual. Es raro que el usuario realice solamente una tarea visual en un espacio, por lo que la iluminación debe reflejar esta situación, proporcionando la opción de distintas soluciones de iluminación en el área de trabajo o en distintas áreas del edificio. Esta variedad puede también proporcionar mayor interés y calidad visuales.

En relación a la iluminancia de la tarea visual se han realizado muchos experimentos a través de los últimos 50 años para determinar la iluminancia requerida debido al tamaño del objeto visual, contrastes y desempeño visual. Estos experimentos han dado resultados semejantes. Frecuentemente se basan en el tiempo que requiere una tarea visual y la precisión con la que se lleva a cabo; sin embargo, se han referido a períodos cortos dentro de situaciones de laboratorio. Todos estos estudios se han plasmado en las muy diversos tablas, reglamentos y normas sobre iluminación.

Otro aspecto que influencia la manera en que se aplica la iluminación es la actividad o la función del espacio. En una oficina, por ejemplo, la tarea visual típica puede ser altura a nivel de un escritorio. Sin embargo, el mismo tipo de tarea visual (lectura) puede encontrarse, sin importar su ubicación, en una fábrica, en una tienda o en una vivienda. Pero, factores como los económicos, como el aspecto del espacio y la calidad de iluminación que se desea, determinan el diseño lumínico que se desarrolle. De esta manera, las estrategias generalmente conocidas o designadas como iluminación industrial, iluminación comercial, iluminación de edificios de despachos, etc. Se han desarrollado debido a soluciones para tipos de tareas visuales que se llevan a cabo en cada uno de estos espacios. Las estrategias de estos son una síntesis de teoría de ingeniería, experiencia en aplicaciones, y aceptación y deseo del usuario en cada uno de estos casos. Dado que todo esto incluye más que una evaluación objetiva de

consideraciones técnicas, es necesario relacionar el diseño de una instalación para la iluminación al uso específico que se le va a dar al espacio.

### **Iluminación para deleite visual**

Un gran número de estudios hechos por todo tipo de especialistas en iluminación han indicado la importancia de la distribución de luminancias y, en particular, las luminancias de superficies verticales. Esta cuestión será un factor fundamental para determinar si un espacio se ve acogedor o triste.

El mensaje general es que la gente responde a un ambiente agradable y su interés visual. Un estudio clásico indicó que se lograba deleite visual cuando las superficies que rodeaban el campo visual, en especial, las superficies verticales se iluminaban. Este estudio también mostró que el usuario prefería ambientes que contenían variabilidad, y a esta cualidad se le denominó **interés visual**.

La iluminación que proporciona deleite visual puede afectar el desempeño y esto puede lograrse creando un ambiente visual agradable que produce estimulación y bienestar, lo que se traduce en un mejor desempeño.

### **La iluminación y la integración arquitectónica**

La sección previa indicó que para que una instalación lumínica proporcione deleite visual se requiere que produzca una cantidad de “ligereza” e interés visual. También propuso que esto se logra iluminando superficies y distribuyendo áreas de luz y sombra adecuadas a la actividad que se desarrollará en el espacio. Sin embargo, esto tiene que hacerse tomando en cuenta la forma y tamaño de cada espacio y su relación con los espacios adjuntos.

El diseñador de la iluminación no debe imponer una solución en relación a las superficies del edificio que pudiera entrar en conflicto con la intención original del arquitecto. El diseño debe reforzar el concepto arquitectónico y no contradecirlo. Esto significa que la iluminación debe emerger de manera natural de la arquitectura y el uso que se le va a dar al objeto arquitectónico.

El aspecto de la iluminación, incluyendo la combinación de luz y luminarias, debe ser una extensión natural de la arquitectura. En la integración entre la iluminación y la arquitectura considérense lo siguientes puntos:

- La transición de la experiencia visual en la iluminación de un espacio a otro
- La configuración y forma de espacios individuales y del edificio en su totalidad, incluyendo espacios arquitectónicos
- El color y acabados de las superficies principales
- La funcionalidad de la iluminación natural

### **Iluminación, eficiencia energética y mantenimiento**

En otra época se suponía que el consumo de energía era mínimo cuando las áreas de cristal en fachada eran mínimas. Pero esas ideas se basaban en la disminución máxima de pérdidas de calor y no tomaban en cuenta la energía consumida por el sistema de iluminación y la pérdida de calor solar. Hoy en día se considera que la iluminación natural es un medio importante para mejorar el rendimiento energético de los edificios, especialmente los edificios que no son de vivienda tales como de oficinas, escuelas, fábricas y hospitales.

El rendimiento energético a través de la iluminación puede lograrse tomando en cuenta las siguientes consideraciones:

- Debe aprovecharse la luz natural en la medida en que sea posible
- Utilícense lámparas adecuadas para el propósito y de alto rendimiento
- Deben emplearse luminarias que tengan altos coeficientes de utilización y bajos factores de depreciación y que dirijan la luz hacia donde se requiera
- Utilícese luz eléctrica sólo cuando y en donde se requiera, acompañándola de controles automáticos
- Asegúrese lograr un buen mantenimiento para que no se desperdicie la luz

Resumiendo, debe aprovecharse al máximo la luz natural y debe dirigirse la luz hacia y donde se requiera. Esto significa que en vez de tener niveles uniformes de iluminación todo el tiempo, la luz debe de utilizarse de acuerdo a las funciones que va a cumplir.

El usuario prefiere personalizar su ambiente visual y cualquier sistema de control puede permitirle ajustar fácilmente la iluminación tal como lo necesite y no debe sentirse controlado por esa iluminación. De esta manera el ahorro energético en la iluminación puede indirectamente contribuir a mejorar la calidad de luz.



Todas las explicaciones anteriores implican un buen mantenimiento con respecto a luz natural y luz artificial y este buen mantenimiento debe darse durante toda la vida del edificio. Esto, a su vez requiere que la solución arquitectónica facilite el buen mantenimiento permitiendo, por ejemplo, el fácil acceso a ventanas y luminarias para su aseo, reparación y operación.

Debe existir una estrategia de mantenimiento detallada proporcionada por el diseñador para que el usuario comprenda perfectamente bien qué y cuándo debe de participar en ese mantenimiento.

### **Integración de la natural con la luz artificial**

La integración de la luz natural con la luz artificial durante el día es un elemento clave en la conservación de la energía. Sin embargo, es necesario entender el proceso de integración para conservar energía pero sin menoscabo de un ambiente cómodo y atractivo. Una solución óptima sólo puede lograrse cuando el diseño de luz natural y luz artificial se llevan simultáneamente.

Deben considerarse un número de factores en relación al diseño de un sistema integrado. Primero, la luz artificial puede utilizarse para elevar las iluminancias por luz natural a niveles adecuados para lograr una visión eficiente y cómoda. El segundo requisito es reducir las extremas variaciones de iluminancia y luminancias de las superficies que ocurren al aumentar las distancias desde las ventanas en edificios con luz lateral. La elevada luminancia del cielo causa un estado de adaptación en el ojo del observador que produce una impresión de oscuridad al fondo de un espacio. Un objetivo al utilizar luz artificial durante el día consiste en reducir este contraste, y en teoría, la iluminancia suplementaria que se proporciona debe variar con los cambios de iluminancia del cielo.

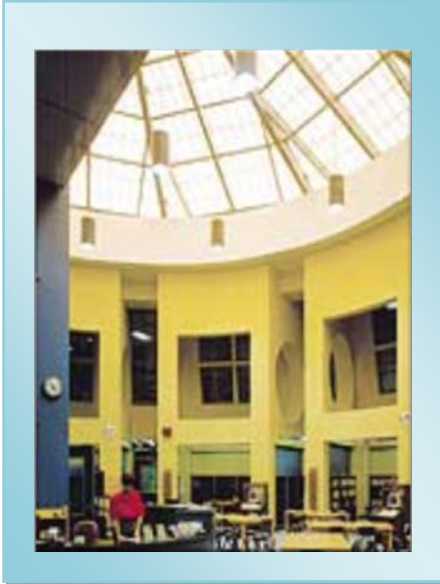
Muchos ambientes lumínicos cómodos para el trabajo visual o para el recreo son el resultado de observación acuciosa y sentido común. Arquitectos de otra época y de fama internacional como Frank Lloyd Wright y Alvar Aalto intuitivamente lograban buenos resultados de luz natural, precisamente resultado de diligente análisis y un buen juicio.

Criterios de diseño intentan asegurar que se proporcione luz en cantidad suficiente, que se distribuya de manera adecuada y que se controle el deslumbramiento. Sin embargo, no pueden garantizar que los aspectos estéticos no fácilmente cuantificables se asocien con un espacio iluminado con luz natural. Todavía no se ha establecido ningún criterio que logre ese objetivo. Los criterios necesarios se desarrollarán a través de interés de mercado, intereses



arquitectónicos y la disponibilidad de nuevas tecnologías para servir los requerimientos innovadores de diseñadores. Posiblemente ninguna cantidad de investigación tendrá como resultado reglas específicas para ser atractivo visualmente un espacio interior.

## 8.0 Luz natural de día



La iluminación natural es el uso eficiente de la luz de día de sol directo y/o de cielo con el propósito de minimizar el uso de luz artificial en los edificios y espacios arquitectónicos. Un edificio bien proyectado tomando en cuenta la iluminación natural a través de luz de día puede brindarles muchos beneficios a los dueños y usuarios de los edificios.

El aprovechar la iluminación natural puede representar un ahorro en cargas de iluminación artificial hasta de un 70% en algunos casos. Los usuarios de un espacio arquitectónico generalmente prefieren una buena solución con luz de día natural, siempre y cuando se

eviten los problemas de deslumbramiento y sobrecalentamiento.

Estudios también sugieren que la luz natural proporciona beneficios para la salud y aumenta la productividad en el trabajo. Sin embargo, a pesar de esto, se le presta poca atención al diseño lumínico por medio de luz natural.

En 1997, se estimaba que entre 20,000 a 30,000 viviendas y sólo unos cuantos cientos de edificios en Europa utilizaban tecnologías solares además de que muy pocos de éstos incorporaban una estrategia completa para el aprovechamiento de luz natural de día.

La iluminación natural de día difiere de otros suministros ambientales en que constituye un elemento fundamental arquitectónico, mientras que la iluminación artificial y las instalaciones de climatización son servicios que resuelven muy a menudo los arquitectos empleando a contratistas especializados para encargarse del problema. Cuando se contratan los servicios de un especialista en iluminación rara es la vez que se les solicita o que tengan la capacidad de desarrollar un proyecto de iluminación natural de luz de día. Aún cuando el arquitecto aborda la cuestión del diseño de las ventanas generalmente



no lo enfoca a la solución de un elemento de iluminación que puede proporcionar utilidad y calidad, sino como un elemento de fachada y una vista hacia el entorno físico exterior.

Los componentes que forman parte del sistema de luz natural se ubican dentro de tres grandes categorías:

- (1) **Componentes de conducción** – espacios empleados para guiar o distribuir la luz natural hacia el interior de un edificio y que incluye todo tipo de conductos, repisas, o plafones reflectantes.
- (2) **Componentes de paso** – aquellos que permiten que la luz pase de un espacio a otro. Éstos incluyen ventanas, tragaluces, claraboyas y elementos semejantes.
- (3) **Elementos de control** – diseñados específicamente para controlar la manera en que la luz penetra a través de un componente de paso e incluye revestimientos reflectantes o selectivos

Muchos son los factores que determinan la cantidad y calidad de luz natural que penetra a un espacio interior. Estos incluyen profundidad del espacio, el tamaño y ubicación de los vanos, las características de los materiales transparentes transmisores de luz, y las obstrucciones externas. Estos factores generalmente dependen de decisiones tomadas en las etapas iniciales del proceso de diseño de un edificio. Un edificio bien iluminado por medio de luz natural de día puede, en muchos casos, proporcionar suficiente luz durante la mayor parte del día para actividades generales tales como circular, y luz adecuada para trabajar durante la mayor parte del año. El potencial para luz natural obviamente depende de factores climáticos y particularmente de orientación y latitud. Para aprovechar los beneficios de luz natural conviene contar con un sistema de control automatizado para que no se utilice la luz artificial innecesariamente y se complemente con la natural de maneras precisas, lo cual puede requerir de tecnología informática, incluyendo información continua obtenida por medio de sensores o hasta vía Internet con programas especiales.



También resulta importante evitar problemas tales como el deslumbramiento y el sobrecalentamiento, que pueden derivarse de un exceso de radiación solar directa, por lo que deben proporcionarse los elementos de protección solar apropiada. Estos elementos pueden ser fijos y/o móviles, internos o externos. Dado que, generalmente, las partes de un sistema de iluminación natural son integrales a la arquitectura de un edificio, las tecnologías se han empleado en edificios nuevos incorporándolas desde las primeras etapas del proceso de diseño. Aplicar tecnologías de luz natural en situaciones de remodelación puede resultar muy costoso debido a que puede requerir renovación de gran alcance. Sin embargo, probablemente mejorará todo el funcionamiento del edificio en cuanto a ahorro de energía y pudiera representar ahorro económico a largo plazo.

### Consumo de energía



La iluminación artificial constituye una parte fundamental de la electricidad empleada en los edificios. En oficinas de oficinas, por ejemplo, puede corresponder al 50% de todo el consumo de energía eléctrica. En edificios de vivienda cuyas plantas son de gran profundidad o longitud, la carga de iluminación puede consumir aún más energía eléctrica que las instalaciones de

climatización en climas extremos. En hospitales solamente de un 20 – 30% del consumo de electricidad es atribuible a la iluminación; en fábricas llega a ser del 15%; en escuelas entre 10% y 15%. En edificios de uso intenso tales como hospitales, el uso total de energía eléctrica es muy elevado, de tal manera que sólo de un 20 a 30% es atribuible a la iluminación; sin embargo los ahorros y costos en el consumo de energía pueden seguir siendo muy significativos.

No cabe duda de que existen muchas posibilidades para lograr ahorros reduciendo las cargas de luz artificial. En muchos edificios, la iluminación por luz natural de día puede ser la manera ideal para maximizar estos ahorros.





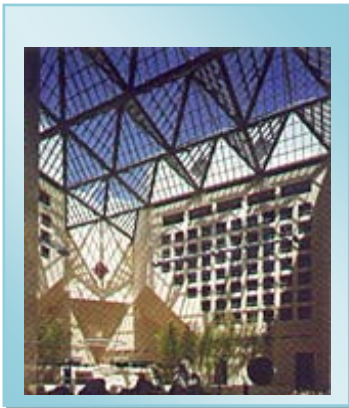
La cantidad de luz requerida en cualquier local de un edificio depende del propósito para el cual fue proyectado.

Como guía general, un pasillo puede requerir solamente un mínimo de 100 lux, mientras que un espacio en donde se realiza una tarea visual de gran precisión y detalle en un edificio comercial puede necesitar una iluminancia de más de 1000 lux.

Los niveles mínimos recomendados para locales tales como oficinas y aulas es de entre 300 y 500 lux. Obviamente la iluminancia requerida va a afectar el que la luz natural de día pueda o no cumplir con estos requerimientos durante períodos prolongados durante un día y así determinar la necesidad de utilizar luz artificial suplementaria.

La mayor parte de los sistemas de luz natural de día son elementos arquitectónicos estáticos que no consumen energía en su utilización. Otras estrategias, tales como dispositivos automáticos de protección solar pueden emplear pequeñas cantidades de energía, pero este consumo resulta insignificante comparado con los ahorros producidos.

### El potencial para el ahorro de energía



A la fecha ha habido poca actualización en el diseño arquitectónico para maximizar el uso de la energía solar, incluyendo los aspectos de aprovechamiento de luz natural, en edificios no de vivienda. El uso de luz natural por sí solo no resulta en ahorro directo de energía eléctrica, pero los ahorros sí se dan cuando se reduce el consumo de luz artificial por medio de la capacidad que representa el uso de la luz de día. Hay pocos edificios de vivienda en que la luz natural puede cumplir con todos los requerimientos de cantidad de iluminación, pero, al mismo tiempo, casi no existen edificios en que la luz natural no puede contribuir a la reducción en el consumo de energía. La síntesis de un espacio bien iluminado a través de luz natural combinado con un sistema de luz artificial bien controlado puede producir ahorros energéticos del orden de entre 30% y 70% en edificios de oficinas. La principal desventaja de la luz natural radica en su variabilidad y poco confiable en su intensidad. Esto significa que no puede funcionar sin que se complemente con luz artificial. Un edificio iluminado con luz natural requiere que se acompañe con un apropiado sistema de luz artificial en días nublados y al anochecer.



Hasta qué punto y en qué situaciones puede usarse la luz natural de día depende mayormente de las características geográficas y de clima de un lugar. Éstas incluyen latitud, orientación del edificio, fluctuaciones en las horas disponibles de luz natural debido a la estación, hora del día y condiciones meteorológicas. Edificios ubicados en latitudes

muy al norte requerirán mayor cantidad de luz artificial suplementaria en invierno y menos en verano que aquellos ubicados más cerca del ecuador. Otros factores que determinan la necesidad de proporcionar iluminación suplementaria incluyen calidad del aire, cercanía a edificios de gran altura, existencia de obstrucciones en la localidad, y las características reflectantes de las superficies de las obstrucciones. Deben considerarse también el calentamiento excesivo debido a ganancias de calor por soleamiento y pérdidas de calor por ausencia de aislante térmico, al implementar estrategias de luz natural. Es fundamental diseñar una estrategia que minimice el uso de instalaciones de climatización para regular la temperatura de un espacio arquitectónico. También constituye un reto para arquitectos y diseñadores el asegurar la distribución uniforme de luz natural en un local. Aún cuando el espacio próximo a los vanos puede contar con una iluminancia muy adecuada, el lado opuesto del espacio probablemente no tendrá una cantidad de luz suficiente. Es importante intentar lograr un diseño que proporcione luz de nivel uniforme, y de no ser esto posible, compensar por medio de luz artificial suplementaria. Existen muy variadas estrategias para lograr lo anterior y deben considerarse cuidadosamente los factores indicados para seleccionar la estrategia apropiada a cada situación.

### Ventanas verticales



Las ventanas verticales convencionales constituyen la manera más común y simple de proporcionar luz natural de día pero son menos efectivas que los vanos en el techo. Tienen máxima efectividad para iluminar superficies verticales que dan la cara y están próximas a la superficie de cristal o transparente del vano. Para la mayor parte de las tareas visuales, una superficie de ventana de

aproximadamente un 20% del área de piso proporcionará una iluminación por luz natural adecuada hasta una profundidad del local de cerca de 1.5 a 2.5 veces la altura del local. Locales de mayor profundidad requerirán luz artificial suplementaria. Luz natural que emplea vanos verticales es más dependiente de la geometría del local que el empleo de vanos en el techo. Los locales de poca profundidad en que todas las superficies a iluminar se encuentran próximas a los vanos son los que más se beneficiarán por medio de la iluminación natural, mientras que en locales más profundos con superficies más alejadas de los vanos, el efecto será menor, pero aún significativo. Prevalece la costumbre de maximizar las áreas de ventana, para mejorar el nivel de iluminación o iluminancia. Esta práctica puede contrarrestar la capacidad de ahorro de energía causando muy diversos niveles de brillantez o luminancia en el espacio arquitectónico y, consecuentemente requiriendo mayor cantidad de luz artificial para equilibrar el ambiente lumínico.

### Revestimientos

Las superficies exageradamente grandes de cristal en fachadas afectan el resto de los sistemas del edificio de manera dramática. Sin embargo, se pueden adoptar varias medidas para reducir los efectos negativos. Una de estas medidas requiere utilizar cristal especial en las ventanas que reduzca entre un 60% y 80% la transmisión de calor.

### Dispositivos de control solar



El control solar utilizando persianas controladas automáticamente proporciona otra alternativa para maximizar la luz natural sin afectar los demás componentes del edificio. Generalmente, la protección solar externa proporciona la mejor solución para no dejar pasar el calor al interior de un edificio. Persianas o elementos semejantes al interior de los espacios protegen a los usuarios del deslumbramiento inmediato y la luz solar directa, pero, una vez que penetra la radiación infrarroja pasando a través del cristal, la mayor parte de ese calor queda atrapado en el espacio interior y debe extraerse por medio de ventilación o refrigeración mecánica. Pero, por el otro lado, elementos exteriores de protección solar requieren de limpieza frecuente, por lo que tienen que desarrollarse todo tipo de soluciones ingeniosas innovadoras.



### Atrios y pasajes bajo cristal



Los atrios representan una de las más tradicionales estrategias para introducir luz natural a los locales. Son patios interiores con techumbres de cristal o algún otro material transparente y se les considera como parte de la construcción a la que acompañan. Permiten la penetración de luz natural a las profundidades de las partes centrales del edificio y proporcionan espacios agradables a los usuarios. Los pasajes bajo cristal son espacios semejantes pero de mayor longitud, como calles que pueden comunicar varios edificios. Atrios cubiertos con cristal brindan los

mismos beneficios de iluminación que los patios y plazas, pero con características térmicas muy mejoradas.

### Tragaluces y vanos en techumbres



Vanos en techumbres también conocidos como tragaluces son dispositivos que permiten la penetración de luz natural a través de los techos. El empleo de luz horizontal cenital proporciona aproximadamente tres veces más luz natural que una ventana vertical del mismo tamaño. Los tragaluces se pueden colocar al centro de un espacio lográndose una distribución más uniforme de luz en el espacio. El flujo hacia debajo de la luz natural combina eficazmente con el flujo vertical de luz artificial, y cuando esto se combina con un sistema automático de control puede representar un ahorro de energía importante. Sin embargo, la luz cenital solar directa puede causar problemas de sobrecalentamiento, por lo que debe asegurarse algún sistema de control solar

apropiado para evitar esa transferencia de calor.

Tradicionalmente se han empleado los atrios y vanos en techumbres para transmitir e introducir la luz natural a los espacios arquitectónicos. Hoy en día se requiere cuidar los problemas de deslumbramiento y elevación de temperatura que puede acompañar la introducción de luz natural a los espacios arquitectónicos siempre buscando nuevas y mejores estrategias.



## 9.0 Estrategias de luz natural

### Luz natural como deleite

El desarrollo de luz artificial al alcance de casi todos en la forma de luz fluorescente compacta ha hecho que muchos cuestionen el que sea realmente necesaria la iluminación natural. ¿Por qué no excluir ese ambiente natural caprichoso, dicen los que proponen eliminar la luz natural de los espacios arquitectónicos, y por qué no mejor proporcionar un ambiente estable controlado en el que la iluminación, la climatización y todo lo ambiental están bajo control preciso, especialmente en la era del edificio inteligente?

Se dice que no existe evidencia que demuestre que desarrollar actividades de manera continua con luz artificial puede producir daño a la vista o al bienestar general de las personas. Este es el argumento que emplean los que se preocupan por buenas y suficientes razones en promover el mayor posible uso de luz artificial en los edificios las 24 horas del día. Sin embargo, resulta razonable dirigir el argumento en sentido contrario: solicitar evidencia de que mejora la vista o algún aspecto de salud al trabajar continuamente en un espacio iluminado con luz artificial en comparación con una iluminación natural.

Al examinar el asunto desde ese punto de vista, la evidencia apunta hacia preferir la iluminación natural. Nunca se ha comprobado beneficio alguno a la salud o la vista por el empleo de luz artificial. Durante más de cinco décadas las normas en relación a iluminación artificial en escuelas son mucho más estrictas que anteriormente. Sin embargo no se ha notado mejoría alguna en cuanto a la aparición de defectos visuales en los jóvenes.

Sin embargo, si existen pruebas de que el privar a las personas de luz natural de día causa desordenes de salud, ya sea somáticos, es decir, desajustes en las funciones físicas del cuerpo, o sicosomáticas, en otras palabras, trastornos nerviosos de diversos tipos que conducen a malestares o enfermedad. La evidencia para esto, como es de pensarse, proviene de países nórdicos como Suecia, Finlandia y Rusia, en que hay pocas horas de luz en los meses de invierno, ocasionando el bien conocido SAD (Seasonal Affective Disorder = Desorden Afectivo Estacional).

## Beneficios y estrategias de luz natural

La luz natural difiere de la luz artificial de muchas maneras. El contenido espectral de la luz natural cubre un rango de frecuencia mucho más amplio que el que permite la tecnología existente de la iluminación artificial. La luz natural es difusa, llegando a los espacios arquitectónicos desde grandes regiones del domo celeste. Esto crea configuraciones de luz totalmente diferentes a las que pueden darse a través de luz artificial, la cual es generalmente muy direccional. Los niveles de luz natural son muy variables a largo y corto plazo – las nubes pasan a través de cielo durante el día y a nivel anual las estaciones cambian. En comparación, los niveles de luz artificial son relativamente constantes.

Utilizando la luz natural para la iluminación interior no solo produce un efecto de comodidad visual y bienestar general, pero también va a afectar el uso de energía dentro de los edificios. Si se le toma en cuenta desde la etapa de diseño, el uso de la iluminación natural puede resultar en un considerable ahorro general de energía, el cual va a depender de la disponibilidad de luz natural; el tamaño, ubicación y orientación de los vanos, de los niveles de iluminancia requeridos, y de la cantidad de mecanismos de control empleados para responder a los diversos niveles de iluminación natural.

Si se le mide en función de eficiencia lumínica, el rendimiento de luz natural es considerablemente mayor que el de emplear alternativas eléctricas de uso común. De esta manera, la luz natural da lugar a menores ganancias de calor que la mayor parte de las alternativas eléctricas para los mismos niveles de iluminancia. Dado que casi toda la energía de cualquier fuente de luz eventualmente se convierte en calor dentro de un edificio, el correcto uso de la luz natural puede también reducir las cargas de refrigeración para los sistemas de aire acondicionado.

Como puede verse en la tabla siguiente, el rendimiento lumínico de la luz solar directa es considerablemente mayor que la de cualquier alternativa eléctrica de uso común. Aún cuando no tan efectiva como la luz natural difusa, la luz natural directa sigue siendo una estrategia muy recomendable para reducir las cargas de refrigeración en edificios debido a la iluminación. Debido a que la luz solar directa puede producir problemas de deslumbramiento y ganancias de calor en ciertos lugares específicos, debe procurarse lograr un diseño que asegure que la luz

solar se distribuya correctamente dentro del edificio y se utilice adecuadamente para propósitos de iluminación.

Fuente le luz	Eficiencia ( lúmenes de luz / Watt de calor)
Sol directo (altitud baja)	90 lm/w
Sol directo (altitud elevada)	117 lm/w
Sol directo (altitud media)	100 lm/w
Cielo difuso (despejado)	<b>150 lm/w</b>
Cielo difuso (promedio)	<b>125 lm/w</b>
Global (promedio entre sol y cielo)	115 lm/w
Incandescente (150 w)	16-40 lm/w
Fluorescente (40 w, CWX)	50-80 lm/w
Lámparas de sodio a alta presión	40-140 lm/w

Tabla 1 – Rendimiento de varios tipos de luz natural y de lámparas eléctricas

### Puntos fundamentales

La luz natural en un edificio es mucho más complicada que solamente poner cristal en las fachadas. Como se indica en el párrafo anterior, deben evitarse las ganancias de calor localizadas en puntos específicos y debe lograrse distribuir la luz de manera pareja en el espacio, especialmente en áreas interiores más remotas. El satisfacer estos criterios requiere ponerle atención al tamaño, orientación y protección solar de los vanos, junto con una mucho mayor integración de todos los sistemas dentro del edificio. Es importante analizar todas las posibilidades disponibles a los arquitectos para aprovechar todos los beneficios que ofrece la luz natural. Los diseñadores que logran estos objetivos se verán recompensados con una calidad espacial muy superior, una iluminación muy bien lograda, además de ahorro en el consumo de energía.

A pesar de ser una fuente eficiente y predilecta de luz natural, frecuentemente el diseñador de iluminación toma en cuenta solamente la posibilidad de iluminación artificial en muchos edificios, cuando que la mayor parte del año, en muchísimos países, se da una abundancia de luz natural utilizable.



Imágenes mostrando el uso de iluminación natural complementada por medio de luz artificial

Una diferencia fundamental entre luz natural y luz artificial es la variabilidad inherente de la luz natural y su impredecibilidad, los niveles de iluminación fluctúan al moverse las nubes a través del cielo, sucesivamente obscureciendo y revelando el sol. Por lo menos un estudio ha concluido que esta variabilidad añade interés al interior iluminado a través de luz natural y tiene un efecto relajante sobre los ojos, produciendo reacciones psicológicas ventajosas en los usuarios. Sin embargo, no es una fuente de luz confiable.

Por lo anterior, qué tanto debe utilizarse la luz natural en los edificios depende de la disponibilidad de información en un lugar, en relación a la cantidad de luz natural que se requiere en un punto al interior del edificio.

Cálculos en relación al posible ahorro de energía, debido a la integración de luz natural dentro del sistema de luz artificial, puede lograrse, utilizando tablas sobre niveles de iluminación solar directa y del cielo. Para un amplio rango de niveles de iluminación estas tablas proporcionan el porcentaje de tiempo durante un año en el que los niveles de iluminación se exceden en relación a un valor específico entre las 9:00 am y las 5:00 pm. Después de que el diseñador ha establecido el nivel de luz requerido y haya determinado, a través de un cálculo simple, el FLD, es posible fijar el número de horas en que no va a requerirse luz artificial, y por ende, lograr un ahorro de energía potencial.



Convencionalmente el uso de iluminación natural en los edificios depende de ventanas laterales y claraboyas o tragaluces, para admitir luz natural dentro de los espacios interiores. La profundidad a la que la luz natural puede penetrar y proporcionar la iluminancia requerida va a depender del método de ingreso. Aparte, al articular los muros del edificio y utilizar atrios y pozos de luz uno puede abrir el espacio interior a la luz natural.

Se han estudiado otros métodos para mejorar la penetración de luz y éstos dependen principalmente en redirigir la luz solar a través de métodos activos o pasivos utilizando espejos, repisas lumínicas, persianas o lentes, utilizando trayectorias y sistemas que no produzcan deslumbramientos.

En la mayor parte de los casos, se requiere rastrear o alguna forma equivalente de ajuste automático para obtener un sistema eficiente, pero su éxito depende también de un buen mantenimiento y disponibilidad de luz directa solar.

En casos en que la luz natural debe conducirse desde el cielo y sol directo hacia interiores profundos de manera pasiva, es decir, sin rastreo, entonces es necesario recoger la luz lo más posible del hemisferio celeste y condensar su volumen para transmitirlo. En ambos sistemas, activo y pasivo, también es necesario minimizar las pérdidas durante transmisión y descargar la luz de manera eficiente al espacio que lo requiere.

### **Estrategias efectivas de diseño**

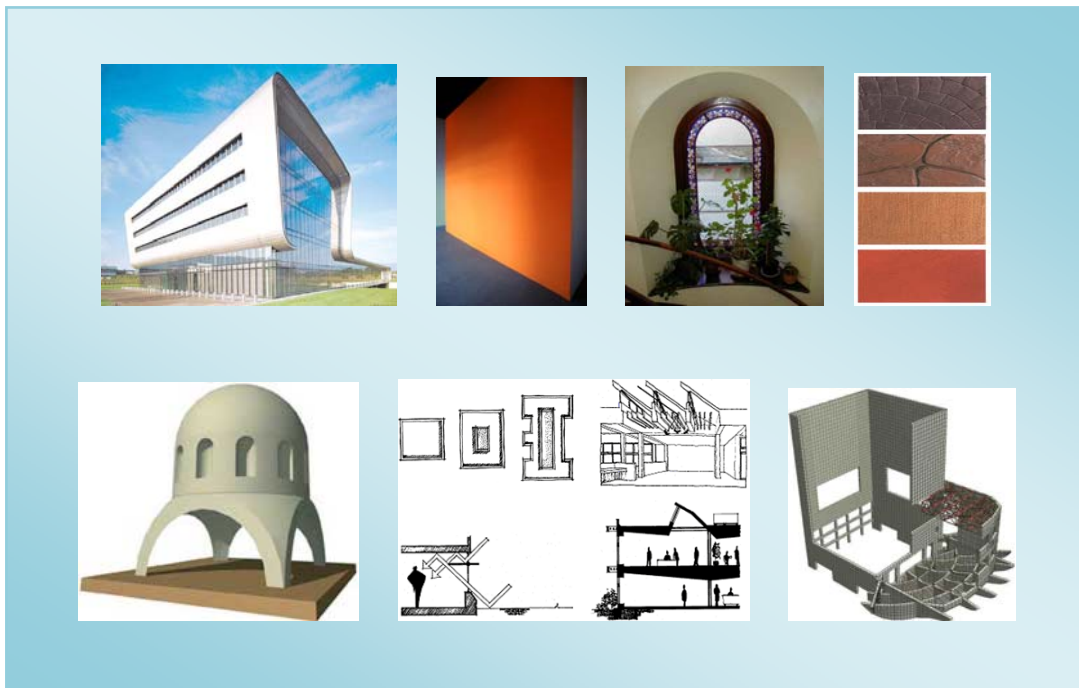
Las soluciones más adecuadas de luz natural dependen del tipo de edificio, al igual que su ocupación. En vivienda, por ejemplo, las preocupaciones fundamentales pudieran ser pérdidas de calor en invierno y calor solar en verano. En edificios de tipo comercial, el objetivo pudiera ser maximizar vistas y minimizar deslumbramientos. El uso efectivo de luz natural, por ende, requiere atención específica y detallada a la función que debe cumplir cada espacio en relación a la cantidad y calidad de luz requerida.

Dado el amplio rango de funciones que cumplen los edificios y la diversidad de actividades que se realizan dentro de ellos, no es posible establecer una sola estrategia particular de diseño para cada situación específica. Más bien, es posible identificar un conjunto de problemas comunes con respecto a la iluminación natural, que son aplicables a un amplio rango de

situaciones y, entonces, examinar algunas estrategias de diseño que puedan ser particularmente apropiadas para resolver los problemas que contienen.

El nivel y distribución de luz natural dentro de una envolvente construida depende principalmente de los siguientes tres factores:

1. Las características geométricas de la envolvente
2. La ubicación y orientación de las ventanas y otras aberturas
3. El tipo de acabados



La solución en el diseño de luz natural tiene como objetivo manejar estos factores de tal manera que ambos: (1) los requerimientos de iluminación de todas las actividades dentro del espacio y (2) el intento estético del arquitecto se cumplan. Ciertas maneras de utilizar los espacios requieren niveles de iluminación específicos y patrones de distribución particulares. Ciertos tipos de locales establecen restricciones geométricas en la disponibilidad de luz y, por ende, cantidad y calidad de luz natural.



Estas situaciones se presentan a continuación:

### **Edificios de Oficinas:**

En los cuales el problema principal de diseño es iluminar una planta de grandes dimensiones con un plafón de poca altura, utilizando sólo ventanas laterales.



### **Fábricas:**

Dada la preocupación por la seguridad, el problema de diseño en una fábrica consiste en proporcionar altos niveles de luz omnidireccional en todas las partes de los espacios que se caracterizan por tener gran volumen y relativamente altos plafones



### **Vivienda:**

En vivienda se dan relativamente muchos espacios pequeños con exposición a luz natural en sólo una o dos direcciones en que el objetivo consiste en proporcionar niveles adecuados de luz, aún cuando, la única ventana, por ejemplo, esté orientada en sentido contrario al sol.



Aún cuando los casos anteriores son típicos de situaciones particulares, son útiles y relevantes a muchas otras situaciones. Por ejemplo, una pequeña oficina subdividida puede tratarse efectivamente como una vivienda, mientras que un gimnasio u otra instalación deportiva pudiera parecerse, en cuanto a problemas de luz natural, a una fábrica.

## 10.0 Sistemas de iluminación natural

La iluminación natural es el uso eficiente de la luz natural para minimizar la necesidad del empleo de luz artificial en los edificios. Un buen proyecto arquitectónico diseñado incorporando de manera importante la iluminación natural, puede resultar en un buen número de ventajas y beneficios para habitantes y propietarios del edificio. El aumentar los niveles de iluminación natural dentro de los espacios arquitectónicos puede reducir las cargas de luz eléctrica hasta en un 70 % en algunos casos.

Los ocupantes del edificio, generalmente prefieren un espacio iluminado correctamente con luz natural, siempre y cuando se eviten los problemas de deslumbramiento y ganancias excesivas de calor.

Estudios sugieren que la luz natural también produce beneficios para la salud y la productividad, sin embargo a pesar de los beneficios potenciales se le da poca atención al diseño de la iluminación natural.

La iluminación natural representa la piedra angular del diseño arquitectónico sustentable que emplea de manera eficiente los recursos y da como resultado un alto desempeño en cuanto al funcionamiento de los espacios arquitectónicos.

La iluminación natural afecta a los usuarios de manera consciente e inconsciente, proporciona luz para ver el ambiente de trabajo, impone un ritmo natural que determina los ciclos del día y estaciones, y un estímulo biológico para las hormonas que regulan los sistemas del cuerpo y los estados de ánimo.

Además, ofrece oportunidades para lograr ventilación natural y si se integra correctamente con el sistema de luz eléctrica, puede dar lugar a un enorme ahorro de energía.

Las ventajas de luz natural se traducen en alto desempeño de los usuarios; estudios indican que se logra mayor productividad en cualquier tipo de edificio y en particular, mejores calificaciones en escuelas.

### Panorama general

La iluminación natural puede introducirse a través de ventanas, puertas de cristal al igual que por medio de tragaluces, domos y otros dispositivos de luz cenital. Vamos a utilizar el término de “vano” para referirnos a estas aberturas que utilizan cristal.

La ubicación diseño (forma y tamaño) y la selección de materiales para estos vanos son de extrema importancia y pueden dar como resultado un buen o mal diseño y un buen o mal desempeño para el edificio en general. Los vanos influyen en el ahorro de energía determinando en gran medida cargas de climatización y cargas de energía debidas a iluminación.

La comodidad visual se ve grandemente afectada por medio de la ubicación de vanos, control solar y materiales de transmisión de luz (virios y cristales). Ventanas bien diseñadas pueden resultar en deleite visual. Pero ventanas mal diseñadas pueden resultar en una fuente importante de deslumbramiento. Un mal diseño en cuanto a vanos, puede dar lugar a incomodidad térmica.

Sin aislamiento térmico pueden aumentar la incomodidad en invierno y en verano, disminuyendo y aumentando las temperaturas mientras que un coeficiente de transmisión bajo va a aumentar la comodidad térmica. De igual manera, ventanas orientadas al oriente y poniente y ventanas hacia el sur sin control solar pueden ser causa de cargas excesivas de refrigeración y aunque vanos laterales y cenitales proporcionan oportunidades para lograr ventilación natural, deben ser diseñados para lograr espacios con seguridad y de fácil operación y mantenimiento.

#### **Ventajas de la iluminación natural:**

- **Desempeño general**
- **Ahorro de energía**
- **Iluminación mejorada**
- **Conexión con la naturaleza**
- **Mejoras en la salud**

#### **Principios básicos de iluminación natural**

Los siguientes son los principios fundamentales en el diseño de iluminación natural

1. Prevenir la penetración directa de luz solar en los espacios arquitectónicos
2. Proveer luz suave y uniforme a lo largo de los espacios arquitectónicos
3. Evitar la generación de fuentes de deslumbramiento
4. Permitir el control de la iluminación natural mediante el uso de cortinas o persianas.

5. Diseñar un sistema de iluminación eléctrica que se complemente con el diseño de iluminación natural, promoviendo el ahorro del consumo de energía eléctrica mediante el empleo de controles fotosensibles a los niveles de iluminación.
6. Diseñar los espacios interiores para aprovechar al máximo las condiciones de luz natural.

### 10.1 Tipos de sistemas de iluminación natural

Obviamente hay muchas maneras de permitir la penetración de luz natural dentro de los espacios arquitectónicos dentro de un edificio. Sin embargo podemos generalizar que los sistemas de luz natural pueden clasificarse en 5 tipos principales como se indica a continuación. Cada tipo debe considerarse que contiene 2 partes: (1) una abertura para recoger la luz natural y (2) un sistema de distribución para controlar o dirigir la luz dentro del espacio.

#### Ventanas verticales

Las ventanas verticales es el tipo de sistemas más común de luz natural. Muchos espacios tienen ventanas solo en un lado; sin embargo en ese caso los niveles de iluminación disminuyen rápidamente al entrar dentro del espacio. Como regla general luz de día útil solo va a llegar a una distancia 2.5 veces la altura del nivel superior de la ventana por encima del plano de trabajo (generalmente considerando el plano de trabajo a una altura del piso 60 centímetros) en un edificio de oficinas con una altura de ventana de 2.5 metros esto significa un máximo de entre 5 y 7 metros.



Figura 1- Corte mostrando la distribución de luz de una instalación con una ventana vertical de un solo lado

Como regla general, luz natural útil solo penetrará a una distancia de 2.5 veces la altura de la ventana por encima del plano de trabajo (generalmente se toma como ejemplo un escritorio con una altura de 60 cm). En un edificio de oficinas típico con una altura de ventana de 2.5 m. esto significa un máximo de aproximadamente de 5 a 7 metros.

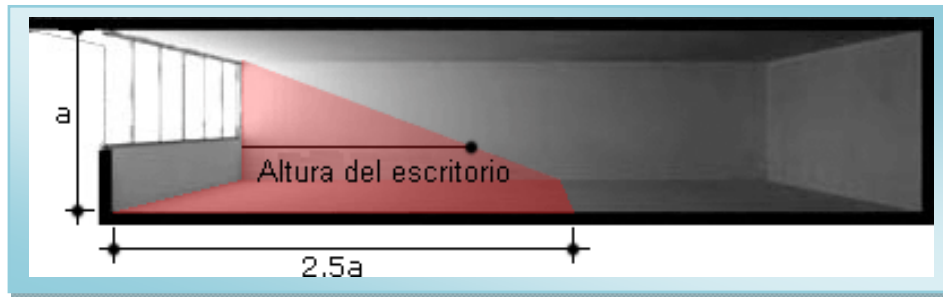


Figura 2 - Como regla general, la luz penetra 2.5 veces la altura de la ventana

Esto puede superarse hasta cierto punto añadiendo ventanas en varios lados del espacio o utilizando sistemas de distribución como repisas de luz o cristal prismático para dirigir parte de la luz hacia el plafón lo que provocara que penetre la luz a mayor profundidad dentro del espacio.

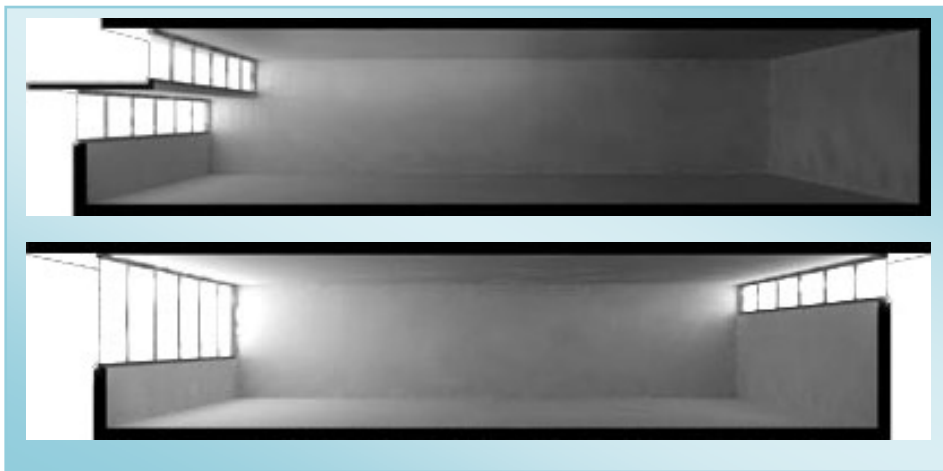


Figura 3 - Distribución de luz con ventanas verticales en 2 lados  
o con una repisa de luz reflejante en uno de los lados

Hay dos cuestiones importantes que recordar con espacios iluminados lateralmente. La primera es que bajo las peores condiciones de cielo nublado la luz natural del cielo cerca del horizonte es solamente aproximadamente una tercera parte de la del cenit; por lo que ventanas largas estrechas horizontales no van a proporcionar tanta luz por unidad de superficie como ventanas más altas verticales. Sin embargo, las ventanas de mayor altura requieren más control solar para evitar la penetración solar directa.

La segunda cuestión es que la dirección general de la luz que penetra en el espacio se va convirtiendo en más horizontal conforme mas se adentra en el espacio, provocando sombras cada vez mas largas y de menor contraste.

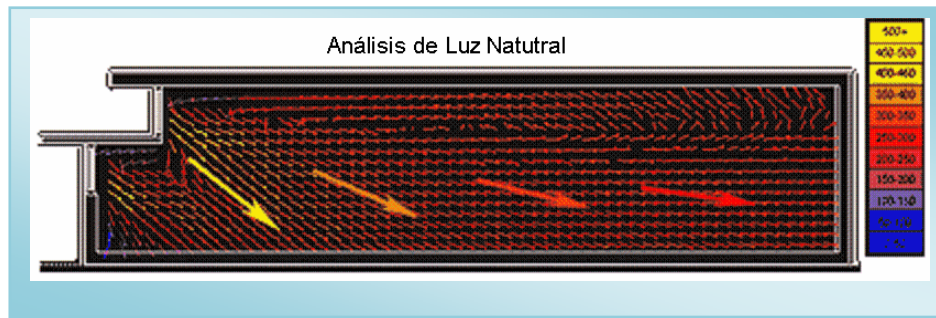


Figura 4 - Corte mostrando como los vectores de iluminación se vuelven más horizontales al penetrar la luz lateral de manera más profunda en el espacio

### Tragaluces

Los tragaluces son aberturas en los techos de un edificio. Aun cuando los tragaluces proporcionan excelentes niveles de luz natural, es difícil controlar el haz directo de radiación solar del sol cuando esta directamente desde el cenit. Deben utilizarse persianas anguladas o algún otro tipo de protección solar ajustable de acuerdo a la estación, especialmente en climas calidos.



Figura 5 - El efecto de tragaluces en la distribución de luz natural

Dada su ubicación en el techo los tragaluces tienden a ganar y perder calor por conducción y convección más que otros tipos de vanos. Deben evitarse los tragaluces con ventilación dado que pueden causar corrientes de aire. En lo posible deben emplearse tragaluces con doble cristal para reducir las pérdidas de calor por conducción. Existe en el mercado una gran variedad de sistemas a través de persianas que pueden proporcionar protección solar en verano pero al mismo tiempo permitiendo una gran cantidad de luz natural en invierno.

### Tragaluces en techumbres de dientes de sierra

Aberturas en dientes de sierra constituyen una técnica de luz cenital lograda utilizando un elemento vertical de cristal y una techumbre inclinada. El elemento de distribución de luz puede ser una o varias superficies de color claro inclinadas de tal manera que reflejen, desvíen y posteriormente dirijan la luz a espacio que así lo requieran o el mismo plafón inclinado y hasta una persiana deflectora.

Un tragaluz en un diente de sierra que da hacia el ecuador tiene que estar protegido de la misma manera que cualquier otro vano con dirección al ecuador, generalmente extendiendo el techo inclinado para que proporcione un volado protector con respecto a la penetración solar.



Figura 6 - La distribución de luz natural a través de un sistema de dientes de sierra

Cristal en otro techo de diente de sierra que no este orientado hacia el ecuador va a proporcionar luz de día difusa sin penetración solar directa por lo que no requiere protección solar horizontal; sin embargo hay que cuidar las altitudes solares bajas que se dan al amanecer y al atardecer en el verano. Cristal en techumbres de dientes de sierra orientados hacia el este u oeste es mucho más difícil de proteger dado que cada día el sol sale y se pone con una inclinación muy pequeña, resultando en una penetración directa. A menos de que se pueda proteger adecuadamente debe de evitarse este tipo de iluminación hacia el poniente u oriente.

En la medida de lo posible se debe de utilizar vanos con doble cristal y bien selladas para evitar pérdidas o ganancias de calor por infiltración o exfiltración.

### Monitor o tragaluz tipo linternilla

Una abertura tipo linternilla o monitor es semejante al techo de diente de sierra pero tiene 2 cristales similares opuestos elevados por encima del techo. El sistema de distribución también puede estar constituido por desviadores de color claro o por el plafón del monitor.





Figura 7 - La distribución de luz natural utilizando un monitor o linternilla

## Atrio

El atrio o pozo de luz es una técnica de iluminación central que se emplea en muchos edificios contemporáneos de muchos niveles. El centro del edificio se abre hacia arriba contando con un vano con cristal en la parte superior de edificio. El perímetro exterior se ilumina a través de ventanas normales mientras que el centro se ilumina con luz del atrio por medio de luz difusa.

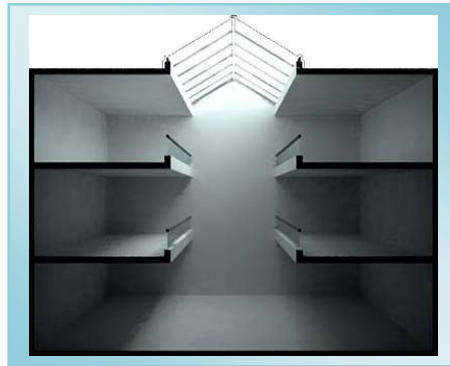


Figura 8 - Distribución de luz natural por medio de un atrio central

La relación entre la altura y el ancho del pozo de luz no debe de ser mayor que de 2: 1 en la mayoría de los casos. Si no se puede lograr esta relación es posible utilizar difusores colgantes dentro del espacio del atrio para reflejar la luz hacia los lados y por ende penetrar más profundamente a los espacios adyacentes internos.



Figura 9 - Un ejemplo de un atrio iluminado centralmente

Un atrio central no es la única manera de lograr un pozo de luz- también es posible conducir luz natural a través de “ductos” que penetran profundamente dentro de un espacio. Si los lados de este pozo de luz están cubiertos de materiales altamente reflejantes pueden constituir una solución muy eficiente de luz natural en aquellos lugares en que no se pueden colocar ventanas.

La figura siguiente muestra como el añadir posos de luz a cada lado del edificio atrio puede aumentar de manera importante el nivel de luz general y proporcionarles a los espacios generalmente inaccesibles una manera de conectarlos con el exterior.

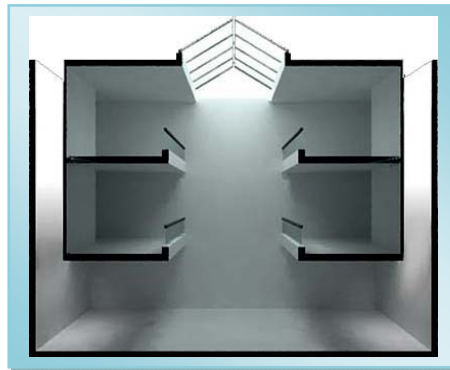


Figura 10 - Un ejemplo del uso de posos de luz con ductos altamente reflejantes para dirigir la luz a la profundidad de luz a espacios inaccesibles

## 11.0 Distribución lumínica del cielo

La fuente principal de luz en el cielo es obviamente el propio sol. Sin embargo, como resultado de la dispersión atmosférica y la reflexión por parte de las nubes, el domo celeste entero también emite luz. La distribución general de luz sobre el domo celeste, por ende, depende de las condiciones ambientales del momento. La figura siguiente, ilustra el rango de diferentes condiciones del cielo que muestran qué tan variable puede ser la distribución de luz.

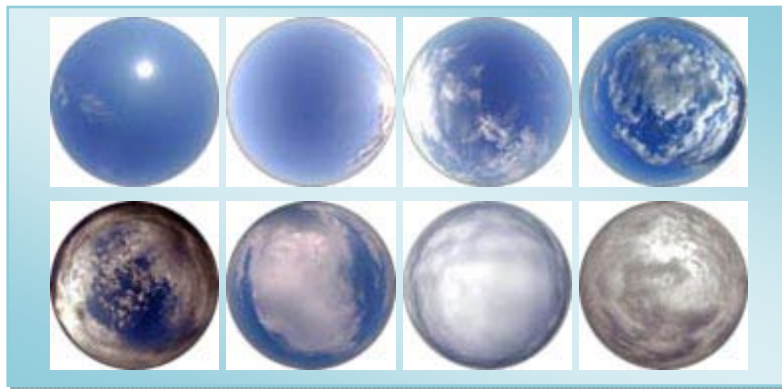


Figura 1 - Ejemplo de distintas distribuciones del cielo

Estas imágenes son el resultado de obtener fotografías utilizando un lente de ojo de pez. Tales imágenes capturan el hemisferio completo del cielo, con el horizonte alrededor del perímetro y el cenit al centro. Un ejemplo de tal lente se muestra en la siguiente figura junto con una imagen tomada en el área construida para claramente ilustrar el horizonte.



Figura 2 - Un lente de ojo de pez y las imágenes resultantes que toma

## Modelos de cielo estandarizados

Al formarse las nubes y moverse a través del cielo, la distribución de luz puede cambiar casi de minuto a minuto. Esto significa que no podemos realmente diseñar para alguna distribución específica, sino que debemos basarnos en condiciones “promedio”. La Commission Internationale de l'Eclairage (CIE) ha desarrollado una serie de modelos matemáticos de distribuciones lumínicas ideales bajo diferentes condiciones de cielo - de las cuales las tres más comunes son: despejado, uniforme y nublado. Sin embargo, hay muy distintos tipos de cielo y muy distintos tipos de modelos matemáticos para describirlos.

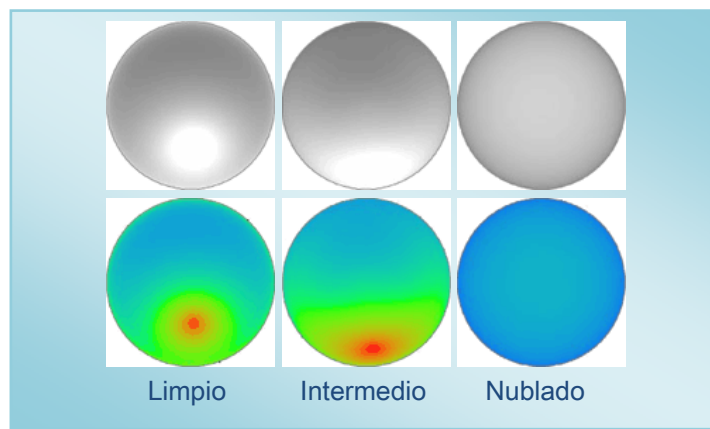


Figura 3 - Una comparación de los tres principales modelos de cielo de la CIE

Cada uno de estos modelos supone que el domo celeste completo tiene algún nivel de iluminancia, variando de ángulo desde el horizonte al cenit, y con el ángulo relativo desde la posición del cielo del momento de interés. El cielo obtiene esta iluminancia de la luz solar que se dispersa a través de moléculas de aire o partículas suspendidas y reflejadas por el vapor de agua y nubes. Como peor escenario se emplea la condición de cielo nublado. Sin embargo, en algunas zonas tropicales los investigadores consideran que el modelo de cielo uniforme es más apropiado. Para el Reino Unido el BRE recomienda el uso de un cielo promedio basado en su propio modelo matemático.

### Cielo nublado de la CIE

El modelo de distribución de cielo nublado se basa totalmente en un cielo nublado en el que el cielo y su posición no son aparentes. La transmisión de la radiación a través de las nubes generalmente produce una luz casi blanca debido a la mezcla que se da por gotas de humedad

de gran tamaño y que afectan todas las frecuencias de luz. Sin embargo, si la atmósfera está muy contaminada y el aspecto del cielo nublado puede ser levemente amarillo.

La distribución de iluminancia en tal cielo es simétrica alrededor del cenit más bajos en el horizonte que de frente. Dada una luminancia en el cenit ( $L_z$ ) y su altitud ( $a$ ), la iluminancia ( $L$ ) en cualquier punto en el cielo está dada por:

$$L = L_z \frac{1 + 2 \sin(a)}{3}$$

Analizando esta fórmula podemos ver que la iluminancia en el cenit cuando  $a = 90$ , es tres veces más brillante que en el horizonte cuando  $a = 0$ . Esto es importante, dado que significa que tragaluces serán mucho más eficientes para la luz natural por unidad de área que vanos laterales, dado que permiten que penetre una mayor cantidad de luz.

### Cielo uniforme de la CIE

Como sugiere el nombre, este modelo representa un cielo con un valor constante de iluminancia. De esta manera, no importa qué parte del cielo se mire. El modelo va a dar un valor constante de 1.0.

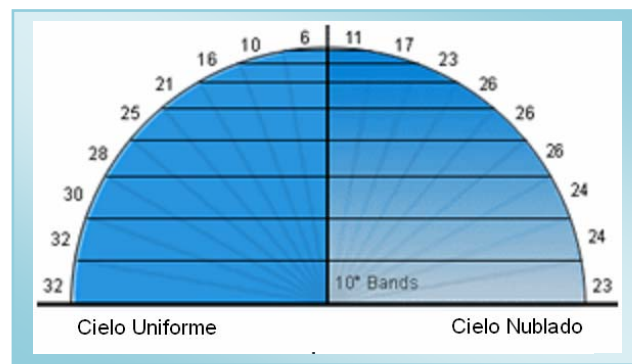


Figura 4 - Comparando la iluminancia vertical de los cielos CIE uniforme y nublado

### Cielo despejado de la CIE

Un cielo despejado supone que el sol es visible, resultando en una distribución de iluminancia muy poco uniforme en que el área alrededor del sol es mucho más brillante que en cualquier otra parte. El modelo de cielo despejado de la CIE relaciona la iluminancia  $L$  en cualquier punto de la bóveda celeste con la iluminancia del cenit:

$$\frac{(a + be^{-2k} + c \cos^2(k))(1 - e^{-d \sin^2(z)})}{(a + be^{-2zs} + c \cos^2(zs))(1 - e^{-d})}$$

En que a, b, c, d son coeficientes ajustables, k es el ángulo (en radianes) entre el punto cuya iluminancia es L y el sol, z es el ángulo cenital del punto en cuestión y zs es el ángulo cenital del sol.

De acuerdo a la publicación 22 de la CIE titulada "Estandarización de la Distribución de Iluminancia en Cielos Despejados" (Paris 1973), el modelo de cielo despejado de la CIE utiliza:

a = 0.91	c = 0.45
b = 10.0	d = 0.32

Adicionalmente, la CIE también ha estandarizado un cielo despejado para atmósferas contaminadas utilizando los siguientes coeficientes:

a = 0.91	c = 0.45
b = 10.0	d = 0.32

El color azul del cielo despejado depende mucho del lugar en cuestión por encima del nivel del mar y la cantidad de contaminación atmosférica. El bióxido de nitrógeno convierte el color de la atmósfera en ligeramente café y esto puede verse cuando se mira un área urbana desde el campo circundante. Altos niveles de vapor de agua en ausencia de contaminación tienden a darle al cielo un aspecto más blanco.

### Cielo Promedio BRE

La formula de cielo promedio de BRE se parece mucho al cielo despejado el cual tiene un pico circunsolar, pero que trata el efecto de las nubes de manera distinta para mejor reflejar las condiciones europeas. Esta fórmula también difiere en que no da lugar a un valor de iluminancia relativo, sino que produce un valor absoluto de iluminancia en miles de candelas por metro cuadrado (kcd/m<sup>2</sup>), la iluminancia L en cualquier punto de la bóveda celeste se calcula a través de:

$$L = ae^{-\frac{k}{40}} + b \left[ \frac{5 - (2 \sin(z))}{3} \right]$$

Donde:

a & b = son coeficientes ajustables,

k = es el ángulo en radianes entre el punto cuya iluminancia es L y el sol

z = es el ángulo del cenit del punto en cuestión.

$$a = 0.1 + 0.42zs - 0.7 \sin(7.2zs)$$

$$b = \frac{9(0.3 + 0.434zs - 0.0042zs^2)}{11F_0}$$

Donde:

zs = al ángulo del cenit del sol

### Valores de Iluminancia del cielo para diseño

Los modelos de cielo anteriores solo dan una distribución de iluminancia sobre el domo del cielo y no la cantidad de luz total que proviene de él, también conocido como iluminancia del cielo. Mientras que dos ubicaciones pueden experimentar cielos nublados semejantes en un mismo día y que equivalen al modelo de cielo nublado de la CIE, la cantidad total de luz en cada ubicación puede ser totalmente distinta.

La determinante principal de la iluminancia general del cielo es la latitud de la ubicación. Como lo han sabido desde hace mucho los pintores paisajistas, los niveles de luz cerca del ecuador son mucho más brillantes y tienen una calidad completamente diferente de aquéllos en latitudes medias y en los polos. Si podemos tomar la exposición a los rayos UV acumulados sobre una superficie como el indicador relativo de la exposición a la luz natural, entonces la figura de a continuación muestra qué tan importante puede ser esta variación durante un año, (el área gris indica superficies en que no se registró ninguna información).



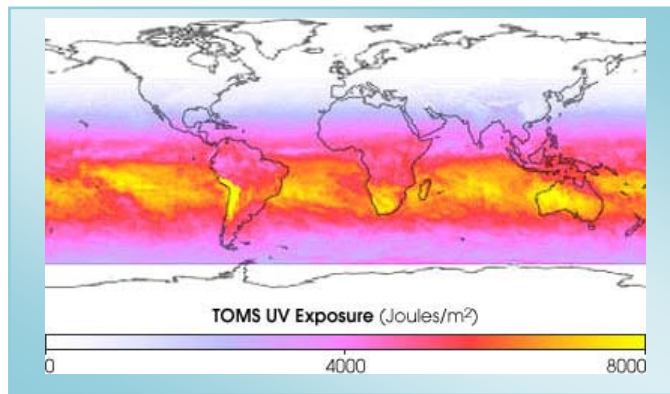


Figura 5 - Radiación UV incidente sobre la superficie de la tierra como un indicador de la distribución relativa de los niveles de iluminación. Mapa obtenido del Observatorio de la Tierra de la NASA

**Valores de diseño del cielo**

Los valores de diseño del cielo se derivan de un análisis estadístico de niveles de iluminancia al exterior. Representan un nivel de iluminancia horizontal el cual se excede el 85 % del tiempo entre las horas de las 9 am a las 5 pm durante todo un año. También representan el peor escenario para propósitos de diseño y para asegurar que el edificio va a cumplir con los niveles de luz necesarios durante por lo menos el 85 % del tiempo.

Los valores de diseño del cielo varía entre 12,000 y 15,000 luxes por el Ecuador bajando a entre 3000 y 4000 luxes, en lugares cuya latitud es de +/- 60°, tal como se muestra en la figura.

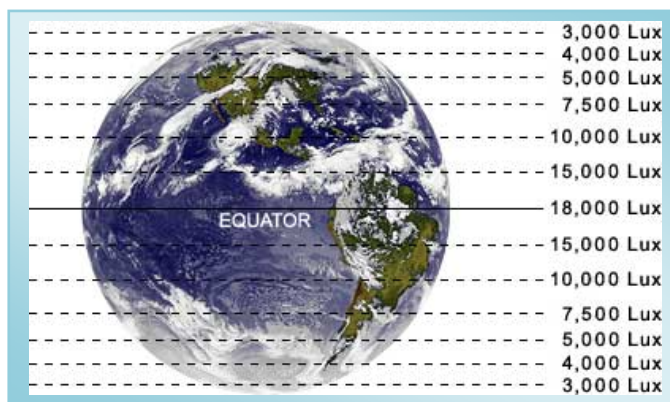


Figura 6 - Valores de diseño de iluminancia del cielo en función de la latitud

## Obteniendo valores del cielo para el diseño

Obviamente, como distintos métodos de cálculo producen resultados un poco diferentes, la mejor manera de obtener los resultados para cualquier ubicación es buscándola en una fuente de información publicada. Sin embargo, si esto no es posible, entonces se puede calcular a través de una fórmula para la iluminancia promedio de cielo difuso tal como se muestra a continuación. El valor  $Y^\circ$  es la altitud del sol en el cielo para el momento deseado, dado en grados:

$$E = 0.0103(Y^\circ + 5)^{2.8} \quad (-5^\circ < Y^\circ \leq 5^\circ)$$

$$E = 48.8 \sin^{1.408}(Y^\circ) \quad (3^\circ < Y^\circ \leq 60^\circ)$$

Los valores de iluminancia que resultan de esta ecuación no necesitan calcularse a cada hora durante un año para determinar un patrón de distribución, del cual se deriva el 15% más elevado. Como se indica anteriormente, esto es debido a que la iluminancia del cielo para el diseño se tomará como aquel nivel de iluminancia que se exceda el 85% del tiempo. Abajo aparece una herramienta que desempeña este cálculo y lo muestra como una gráfica de frecuencia acumulativa en niveles promedios de luxes. Nótese que los valores obtenidos varían desde 4,000 hasta 10,000 luxes en el Ecuador.

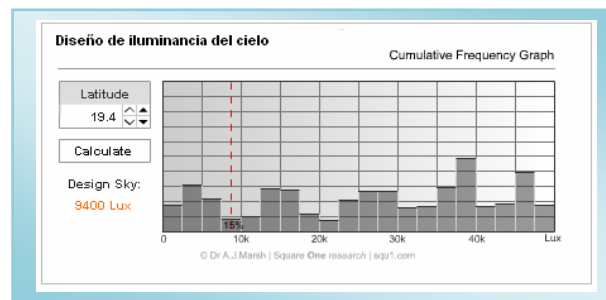


Figura 7 - Calculador del cielo para el diseño

## 12.0 El factor de luz de día

Como se indicó en el tema **Iluminancia del Cielo**, es posible modelar la distribución de luz sobre el domo celeste y establecer el nivel de iluminancia del cielo para el diseño en el peor escenario. El siguiente paso es poder determinar cuánta luz del domo del cielo realmente se transmite a través de las aberturas del edificio hacia los espacios interiores.

A diferencia de la iluminación artificial, el total de luz disponible en luz natural es fijo, (en este caso la iluminancia para el diseño en el peor escenario); de esta manera el control sobre la cantidad de luz es posible solamente a través de cambiar la manera de transmisión hacia el espacio por medio de sus aberturas, y luego, a puntos más profundos dentro del espacio por medio del sistema de distribución. Esto significa que los elementos arquitectónicos tales como ventanas, tragaluces, repisas lumínicas y la reflectividad de las superficies interiores son factores muy importantes en el diseño de la luz natural. También son fundamentales los elementos exteriores como, por ejemplo, obstrucciones en el predio y sistemas de control solar a través de dispositivos sobrepuestos.

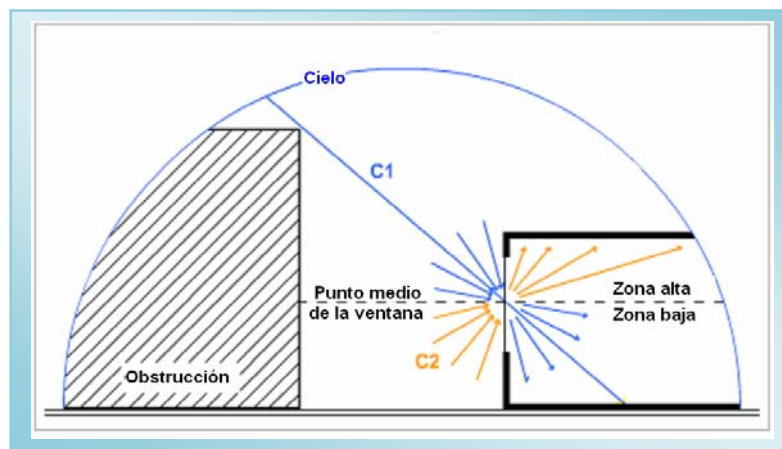


Figura 1 - Factores que afectan la penetración de luz solar hacia el espacio interior

Dado que las condiciones de iluminación natural cambian continuamente y los niveles de iluminancia absoluta del cielo frecuentemente son difíciles de encontrar o calcular, resulta más útil diseñar basándose en la cantidad relativa de luz que penetra en el espacio. De esta manera los niveles de iluminación interior pueden expresarse como un porcentaje de los niveles al exterior. Así, aún cuando el cielo puede momentáneamente oscurecer o despejarse, el porcentaje permanecerá igual. Esto quiere decir que el valor del porcentaje es una característica del propio edificio, proporcionando una medida objetiva para comparar opciones

alternativas de diseño y permite una comparación directa con otros edificios. Este valor de porcentaje se conoce como *factor de luz de día (FLD)*.

### Definición de factor de luz natural

El factor de luz de día se define como la relación entre la iluminancia en un punto específico dentro de un espacio y la iluminancia exterior simultánea sin obstrucciones bajo las mismas condiciones de cielo.

Una vez que se conozcan tanto el factor de luz de día como el del diseño de cielo, simplemente se multiplican ambos factores y nos da el nivel de iluminancia en luxes como resultado de la luz natural de ese punto.

$$L_{\text{punto}} = \frac{DF_{\text{punto}}}{100} \times L_{\text{diseño del cielo}}$$

### Cálculos de factor de luz de día

El determinar los factores de luz de día en distintas áreas de un edificio puede ser muy laborioso y consumir mucho tiempo. En el mayor número de casos esto se realiza a través de un programa de cómputo de los cuales ya existen un buen número de donde escoger. Sin embargo, un buen conocimiento de los métodos de cálculo manuales es muy importante si han de entenderse los procesos involucrados y, por ende, poder aplicar estos programas de cómputo de las maneras más adecuadas.

Existen muchas maneras de calcular el factor de luz de día para un espacio:

#### Factor de luz de día promedio

El factor de luz de día promedio se determina a través de una ecuación sencilla que requiere unos cuantos parámetros y se basa en muchas suposiciones acerca de las características del espacio a considerarse. El resultado es un solo valor de factor de luz de día promedio.

#### Transportadores para determinar factor de luz de día

También conocido como *el método de flujo dividido*, este sistema involucra el sobreponer transportadores encima de planos y cortes del edificio. Esto puede hacerse directamente con

impresiones transparentes colocadas directamente sobre imágenes digitalizadas o a través de programas de dibujo por computadora.

### **Proyección de puntos isolux del cielo**

Este es un método simplificado que requiere de la proyección de puntos sobre el domo celeste dentro de una vista 3D del proyecto en cuestión o dentro de una montea solar. Luego, simplemente se cuentan los puntos que puedan “verse” a través de ventanas y tragaluces.

### **Análisis geométrico usando programas de cómputo**

Este método involucra el generar o importar un modelo geométrico 3D y sus aberturas dentro de un programa de cómputo a través del cual pueden graficarse y calcularse los factores de luz de día

### **Análisis mediante programas de simulación**

Existen programas de simulación que permiten el análisis de luminosidad para utilizarlos como herramienta de diseño de luz natural.

### 13.0 Factor de luz de día promedio

La cantidad de luz natural que entra y se refleja dentro de un espacio es principalmente una función del tamaño de cada vano, de la cantidad de cielo visible a través de cada ventana y de la reflectancia de las superficies interiores. Aún cuando las interrelaciones entre cada elemento son bastante complejas es posible simplificarlas y formalizarlas para que produzcan un solo valor de factor de luz de día promedio. Aunque no muy preciso, principalmente para espacios profundos y en aquéllos rodeados por otros edificios o vegetación, sí proporciona una guía simple y rápida para conocer el potencial disponible de luz natural.

La ecuación para estimar el factor de luz de día promedio es como sigue:

$$DF_{avg} = \frac{\sum(WT \cos^3 \theta)}{A(1 - R^2)} \%$$

Donde:

W = el área de cada ventana en m<sup>2</sup>

T = la transmitancia de cada material transparente (si no se conoce utilícese 0.8 para cristal transparente delgado o 0.7 para cristal transparente grueso)

$\theta$  = el ángulo vertical del cielo visto desde el centro de cada ventana

M = factor de mantenimiento basado en el ángulo del cristal y lo limpio del medio ambiente

A = superficie total interna del espacio interior incluyendo muros, pisos, plafones y ventanas en m<sup>2</sup>

R = reflectancia promedio ponderada con respecto al área de todas las superficies tomadas en cuenta en "A" (use 0.1 como reflectancia para el cristal)

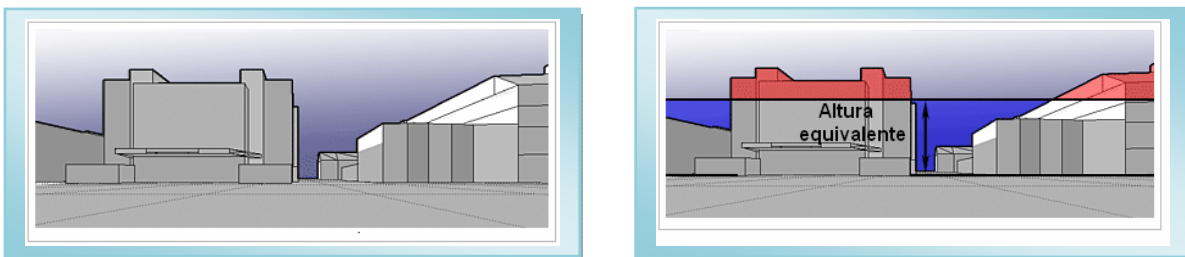


Figura 1 - Calculando el ángulo vertical del cielo visible desde el centro de la ventana

Ubicación del edificio	Tipo de trabajo	Inclinación del cristal	Factor de mantenimiento
No industrial / industrial limpio	No industrial / Trabajo industrial limpio	Vertical	0.9
		Inclinado	0.8
		horizontal	0.7
	Trabajo industrial sucio	Vertical	0.8
		Inclinado	0.7
		horizontal	0.6
Industrial sucio	No industrial / Trabajo industrial limpio	Vertical	0.8
		Inclinado	0.7
		horizontal	0.6
	Trabajo industrial sucio	Vertical	0.7
		Inclinado	0.6
		horizontal	0.5

Tabla 1 - Factores de mantenimiento para varios ángulos de ventana y ambientes de trabajo

Para propósitos de diseño es posible reordenar la ecuación anterior para calcular el área de ventana que se requiere para proporcionar un factor de luz de día promedio:

$$W = \frac{DF_{aug} \cdot A1 - R^2}{T_{aug} \cdot \phi_{aug} \cdot M_{aug}} \text{ m}^2$$

En la que:  $T_{aug}$ ,  $\phi_{aug}$  y  $M_{aug}$  son los valores promedio de las ventanas para  $T$ ,  $\phi$  y  $m$  en la ecuación anterior.

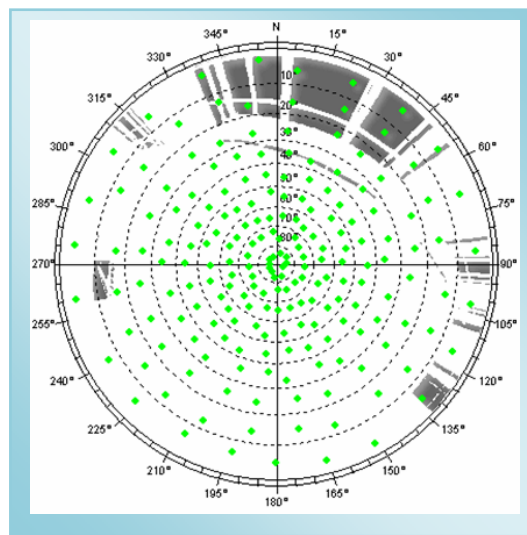


Figura 2 - Los distintos tipos de distribución por puntos correspondientes a los distintos tipos de cielo y programas como BRE y como el componente vertical del cielo BRE.



## Método de luz dividido

El método más útil para calcular manualmente el factor de luz de día es el método de flujo dividido. Este se basa en la suposición de que, ignorando la luz solar directa, la luz natural llega a un punto dentro del edificio de tres maneras:

Componente del cielo

Directamente del cielo a través de un abertura tal como una ventana.

Componente externamente reflejado

Luz reflejada del terreno, arboles, u otros edificios.

Componente internamente reflejado

La reflexión interna del CC y ERC desde las superficies internas del espacio arquitectónico.

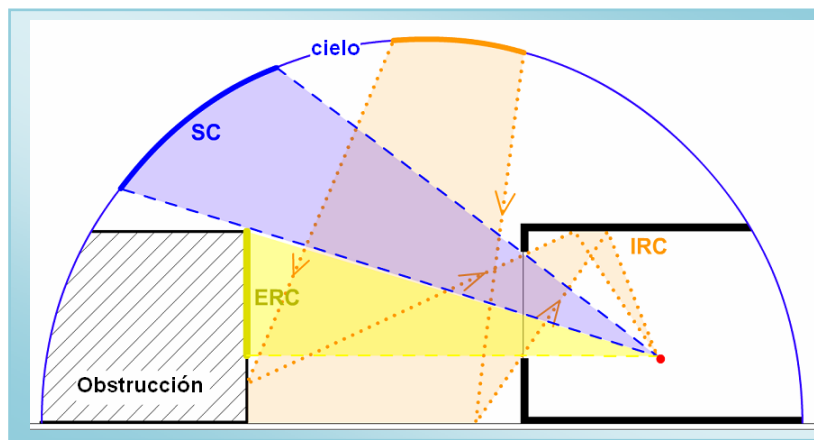


Figura 1- Los diferentes componentes del flujo dividido

Considerar por separado estos componentes se justifica debido a que cada uno es afectado por distintos elementos dentro del diseño. El factor de luz de día resultante se da como un porcentaje y es simplemente la suma de los tres componentes:

$$\text{FLD} = \text{CC} + \text{ERC} + \text{IRC}$$

## Transportadores de factor de luz de día

El método de flujo dividido usa transportadores de factor de luz de día como método manual de calcular los componentes del cielo y externamente reflejados. Estos transportadores se encuentran en muchos libros de texto sobre ciencia arquitectónica y pueden fotocopiarse sobre acetatos y sobreponerlos directamente en planos.

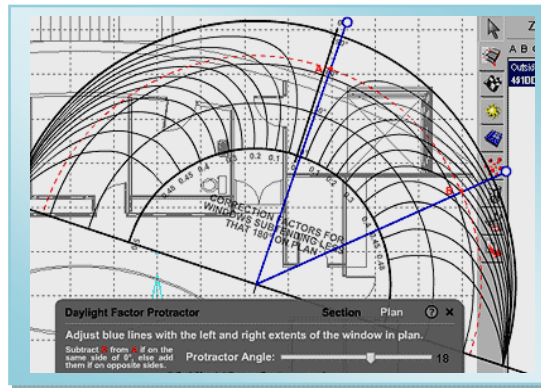


Figura 2 - La herramienta transportador de factor de luz de día puede usarse directamente sobre dibujos CAD e imágenes digitalizadas

### Componente del cielo (CC)

El componente del cielo se determina empleando los factores de luz de día como se indica en el párrafo anterior. El primer transportador que se utiliza es para el corte vertical del proyecto su diseño- este determina un componente del cielo no modificado para una ventana infinitamente larga. Para obtener el valor simplemente tómesese el factor de luz de día del borde superior de la ventana y réstese el valor del borde inferior. Valores debajo de la horizontal se consideran equivalentes a cero, dado que no van a contribuir a la luz que reciba la superficie de trabajo. No se le olvide registrar el ángulo de altitud promedio del cielo como vista desde la ventana. Éste es simplemente el bisector de los ángulos superior e inferior, (también puede pensarse como el que atraviesa el centro geométrico de la ventana).

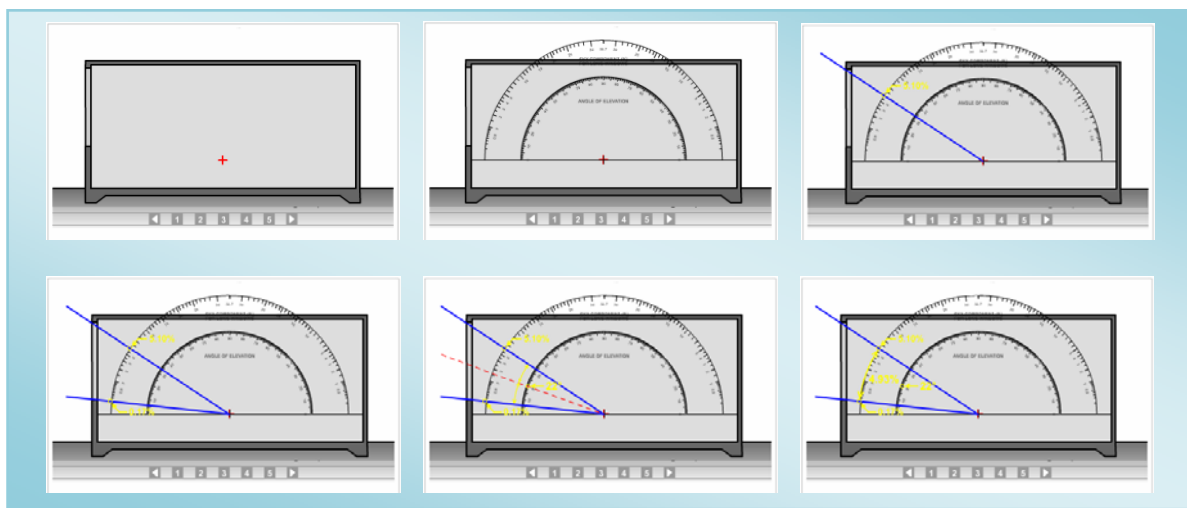


Figura 3 - Determinando el componente del cielo utilizando el transportador del factor de luz de día en corte

En el ejemplo anterior, el borde superior de la ventana está a un ángulo de altitud de  $34^\circ$  con un correspondiente Factor de Luz de Día (FLD) de 5.10%. Sin embargo, el borde inferior de la ventana está por encima del punto de prueba, de tal suerte que el punto no va a recibir el total del 5.10% de luz. El borde inferior está a una altitud de  $11^\circ$ , con un correspondiente FLD de 0.17%. De esta manera, la cantidad de luz natural que se recibe en un punto desde una ventana infinitamente larga, con ese corte, sería de 4.93% ( $5.10 - 0.17$ ). Nótese que el punto de prueba está por encima del borde inferior de la ventana. La línea de azimut inferior nunca estará por debajo de la horizontal ( $0^\circ$ ).

### Factores de corrección para ancho de ventana en planta

Dado que ninguna ventana es infinitamente larga este valor debe corregirse utilizando el segundo transportador en planta. Para lograr esto, primero debemos obtener el ángulo promedio de altitud de la ventana. Éste es simplemente el bisector entre las líneas de altitud superior e inferior en corte – en este caso  $22^\circ$ . Este ángulo nos permitirá graficar un círculo concéntrico desde el cual puede generarse el factor de corrección del ancho de la ventana.

Simplemente colóquese el transportador en planta, de tal suerte que el punto del centro caiga exactamente sobre el punto focal, y el eje principal se encuentre paralelo a la ventana. Determine el factor de corrección para ambos lados de la ventana, interceptando las líneas de cada lado de la ventana, con la línea de altitud del centro de la ventana. En este caso:  $22^\circ$ , como se ilustra en la figura siguiente.

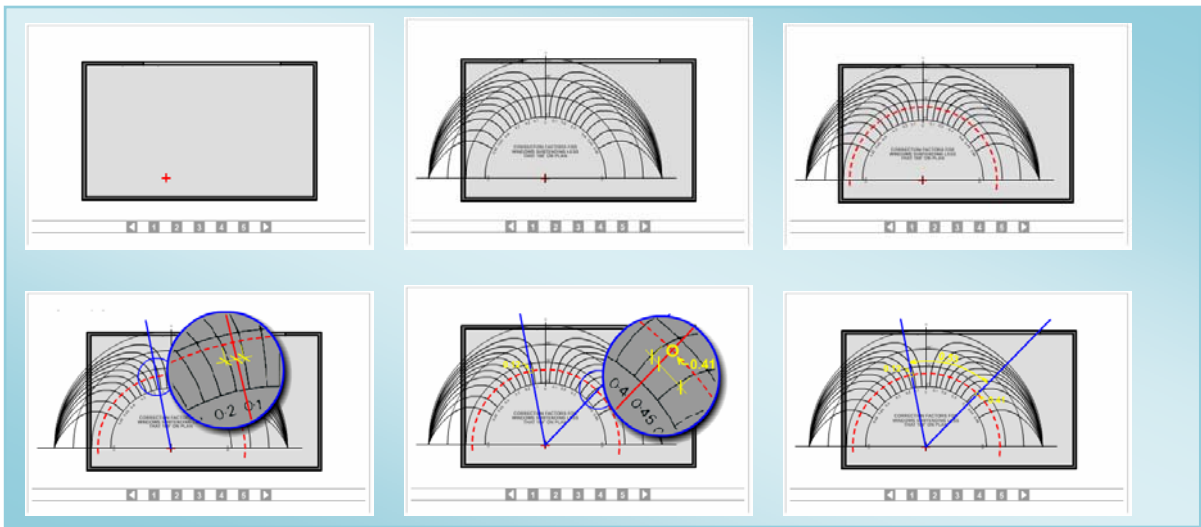


Figura 4 – Determinando el componente del cielo utilizando el transportador de FLD en planta.

Si ambos, los lados izquierdo y derecho de la ventana, se encuentran dentro del mismo cuadrante (es decir, del mismo lado de la línea cero), debe restarse el número mayor del menor. Si se encuentran diferentes cuadrantes del transportador, (de cualquier lado de la línea cero) deben sumarse los dos factores de corrección.

Finalmente, multiplique el factor total de corrección por el factor FLD que se determinó en el corte para obtener el componente del cielo o el CC desde esa ventana. Si se tienen muchas ventanas, debe de seguirse el mismo procedimiento para cada una de ellas y sumarlas, para obtener el resultado final.

### Componente de reflexión exterior ERC

El componente de reflexión exterior se determina exactamente de la misma manera que el componente del cielo, utilizando los transportadores de FLD. Sin embargo, para simular los niveles menores de iluminación, debido a la reflexión, desde una o más superficies, el valor final se multiplica por 0.2. La constante 0.2 es simplemente una reflectancia promedio que puede suponerse para la mayor parte de los materiales de construcción y de los acabados de las superficies naturales.

### Componente de reflexión interior

El componente de reflexión interior se obtiene utilizando una ecuación simplificada que toma en cuenta la reflectancia interna de distintos grupos de superficies dentro del espacio y el área total de ventana. Se obtiene a través de la siguiente ecuación:

$$Cp_2 + 5p_3$$

En que:

W = área total de ventana en m<sup>2</sup>

A = área total interior incluyendo pisos, muros, plafones, y ventanas en m<sup>2</sup>

$p_1$  = reflectancia promedio ponderada con respecto al área de todas las superficies tomadas en cuenta en "A" (use 0.1 como reflectancia para el cristal)

$p_2$  = reflectancia promedio de las superficies que se encuentran debajo del punto en consideración, utilizando un plano de trabajo a 60 cm por encima del piso

$p_3$  = reflectancia promedio de las superficies por encima del plano de trabajo

C = coeficiente de obstrucción externa como se describe a continuación

El coeficiente de obstrucción externa se refiere a la altura promedio de todas las obstrucciones externas. Si esto incluye edificios de distintas alturas, entonces es necesario determinar una altura promedio por encima de todo el ancho de la ventana y utilizar ese valor. En caso de una sola barda muy larga solo utilice su borde superior. Una vez que se tiene ese ángulo, utilice la siguiente tabla para determinar C.

0°	10°	20°	30°	40°	50°	60°	70°	80°
39	35	31	25	20	14	10	7	5

Tabla 1 - Coeficientes de obstrucción externa (C)

### Puntos isolux del cielo

Es posible estimar de manera rápida el componente de factor de luz de día del cielo en cualquier posición dentro de un edificio proyectando puntos de igual densidad de iluminancia (Isolux) a través del domo celeste. Si se genera una vista en perspectiva de línea oculta desde esa posición, se puede simplemente contar el número de puntos que pueden verse físicamente a través de cualquier ventana. Estos puntos representan la porción de iluminancia total directa del cielo visible desde esa posición.

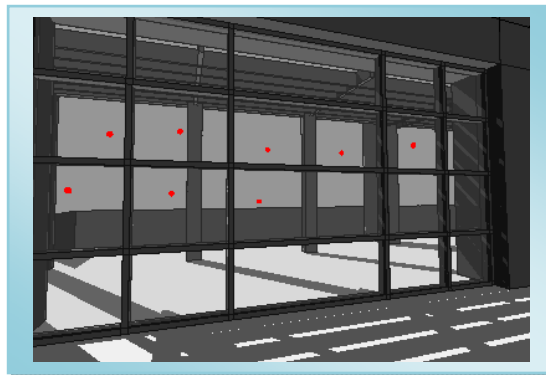


Figura 1 – Viendo puntos Isolux del cielo desde una posición dentro del edificio

### Proyecciones usando la monte solar

Este mismo método puede utilizarse con puntos proyectados sobre una monte solar. De esta manera, en vez de establecer una posición para mirar hacia distintas ventanas, simplemente se selecciona un punto en la posición deseada y se genera un diagrama desde ahí.

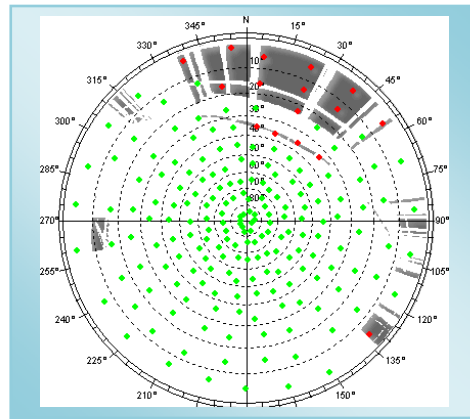


Figura 3 – Puntos Isolux del cielo distribuidos sobre una montea solar estereográfica mostrando las sombras en una posición seleccionada

Obviamente se puede realizar este mismo tipo de cálculo a través de todas las diversas monteas solares. Esto incluye proyección esférica Waldram y BRE (Building Research Establishment = Establecimiento de Investigación de la Construcción). La imagen a continuación muestra la misma distribución de puntos pero en una proyección ortográfica (cilíndrica).

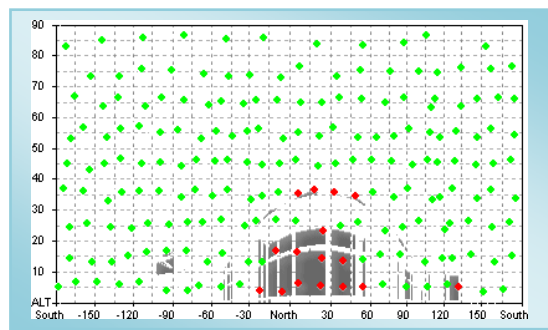


Figura 4 - Los mismos puntos de la figura 3 proyectados en una proyección ortográfica (cilíndrica)

### Diferentes tipos de cielo

Diferente tipo de distribución de iluminancia celeste va a dar lugar a un distinto arreglo de puntos sobre el domo celeste y sobre una montea solar. También pueden mostrarse distintos puntos que tienen el mismo componente vertical de cielo. De esta manera se supone una superficie vertical, de tal suerte que se reduzca el número de puntos en el cenit, de acuerdo a la ley del coseno para la incidencia de luz sobre una superficie.

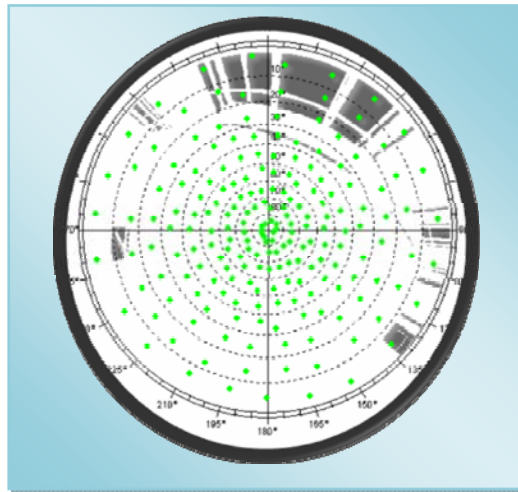


Figura 5 – distintos tipos de distribución de puntos correspondientes a distintos tipos de cielo y programas tales como el programa BRE para determinar el componente vertical de cielo.



## 14.0 Sistemas innovadores de luz natural

Cuando se trata de arquitectura y luz, la tecnología de la iluminación artificial – sus lámparas, luminarias, dispositivos de todo tipo, controles y métodos de diseño – puede proporcionar espacios muy controlados en cuanto a la iluminación. Con la iluminación natural los resultados son menos definidos, y no sólo porque la luz de día es una fuente inherentemente variable. Están a nuestra disposición maneras, casi vernáculos, de considerar a los edificios como dispositivos de producción de luz natural si tomamos en cuenta la ubicación y forma de vanos, todo tipo de superficies interiores y exteriores, volados, faldones, celosías, persianas y elementos semejantes. La iluminación natural puede considerarse como todo un arte, pero con muy poca tecnología.

Últimamente, debido al creciente interés en el ahorro de energía y la protección del medio ambiente, se han estado promoviendo sistemas de iluminación natural de vanguardia y alta tecnología, fundamentados en la óptica, es decir, las leyes de la reflexión, refracción, y difracción, para capturar y redirigir la luz natural de día.

Los nuevos sistemas de luz natural generalmente tienen dos objetivos principales: introducir la luz natural dentro de los espacios arquitectónicos y controlar y distribuir la luz solar directa para que pueda utilizarse como una fuente de luz eficaz. Los expertos sugieren cuatro funciones que puede cumplir esta nueva tecnología en desarrollo:

- Aumentar los niveles de luz natural hacia la parte posterior de los espacios de gran dimensión.
- Lograr mayor uniformidad en los niveles de iluminación natural en todo un espacio.
- Controlar la luz solar directa para que sea una fuente de luz eficaz.
- Reducir los deslumbramientos que incomodan e incapacitan y evitar los contrastes de luminancia.

### Ductos de luz

El ducto o tubo de luz es posiblemente el sistema de luz natural innovador más tecnológicamente emocionante por las largas distancias por las cuales puede operar. En principio, los ductos, o tubos de luz recogen, dirigen, y canalizan la luz solar hacia casi cualquier espacio dentro de un edificio. El sistema consiste de tres componentes principales:

1. Colector/concentrador, conocido como "helióstato"
2. Sistema de transporte
3. Emisor

Antes de que entre al ducto de luz, la luz solar debe concentrarse. Los helióstatos, que pueden ser activos o pasivos, consisten de espejos y lentes que concentran la luz solar hacia la abertura encima del sistema de transporte.

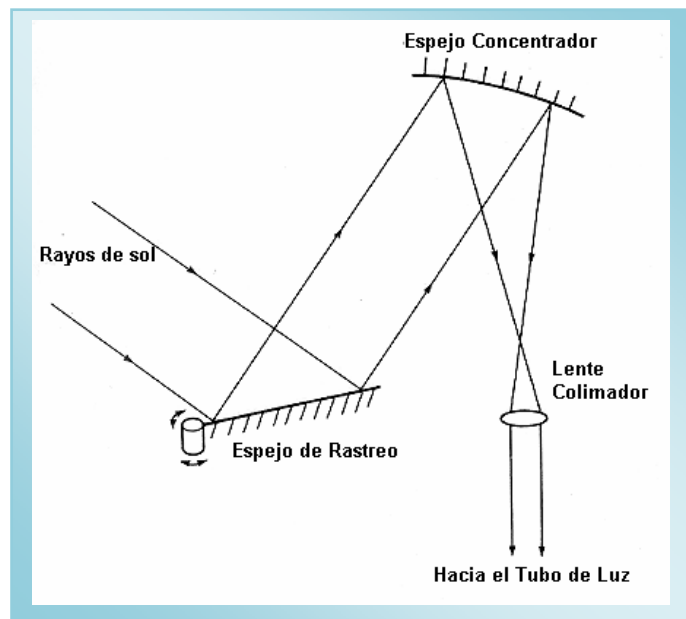


Figura 3.1 un heliostato simplificado. El espejo plano está programado para rastrear la órbita solar y reflejar la luz solar hacia un segundo espejo que concentra el rayo de luz. La óptica de colimación asegura que la luz quede casi perfectamente paralela antes de entrar al ducto de luz.

Un sistema activo utiliza la luz solar como su fuente principal y rastrea el movimiento del sol para maximizar la luz del sol directa. Sensores y un reloj monitorean el sistema de rastreo. El sensor se utiliza exclusivamente en días con cielos despejados mientras que el reloj interno se implementa en días nublados.

Un sistema colector pasivo es estacionario, y depende de óptica solar para recibir luz difusa. Debido a la reducción en la intensidad de luz, el colector necesita recibir la mayor cantidad de luz posible del cielo para compensar la pérdida de transmisión.

La función principal del sistema de transporte de luz es transferir la fuente de luz exterior al emisor interno. El sistema de transporte puede dividirse en varios tipos, la forma más básica

consistiendo en un ducto vacío a lo largo del cual puede viajar un rayo de luz colimado. Un tubo hueco revestido con espejo, por ejemplo, es un sistema en que guías de luz reflejada utilizan la reflectancia de la superficie interior para reflejar y difractar la luz a través de la distancia requerida.

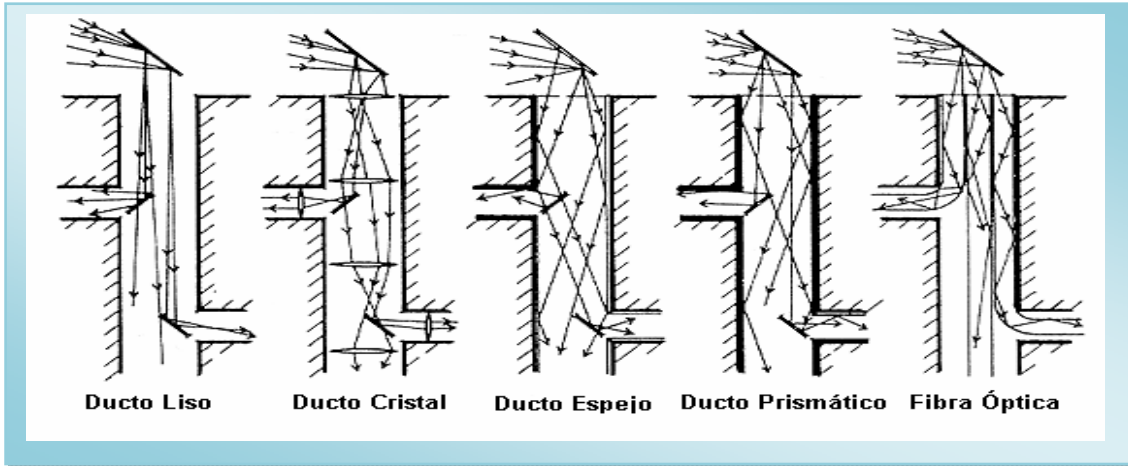


Figura 3.2 – Métodos de transmisión

Funciona de acuerdo a la alineación de los rayos incidentes y su rendimiento depende de la relación entre longitud y sección. Al aumentar el número de reflejos en una sección pequeña en distancias largas, la pérdida de luz tiende a ser considerable, debido a los múltiples reflejos no paralelos. Otros tipos de ductos de luz se muestran a continuación.

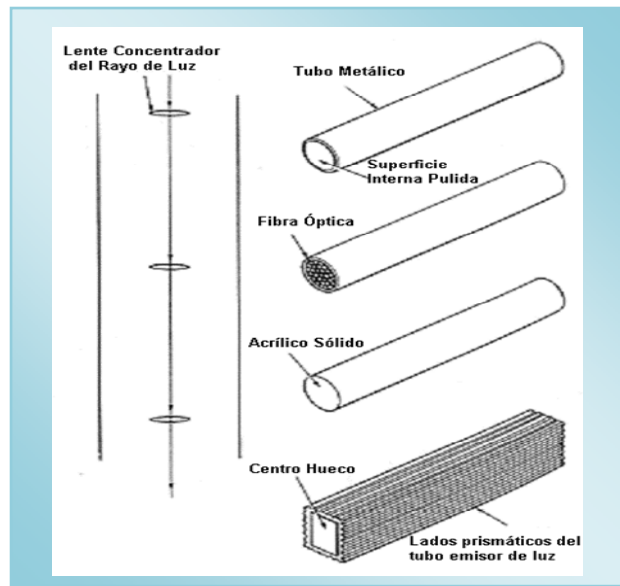


Figura 3.3- varios tipos de ductos de luz. A la izquierda está un lente guía. A la derecha, de arriba hacia abajo, un tubo metálico reflejante; un manojo de fibra óptica; un bastón de acrílico; una guía de luz prismática.

Emisores distribuyen luz que sale del sistema de transporte hacia el espacio en cuestión. En donde la luz se conduce a través de una distancia considerable, de tal suerte que la fuente de luz natural se convierte en menos evidente, es razonable pensar que los usuarios exijan la misma cantidad de luz que obtendrían de una luminaria común y corriente. Se recomienda un dispositivo solar que redirija la luz solar hacia arriba, utilizando un espejo cóncavo para dirigir la luz entubada hacia el plafón.

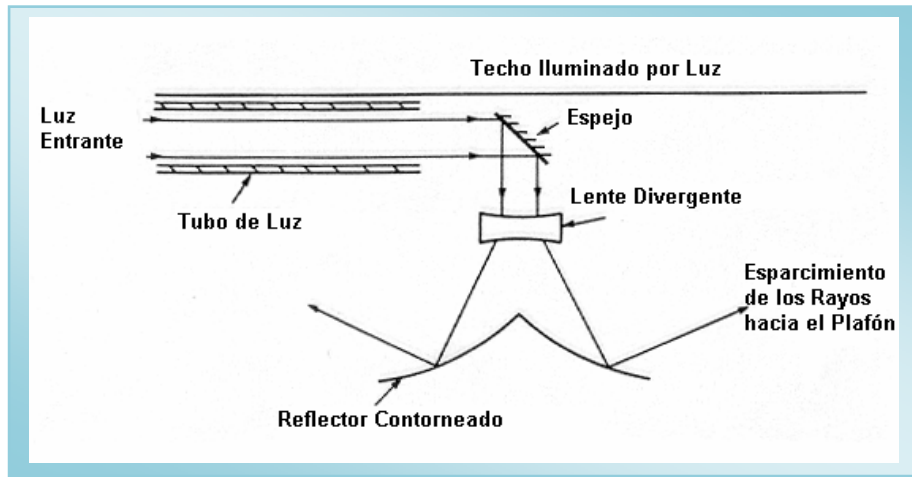


Figura 3.4 - Un emisor hacia el plafón para luz entubada. La luz que sale del ducto es dirigida hacia el plafón por medio de un reflector curvo.

Un problema con el sistema de luz entubada es que es totalmente ineficiente cuando no hay luz solar; por lo que se requiere algún sistema artificial de respaldo.

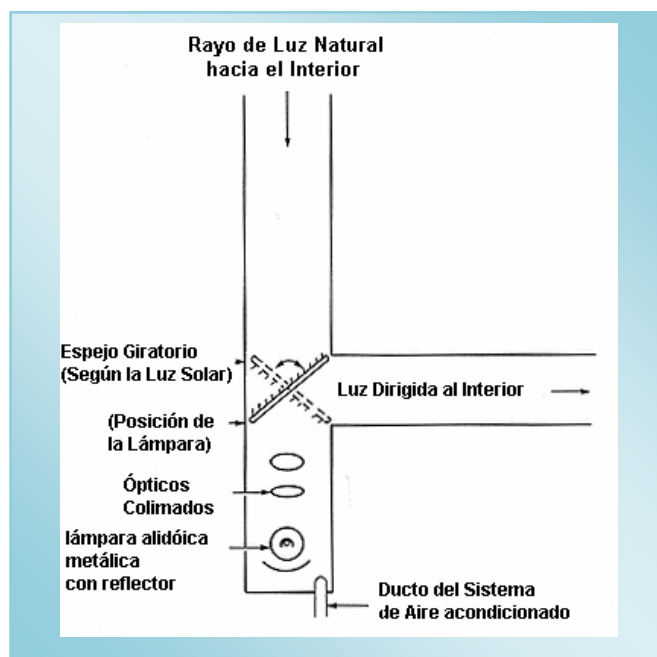


Figura 3.5 - Una parte importante de un sistema de luz natural es la lámpara de respaldo. El espejo giratorio permite que la luz solar o luz artificial se dirija selectivamente hacia el interior. Tendría que operar instantáneamente cuando el sol se oculta.

Una fuente de luz eléctrica de respaldo debe tener un alto rendimiento. Para ese propósito se recomiendan lámparas de alta intensidad de haloideo metálico debido a su temperatura de color, la cual es comparable a la luz solar. Conviene usar ductos de luz en aquellos lugares en que la luz solar es abundante y en los cuales no hay muchos días nublados.

### Sistemas de persianas con espejos

Los sistemas de espejos representan una reducción en escala y complejidad, comparando con los sistemas de ductos de luz. En vez de un gran espejo colector que le sirve a todo el edificio, se emplean espejos pequeños para cada vano. Las superficies del espacio se emplean para esparcir y difundir la luz, en lugar de un sistema complicado con ductos y emisores. La figura siguiente muestra un ejemplo típico.

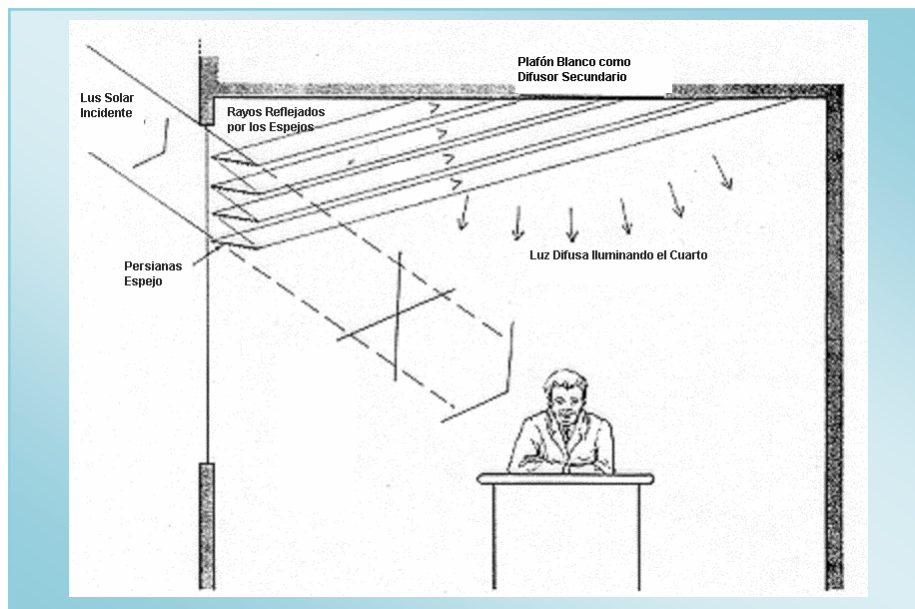


Figura 3.6 – rayos de luz solar en un espacio con luz lateral

Persianas reflejantes evitan que la luz solar incida directamente sobre el usuario. Por el contrario redirigen la luz hacia el plafón en la parte posterior del espacio. Se han empleado las persianas durante años para proporcionar sombra interceptando e impidiendo el paso de la luz solar. La diferencia con los sistemas de espejo, es que la luz solar se redirige hacia el espacio para formar una fuente de luz amplia y difusa en el plafón. El objetivo es mejorar la luz hacia las profundidades del espacio arquitectónico.

Un sistema de persianas fijas del tipo que se muestra en la figura anterior ha sido estudiado y la investigación muestra que para condiciones de cielo y posiciones de sol óptimas, los sistemas reflectores proporcionan un nivel de iluminación uniforme y elevado en una oficina normal. El problema principal con los sistemas de protección solar fijos, sin embargo, es que sólo funcionan bien para una altitud solar específica. Para altitudes solares mayores no toda la luz se reflejará directamente hacia el plafón sino a la persiana en la parte superior en donde, o se absorbe o se refleja hacia abajo, convirtiéndose en una fuente potencial de deslumbramiento. Por este motivo se recomiendan los sistemas de persianas móviles.

Aparte del alto costo de los sistemas de persianas ajustables, por lo menos dos estudios de conducta en el uso de persianas muestran que los usuarios no saben ajustar esos sistemas de manera óptima. En general, las personas utilizan los sistemas de persianas para evitar la penetración de luz solar directa o de radiación térmica, por lo que normalmente no emplearán la persiana para permitir la penetración solar. De igual modo, un estudio indica que las personas rara vez ajustan las persianas durante el día, por lo que los usuarios, en general, no ajustarán una persiana reflectora para tomar en cuenta cambios en la posición solar.

Un sistema denominado **VALRA** (Variable Area Light Reflecting Assembly, que significa: Ensamble de Reflexión de Luz para Superficie Variable) intenta optimizar la reflexión de luz hacia el plafón prestando servicio durante todo el año. Consiste de una película reflejante plástica adherida a un rodillo móvil.

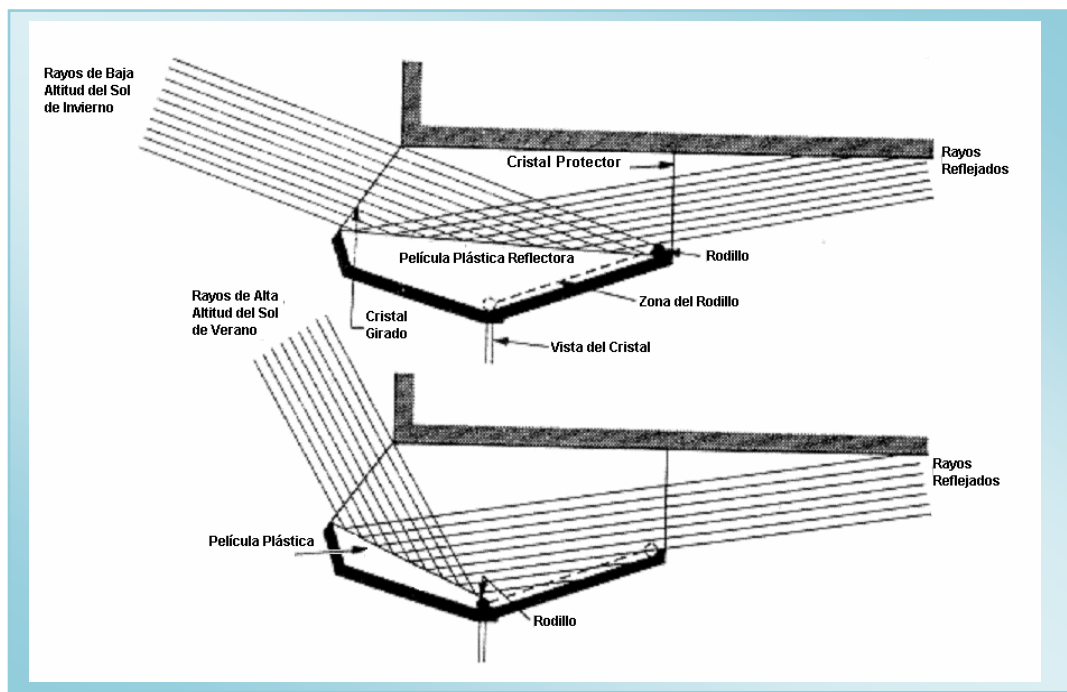


Figura 3.7 – Operación en invierno y verano del VALRA

Cuando el sol está en la parte inferior del cielo el rodillo desenrolla la película para producir un espejo más ancho y casi horizontal. De acuerdo a su inventor, las maquetas del dispositivo han funcionado bien.

### Sistemas prismáticos

El principio en que se fundamenta el cristal prismático es el cambio de dirección de la luz natural a través de la reflexión y refracción. Típicamente, el cristal prismático se compone de láminas de cristal que son planas de un lado y configuradas del otro, en la forma de prismas largos paralelos. La hoja prismática controla la luz y el calor reflejando en vez de absorbiendo la energía. Es un dispositivo común empleado para reducir las luminancias que producen las luminarias fluorescentes en el horizonte y concentrar la luz hacia abajo en ángulos bien definidos. Los sistemas prismáticos se pueden utilizar para redirigir la luz difusa del cenit hacia la parte posterior del espacio que, de otra manera, no recibiría luz directa del cielo.

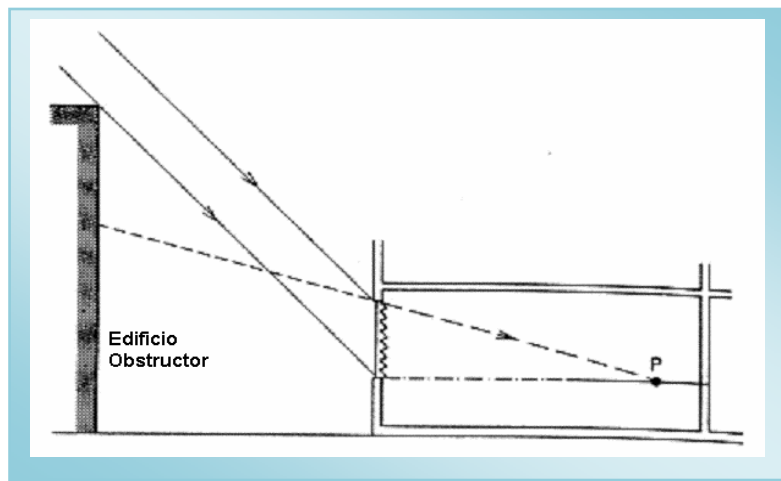


Figura 3.8 – Cristal prismático que redirige la luz del cielo que se encuentra arriba de un edificio obstructor hacia puntos cercanos a la parte posterior del local desde el cual normalmente no sería visible el cielo.

Hay principalmente dos tipos de cristal prismático: prismas que dirigen la luz solar o prismas que excluyen la luz solar.

### Prismas que dirigen la luz solar

Esta aplicación de cristal prismático funciona bajo los mismos principios de los sistemas de espejos. La figura siguiente muestra la trayectoria típica del rayo de luz a través de una hoja prismática.



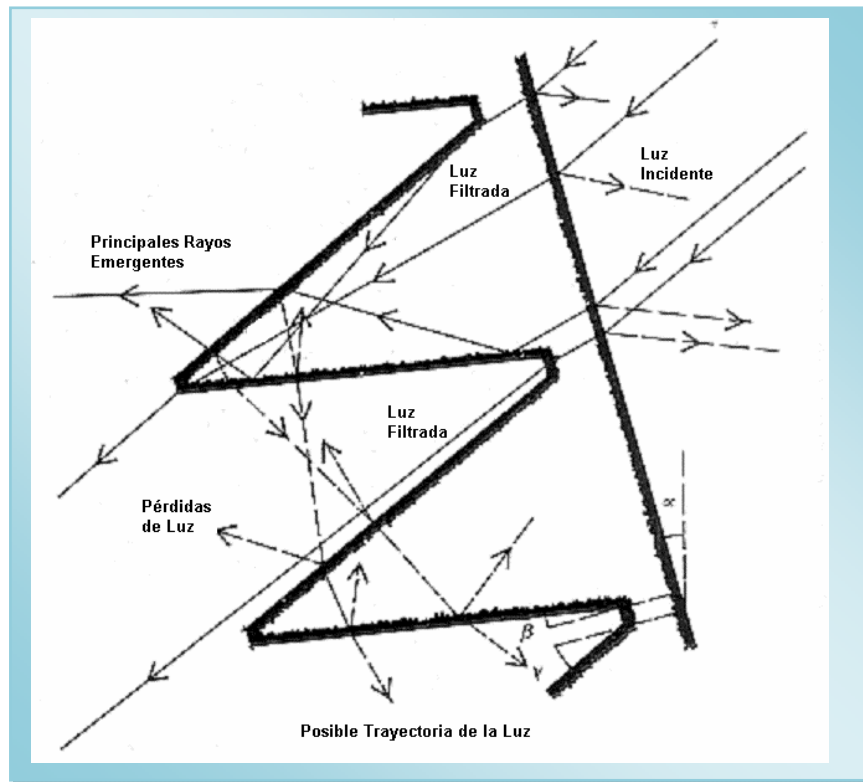


Figura 3.9 – Trayectorias de luz posibles a través de un panel de luz prismático.

Se acostumbra instalar el panel prismático dentro de un panel de doble vidrio y ubicado en un sistema tipo claraboya, dado que la refracción distorsiona y oscurece la vista hacia afuera. Este arreglo ofrece un rendimiento en su transmisión de entre un 50 a un 70 por ciento, dependiendo de la altitud solar. Para un ahorro de energía y comodidad del usuario el cristal debe ajustarse en cada estación para optimizar la penetración de luz natural hacia la superficie del plafón controlando la dirección de la reflexión.

### Prismas que excluyen la luz solar

Los prismas que excluyen la luz solar se emplean en sistemas en los que el objetivo es impedir el paso de luz solar directa, a la vez que admitir la luz del cielo cerca del cenit. Cada prisma de la hoja de cristal inclinada cuenta con una cara plateada, de tal suerte que la luz de las áreas del cielo en que pudiera encontrarse el sol será reflejada hacia afuera. La luz difusa de altitudes mas elevadas se admite y refracta hacia el plafón por una hoja prismática fija colocada verticalmente en el interior. Este sistema permite una iluminación sin deslumbramiento hasta las profundidades del local y es particularmente útil donde se emplean unidades de display visual. En el ejemplo de la figura 3.10 ambas hojas prismáticas son fijas.

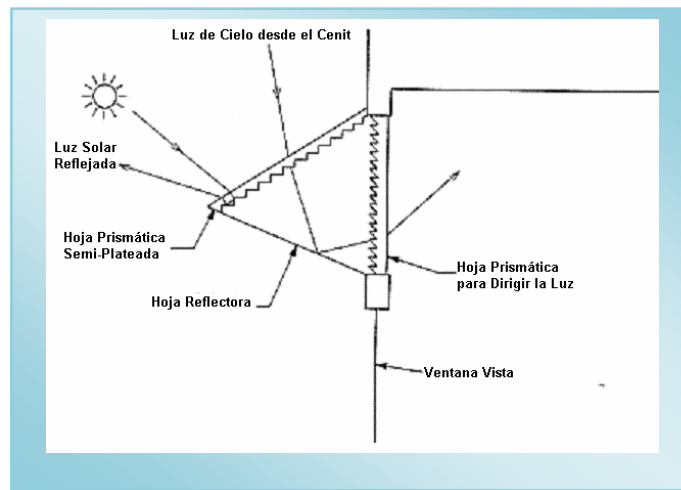


Figura 3.10 – Un sistema de cristal prismático que excluye la luz solar.

### Paneles cortados con Láser (LCP = Laser Cut Panels)

Un LCP es una aplicación fija de luz natural que emplea un rayo de luz solar para desviar luz colimada de altitudes bajas para penetrar en zonas profundas. La desviación de la luz resulta de las superficies interiores dentro del material dieléctrico en que la luz incidente se desvía hacia arriba debido a la reflexión interna total.

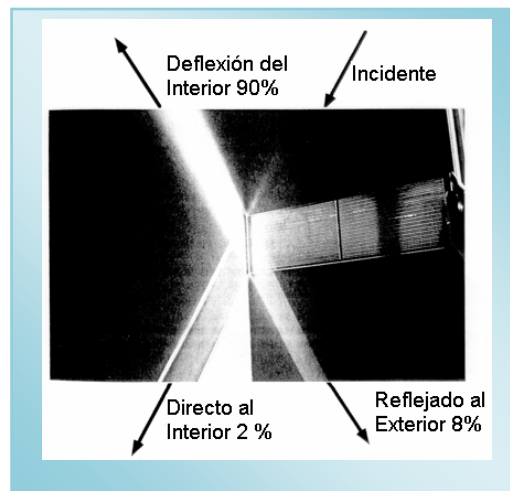


Figura 3.11 – Un panel cortado por rayo láser colocado con un extremo contra el muro, indica una desviación especular de la luz solar directa que incide desde arriba y a la derecha.

Hojas dieléctricas cortadas por rayo láser y adheridas proporcionan una vista transparente sólo cuando la visual es perpendicular a la superficie de cristal. Bajo un cielo nublado la luz desviada puede producir deslumbramiento que incomoda. Como resultado, el dispositivo se instala arriba del nivel del ojo para minimizar el problema asociado con el deslumbramiento.

Se pueden emplear LCPs para optimizar la luz natural dentro de los espacios interiores como se indica a continuación:

- Inclinando las interfaces internas del LCP resulta en ángulos de emisión menores, que, a su vez, producen penetración profunda, como se muestra a continuación.

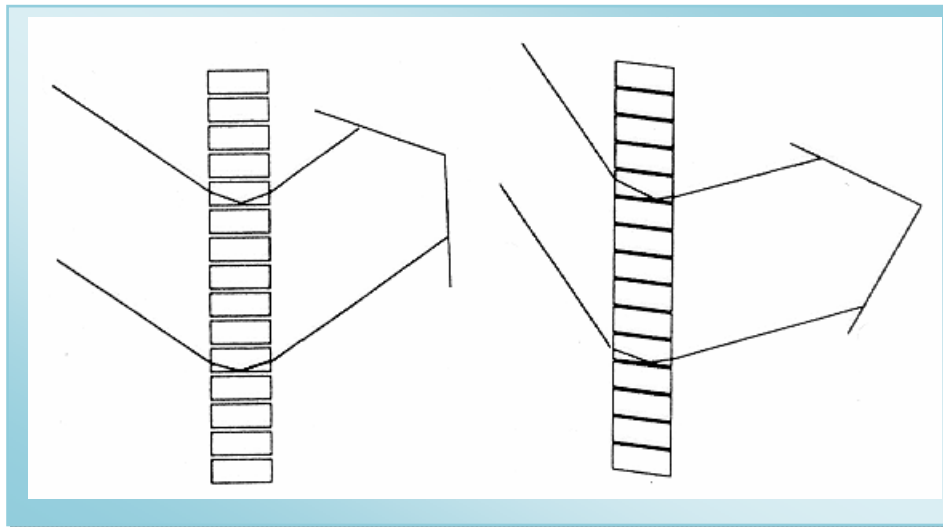


Figura 3.12- un arreglo de elementos rectangulares forma un panel deflector de luz con buena transparencia perpendicular al panel. Cuando las interfaces internas se inclinan hacia el espacio, la luz incidente se desvía más profundamente dentro del espacio.

- Un sistema de persianas inclinables que utilizan LCP puede colocarse con un ángulo de acuerdo a la altitud solar con el propósito de maximizar la desviación de luz (figura 3.13). El ancho estándar para un sistema comercial de persianas tiene un grosor semejante al de un sistema convencional de cristal. Esto permite la sustitución directa, por lo que hay ahorro en los costos de instalación.

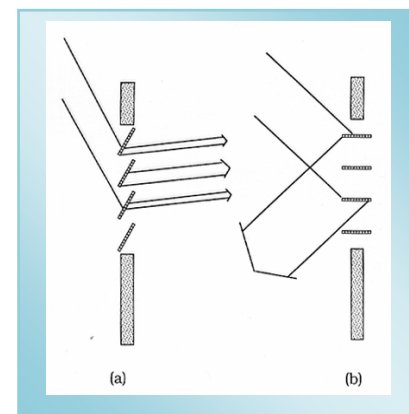


Figura 3.13 – Varios paneles deflectores de luz en una ventana de persiana puede inclinarse para dirigir la luz solar de manera profunda hacia el espacio (a). Cuando los paneles de persianas están completamente abiertos para la vista y ventilación, la ventana tiene la propiedad adicional de excluir la luz directa solar del espacio (b).

La ventana de persianas LCP maneja luz difusa en vez de luz directa solar, por lo que la distribución de iluminancia es uniforme y el deslumbramiento se reduce. Este dispositivo puede instalarse en todas las fachadas para permitir vistas al igual que ventilación, cuando las ventanas están en posición horizontal.

### **Cristal con tecnologías avanzadas**

El componente más importante y común de luz natural es el vano. Los vanos permiten el intercambio de luz, calor, sonido, al igual que proporcionan ventilación natural y vista. La forma y ubicación de las ventanas en un espacio afectan la distribución de luz, el arreglo de luz y sombra y el modelado de formas y texturas en las superficies. Los sistemas de cristal en edificios comerciales, en particular, pueden tener un impacto importante en el uso de energía, en el empleo de luz natural, en la comodidad visual y térmica y en el bienestar y productividad de las personas. Además, es probable que las características de variabilidad y naturalidad de la luz de día presentan beneficios para la salud.

Las ventanas y otras aberturas con cristal deben solucionar necesidades complejas que requieren propiedades variables y deben también resolverse situaciones de conflicto. Por ejemplo, el cristal que proporciona una vista también debe proporcionar privacidad visual; el cristal que admite luz natural y, por ende, reduce la necesidad de iluminación artificial, también puede producir deslumbramiento que incomoda e incapacita. El sol que proporciona calor en invierno también contribuye a la incomodidad térmica que requiere aire acondicionado en verano.

Las ventanas se consideran generalmente como causantes intrínsecos de consumo de energía, dado que la tecnología tradicional, en la mayor parte de los edificios causa un aumento en las cargas de calefacción y refrigeración. El problema que enfrenta el diseñador de edificios resulta de las influencias variables climáticas que inciden en los exteriores de estos edificios. Están disponibles muchas opciones que extienden el grado de control solar y térmico que puede proporcionar el cristal. La selección del cristal puede influenciar la transmitancia total, las propiedades espectrales, y las propiedades direccionales, que satisfarán algunas de las demandas pero no necesariamente todos los requerimientos de desempeño.

Nuevas tecnologías de cristal hacen posible que penetre de manera adecuada la luz natural a la vez que controlan las cargas de refrigeración y el deslumbramiento. Aun cuando los diseñadores han podido seleccionar entre un rango de valores muy variados de transmitancia de luz, muchos de los cristales de otras épocas no diferenciaban entre transmitancia de luz y

transmitancia de calor solar, dado que parte de la luz solar es infrarrojo. Algunos cristales nuevos con acabados especiales proporcionan luz fría reflejando aproximadamente mitad del calor solar. Tecnologías avanzadas tales como acabados espectralmente selectivos y materiales electrocrómicos, pueden tener un impacto revolucionario en edificios de todo tipo.

Ya existe o se esta desarrollando la tecnología que puede convertir las ventanas en productores de energía para optimizar el desempeño energético de los edificios. Mejoras en el diseño, instalación y tecnología de las ventanas pueden reducir las ganancias y pérdidas energéticas indeseables, a la vez de capturar los beneficios de la ganancia solar y luz natural. Más aún, con las nuevas tecnologías de vanguardia en el uso de cristales, los componentes transparentes de la envoltura del edificio pueden ser más flexibles en su respuesta al calor y la luz.

### **Sistemas de cristal electrocrómico**

Materiales de cristal que responden a cambios horarios, diarios y estacionales climáticos se conocen como materiales ópticos de interrupción y cambio (Optical Switching Materials). Estos acabados pueden controlar el flujo de luz o calor hacia adentro o hacia afuera de la ventana del edificio, de esta manera desempeñando una función de manejo de energía. Inherentemente proporcionan un cambio en las propiedades ópticas del cristal bajo la influencia de luz, calor, o un campo eléctrico, o en la combinación de estos. Dependiendo de su diseño los acabados pueden controlar deslumbramiento modular, transmitancia de luz natural, limitar ganancias de calor para reducir cargas de refrigeración y mejorar la comodidad térmica.

Considerada como la tecnología cromogénica más adecuada para el control de energía en los edificios, la electrocromica es tema de investigación intensiva, particularmente en el Centro de Investigación Electroquímica en Berkeley California.

Materiales electrocrómicos sufren un cambio reversible en sus propiedades ópticas al inyectárseles fotones de luz. Típicamente consisten de dos electrodos separados por un conductor de iones. Conductores transparentes forman los contactos. En la mayor parte de las células electrocrómicas el pasaje de carga en una dirección causa un cambio de color en uno o los dos electrodos; o, en un pequeño grupo de células, la coloración ocurre en el electrolito adyacente a los electrodos. El efecto se cancela al pasar la misma cantidad de carga en el sentido contrario. De tal manera al adquirir color, la célula permanecerá de esa manera, hasta que pierde el color al cambiar de dirección la corriente. En otras palabras, la célula puede tener memoria a largo plazo y solo emplea energía para cambiar su estado de color.

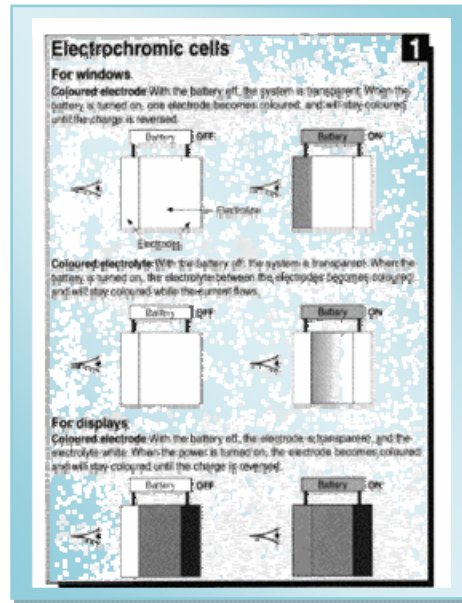


Figura 3.14 – Tipos de células electrocrómicas

Cuando estas células se ensamblan, de tal manera que desempeñan una función específica, tal como desplegar información, o en el control de energía en un edificio, se convierten en parte de un arreglo más complejo denominado sistema electrocrómico. Son estos los sistemas que prometen aplicaciones impresionantes de control de color.

Los sistemas electrocrómicos ofrecen un amplio rango de aplicaciones – una pequeña carga eléctrica es todo lo que se requiere para cambiar el color del cristal en ventanas, espejos o displays. Una importante ventaja de las células electrocrómicas es que se prestan particularmente para ser utilizadas en espacios muy grandes. Esto significa que son igualmente apropiadas para grandes superficies de ventanas en donde una célula es todo lo que se requiere. Se están desarrollando ventanas con estas características para todo tipo de edificios en todo el mundo, incluyendo ventanas llamadas inteligentes en Australia.

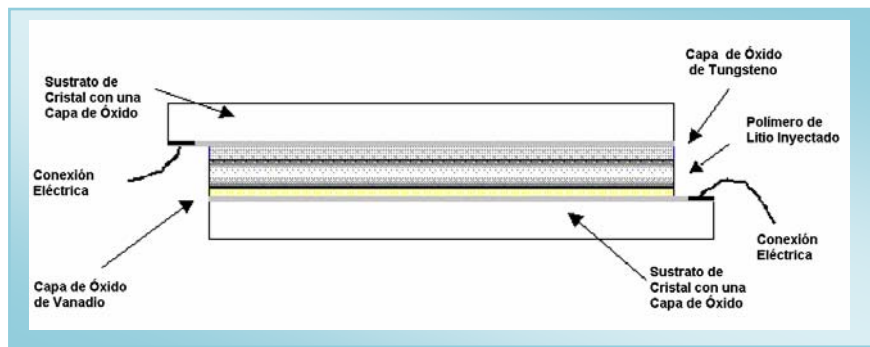


Figura 3.15 Corte esquemático de una ventana inteligente

En el estado oscurecido de “rechazo de calor”, la ventana transmite suficiente luz para comodidad y visibilidad pero rechaza toda la radiación infrarroja. En el estado “E bajo” sin color, transmite casi toda la luz, pero refleja el calor, manteniendo condiciones de comodidad en los espacios arquitectónicos. Estudios y cálculos muestran que las ventanas inteligentes pueden lograr ahorros de energía mayores a un treinta por ciento en un amplio rango de latitudes con ahorros en calefacción, refrigeración, e iluminación.

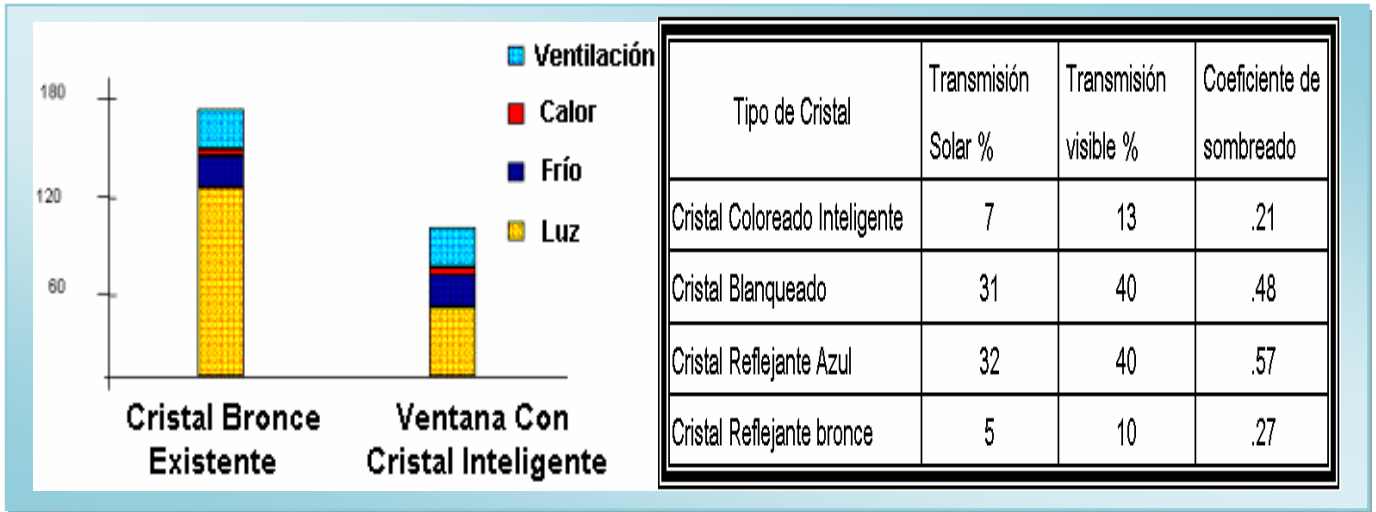


Figura 3.16 - Cristales inteligentes atributos principales

Otros avances en materiales de cristal cromogénicos incluyen:

■ **Cristales líquidos:**

Esta tecnología ya se comercializa. Efectúa un cambio de estado transparente a un estado blanco difuso. Su función principal es la de proporcionar privacidad y control de deslumbramiento, de tal manera que puede ser sustituto para los sistemas de control solar convencionales. En el estado difuso, fundamentalmente esparce hacia el frente, pero también controla ganancias de calor solar.

■ **Fotocrómica:**

Estos materiales que se oscurecen como respuesta directa a la luz solar, no son tan versátiles como los materiales electrocrómicos por dos motivos: (1) no pueden controlarse manualmente y (2) un desempeño óptimo en cuanto a energía, requiere que se tomen en cuenta condiciones de temperatura al igual que radiación solar. Por ejemplo, una ventana fotocrómica puede oscurecerse en un día soleado, frío, cuando es deseable una ganancia de calor solar.



La ventana convencional es ahora sólo una de muchas opciones en el diseño de luz natural. Es obvio que existen un gran número de sistemas posibles de iluminación natural, cada uno con sus ventajas y desventajas. Sin embargo, debemos ser conscientes de que existe poca información que permita un análisis cuantitativo del potencial y beneficios, rendimiento y costos de los sistemas innovadores de luz natural.

## 15.0 Sistemas de Luz Natural

### 15.1 Introducción

Este capítulo describe las características de sistemas de luz natural de vanguardia para auxiliar a los profesionales de la construcción en la elección de algún sistema. Después de esta introducción, la cual resume los elementos clave en el proceso de toma de decisiones sobre sistemas de iluminación natural, la sección 2 consiste de una matriz detallada de sistemas de iluminación natural clasificados en dos grupos generales: aquéllos con y aquéllos sin control solar. Las descripciones técnicas que se encuentran de la sección 3 a la 14 proporcionan los detalles sobre el diseño y aplicación de cada sistema, los principios físicos sobre los cuales se fundamentan, al igual que información sobre controles, mantenimiento, costos y ahorro de energía, ejemplos de su aplicación, y simulación o resultados de simulación o medición del desempeño que se asocia con cada sistema.

Los sistemas en este capítulo representan la gran variedad de sistemas avanzados de luz natural que se encuentran disponibles para la profesión de la construcción. Algunos de estos sistemas todavía están en la etapa de desarrollo o prototipo y algunos sistemas son sólo conceptos arquitectónicos más que productos.

Todos estos sistemas contienen distintas características que se relacionan con los parámetros principales de desempeño. Debido a que estos parámetros pueden tener una importancia distinta en casos de diseño, es imposible desarrollar una escala de evaluación unificada o definir un método de selección único para elegir el mejor sistema de luz natural en una situación determinada.

Sin embargo, existen algunas estrategias generales para la toma de decisiones sobre la utilización de algún sistema de iluminación natural para un proyecto específico.

En primer lugar, un diseñador debe hacerse las siguientes preguntas:

- En el caso que me interese, ¿conviene aplicar un sistema de luz natural?
- ¿Qué tipo de problemas puedo resolver con un sistema de luz natural?
- ¿Qué beneficios se lograrían con un sistema de luz natural?

Si basados en estas preguntas iniciales, parece ser una opción prometedora el uso de luz natural, la siguiente pregunta debe ser:

¿Qué sistema debo elegir?

Este capítulo presenta la más amplia y actualizada información incluyendo las evaluaciones del desempeño y un análisis experto para auxiliar al diseñador en la respuesta de esta pregunta.

Los parámetros clave en la selección de un sistema son:

- Condiciones con respecto a luz natural del predio: latitud, nubosidad, obstrucciones
- Objetivos del empleo de luz natural
- Estrategias de luz natural implícitas en el diseño arquitectónico
- Esquema y función de vanos
- Objetivos en la reducción del uso de energía
- Restricciones operacionales – condiciones de mantenimiento variable
- Restricciones de integración – arquitectónico o constructivo
- Restricciones económicas

También es importante enfocarse en los objetivos principales para utilizar sistemas de luz natural:

- Redirigir la luz natural hacia zonas de poca iluminancia
- Mejorar la cantidad de luz natural para iluminar las tareas visuales
- Mejorar la comodidad visual y el control del deslumbramiento
- Lograr protección solar (proporcionar sombras) y protección térmica

Es muy importante que el que quiera comparar los métodos de los distintos sistemas, comprenda el contexto de los resultados que se proporcionan. Algunos de los resultados medidos provienen de experimentos con maquetas a escala bajo condiciones de luz simulada, mientras que otros provienen del empleo de locales de tamaño real bajo condiciones del cielo reales, en diferentes ubicaciones en todo el mundo. Dado que los locales de prueba y sus

condiciones son tan diferentes de un lugar a otro, no podemos comparar los resultados numéricos de distintos lugares experimentales. Las condiciones generales que se establecen para cada sistema son válidas, pero los detalles específicos, tales como los niveles de iluminancia absolutos, no pueden compararse de un lugar a otro en la información que se proporciona.

## 15.2 Matriz de Sistema

La matriz que aparece a continuación cubre dos grupos de sistema de iluminación natural:

- Aquellos que no cuentan con protección solar
- Aquellos que sí cuentan con ésta

### Sistemas de luz natural con protección solar

A continuación se describen dos tipos de sistemas de luz natural con protección solar:

Sistemas que dependen principalmente de luz difusa del cielo y rechazan luz directa solar, y sistemas que fundamentalmente utilizan luz solar directa, rediriéndola hacia el plafón o hacia ubicaciones arriba del nivel de la vista.

Los sistemas de protección solar se proyectan para protección solar al igual que para iluminación natural; también pueden resolver otro tipo de cuestiones que tienen que ver con luz natural, tales como protección con respecto al deslumbramiento y redirección de luz natural directa o difusa. El empleo de sistemas convencionales de protección solar, tales como persianas, frecuentemente reducen de manera significativa el ingreso de luz natural a un local. Para aumentar la cantidad de luz natural pero, al mismo tiempo, seguir proporcionando protección solar, se han desarrollado sistemas avanzados que protegen el espacio cerca de la ventana de la luz directa solar, pero también, dirigen la luz solar directa o difusa hacia el interior del espacio.

### Sistemas de luz natural sin protección solar

Sistemas de luz natural sin protección solar se diseñan principalmente para redirigir la luz natural hacia espacios lejanos de la ventana o del tragaluz. Pueden o no bloquear la luz directa solar. Estos sistemas pueden dividirse en cuatro categorías:

- Los **sistemas que guían la luz difusa** redirigen la luz natural desde áreas específicas de la bóveda celeste hacia el interior del local. Bajo condiciones de cielo nublado, el área cerca del cenit celeste es mucho más brillante que el área cerca del horizonte. Para lugares en donde existen obstrucciones extremas de gran altura, típicas en ambientes urbanos de alta densidad, la porción superior del cielo puede ser la única fuente de luz natural. Estos sistemas que guían la luz pueden mejorar la utilización de luz natural bajo esas condiciones.
- Los **sistemas que guían la luz directa** envían la luz solar directa hacia el interior del espacio arquitectónico sin los efectos secundarios de deslumbramiento y sobrecalentamiento.
- Los **sistemas difusos que dispersan la luz** se emplean en luz natural cenital o aberturas que se encuentran a gran altura para producir una distribución pareja de luz natural. Si estos sistemas se emplean en ventana verticales pueden resultar en gran deslumbramiento de gran impacto.
- Los **sistemas de transporte de luz** recogen y transportan luz solar a través de grandes distancias hacia la parte central del edificio por medio de fibras ópticas o tubos de luz.

### Nota Sobre la Matriz

Algunos sistemas incluidos en la matriz pueden cumplir múltiples funciones, por lo que aparecen en más de una categoría; por ejemplo, repisas de luz que redirigen luz natural difusa y directa.

1.- Sistemas de Persianas											
Categoría	Tipo / Nombre	Esquema	Tipos de Clima	Condiciones	Criterio para la Elección de Elementos						
					Protección contra Deslumbramiento	Vistas Exteriores	Profundidad de Luz	Iluminación Homogénea	Ahorro de Energía (En Luz Artificial)	Necesidad de Rastreo	Disponibilidad
1 A Usando Principalmente Luz de Cielo Difusa	Paneles Prismáticos (→4.5)		Todos los Climas	Ventana Vertical, Claraboyas	D	N	D	D	D	D	A
	Prismas y Persiana Veneciana		Climas Templados	Ventana Vertical	Y	D	Y	Y	Y	Y	A
	Espejos Protectores de Sol		Climas Templados	Claraboyas, Techo de Cristal	D	N	N	Y	N	N	A
	Abertura Anidolica Cenital (→4.12,4.13)		Climas Templados	Claraboyas	Y	N	N	Y	Y	N	T
	Sistema de sombreado Selectivo Direccional con un elemento óptico holográfico(→4.11)		Todos los Climas	Ventana Vertical, Claraboyas, Techo de Cristal	D	Y	N	D	Y	Y	T
	Persianas transparentes Sistema con HOE basado en una Total Reflexión (→4.11)		Climas Templados	Ventana Vertical, Claraboyas, Techo de Cristal	D	Y	N	Y	Y	Y	A
Y = Si    D = Dependende    N = No    A = Disponibilidad    T = Fase de Prueba "→n "					N = Ver Sección No.						

1.- Sistemas de Persianas											
Categoría	Tipo / Nombre	Esquema	Tipos de Clima	Condiciones	Criterio para la Elección de Elementos						
					Protección contra Deslumbramiento	Vistas Exteriores	Profundidad de Luz	Iluminación Homogénea	Ahorro de Energía (En Luz Artificial)	Necesidad de Rastreo	Disponibilidad
1B Usando Principalmente la Luz Solar			Climas Calurosos, Cielos Soleados	Ventanas Verticales por Encima del Observador	Y	Y	D	D	D	N	T
			Todos los Climas	Ventanas Verticales	Y	D	Y	Y	Y	Y	A
	Persiana Lumínica Para Redireccionar la Luz Solar		Todos los Climas	Ventanas Verticales	D	Y	Y	Y	Y	N	A
	Perfiles de Cristal con Reflejante		Climas Templados	Ventanas Verticales, Claraboyas	D	D	D	D	D	N	A
	Claraboya con paneles cortados con láser		Climas Calurosos, Cielos Soleados, Bajas Altitudes	Claraboyas	D		Y	Y	Y	N	T
			Climas Templados	Ventanas Verticales, Claraboyas	Y / D	D	D	D	D	Y	A
	Persianas Solares Anidolíticas (→4.13)		Todos los Climas	Ventanas Verticales	Y	D	Y	Y	D	N	T


Y = Si    D = Dependende    N = No    A = Disponibilidad    T = Fase de Prueba "→n"    N = Ver Sección No.



1.- Sistemas de Luz Natural sin Incluir Persianas											
Categoría	Tipo / Nombre	Esquema	Tipos de Clima	Condiciones	Criterio para la Elección de Elementos						
					Protección contra Deslumbramiento	Vistas Exteriores	Profundidad de Luz	Iluminación Homogénea	Ahorro de Energía (En Luz Artificial)	Necesidad de Rastreo	Disponibilidad
<b>2A</b> Luz Difusa Por Sistemas Guía	Repisa Lumínica (→4.3)		Climas Templados, Cielos Nublados	Ventanas Verticales	D	Y	D	D	D	N	A
	Sistema Anidolico Integrado (→4.12)		Climas Templados	Ventanas Verticales	N	Y	Y	Y	Y	N	A
	Plafón Anidolico (→4.12)		Climas Templados, Cielos Nublados	Fachadas Verticales por Encima de la Ventana Vista		Y	Y	Y	Y	N	T
	Sistema de Pescado		Climas Templados	Ventanas Verticales	Y	D	Y	Y	Y	N	A
	Luz Cenital Guiada por Elementos Con HOE (→4.10)		Climas Templados, Cielos Nublados	Ventanas Verticales, Claraboyas		Y	Y	Y	Y	N	A
	Panel Cortado Por Láser (→4.6)		Todos los Climas	Ventanas Verticales, Claraboyas		N	Y	Y	Y	N	T
<b>2B</b> Luz Directa Guiada Por Sistemas	Paneles Prismáticos (→4.5)		Todos los Climas	Ventanas Verticales, Claraboyas		D	D	D	D	N / T	A
Y = Si    D = Dependende    N = No    A = Disponibilidad    T = Fase de Prueba "→n "					N = Ver Sección No.						

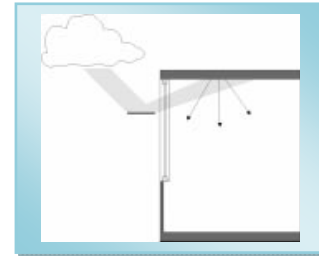
1.- Sistemas de Persianas											
Categoría	Tipo / Nombre	Esquema	Tipos de Clima	Condiciones	Criterio para la Elección de Elementos						
					Protección contra Deslumbramiento	Vistas Exteriores	Profundidad de Luz	Iluminación Homogénea	Ahorro de Energía (En Luz Artificial)	Necesidad de Rastreo	Disponibilidad
2 B Luz Directa Guiada Por Sistemas	HOE en Luz Cenital		Todos los Climas	Claraboyas	D	Y	Y	Y	Y	N	A
	Cristal direccionador de los Rayos Solares (→4.9)		Todos los Climas	Ventanas Verticales, Claraboyas	D	N	Y	Y	Y	N	A
2 C Sistemas de Esparcimiento			Todos los Climas	Ventanas Verticales, Claraboyas	N	N	Y	Y	D	N	A
2 D Transporte Lumínico	Helióstato		Todos los Climas, Cielos Soleados				Y		Y	Y	A
	Tubo Lumínico		Todos los Climas, Cielos Soleados				Y	Y	Y	N	A
	Tubo Solar		Todos los Climas, Cielos Soleados				Y	D	Y	N	A
	Fibras		Todos los Climas, Cielos Soleados				Y		Y	Y	A

Y = Si    D = Depende    N = No    A = Disponibilidad    T = Fase de Prueba "→n"    N = Ver Sección No.

1.- Sistemas de Persianas											
Categoría	Tipo / Nombre	Esquema	Tipos de Clima	Condiciones	Criterio para la Elección de Elementos						
					Protección contra Deslumbramiento	Vistas Exteriores	Profundidad de Luz	Iluminación Homogénea	Ahorro de Energía (En Luz Artificial)	Necesidad de Rastreo	Disponibilidad
<b>2D</b> Transporte de Luz	Guía Lumínica de plafón		Climas Templados, Cielos Soleados				Y	Y	Y	N	T
Y = Si    D = Depende    N = No    A = Disponibilidad    T = Fase de Prueba "→n"    N = Ver Sección No.											

## 15.3 Repisas lumínicas

Una repisa de luz es un sistema clásico de luz natural, conocido por los faraones egipcios, y que está diseñado para proporcionar sombra y reflejar luz desde su superficie superior y proteger del deslumbramiento directo del cielo.



### 15.3.1 Descripción técnica

#### Componentes

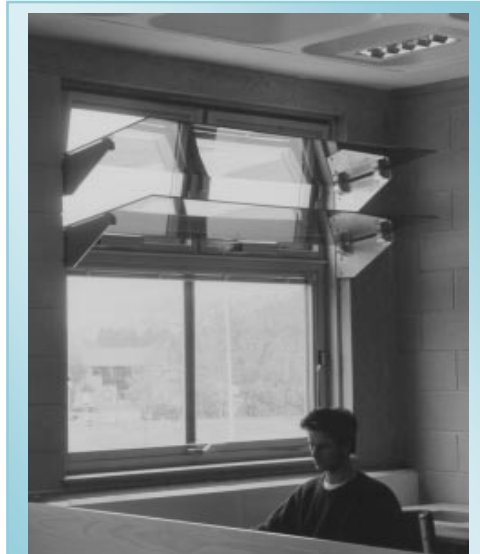
Una repisa de luz, es generalmente un desviador horizontal o mínimamente inclinado ubicado en el interior o el exterior de una ventana. La repisa de luz puede ser parte integral de una fachada o puede estar sobrepuesta en un edificio.

#### Producción

Las repisas lumínicas no son productos estándar que se compran en cualquier supermercado; deben diseñarse para que se ajusten a la situación arquitectónica específica en la que se van a utilizar.

#### Ubicación del sistema de vanos

Una repisa de luz se ubica generalmente sobre el nivel de la vista. Divide un vano en dos partes: un área de vista en la parte inferior y, una parte superior que pudiera llamarse de claraboya. En algunas ocasiones las repisas lumínicas utilizan sistemas ópticos avanzados para redirigir la luz hacia áreas profundas en el interior del edificio. Las repisas lumínicas generalmente se ubican de tal forma que se evite el deslumbramiento y se logre una vista hacia el exterior; su ubicación puede determinar la configuración o la forma del espacio, la altura del plafón, el nivel de vista de la persona que se encuentra en el espacio. En general, mientras más baja sea la altura de la repisa de luz, mayor será el deslumbramiento y mayor la cantidad de luz reflejada hacia el plafón.



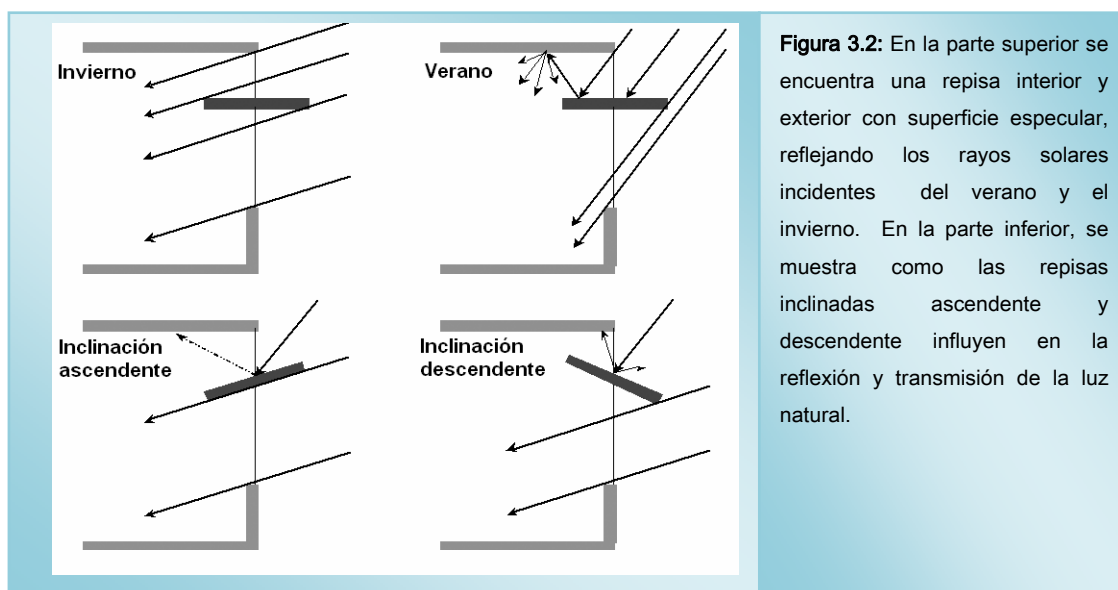
**Figura 3.1:** Doble repisa lumínica semi-Transparente hecha de cristal reflejante.

## Barreras técnicas

Una repisa lumínica interior que redirige y refleja la luz, va a reducir la cantidad de luz que recibe el espacio interior en relación a una ventana convencional. Estudios realizados con maquetas tamaño natural y a escala han mostrado que las ventanas con repisas lumínicas interiores producen un FLD (Factor de Luz de Día) general mucho menor sobre el plano de trabajo en todo el espacio interior, en comparación con una ventana de igual tamaño sin repisa. En algunos casos, el uso de una repisa de luz exterior hace posible aumentar la cantidad de luz natural, en comparación con ventanas tradicionales. Una repisa de luz exterior aumenta la exposición que se tiene con respecto a la elevada luminancia cerca del cenit del cielo. Dependiendo de la geometría de la repisa lumínica, la luz natural disponible se puede distribuir de manera más uniforme a través de una repisa de luz exterior, en comparación con una ventana no protegida de igual tamaño.

### 15.3.2 Aplicación

Las repisas lumínicas afectan el diseño arquitectónico y estructural de un edificio y deben considerarse desde la primera etapa de diseño debido a que requieren un plafón relativamente alto para funcionar eficazmente. Las repisas de luz deben diseñarse específicamente para cada orientación, forma de espacio y latitud. Pueden emplearse en climas que incluyen mucha luz solar directa y también pueden utilizarse en espacios profundos con orientación sur en el hemisferio norte u orientación norte en el hemisferio sur. Las repisas lumínicas no funcionan igual de bien en orientaciones este y oeste y en climas con muchos días nublados.



**Figura 3.2:** En la parte superior se encuentra una repisa interior y exterior con superficie especular, reflejando los rayos solares incidentes del verano y el invierno. En la parte inferior, se muestra como las repisas inclinadas ascendente y descendente influyen en la reflexión y transmisión de la luz natural.

### 15. 3.3 Principios y características físicas

La orientación, ubicación en la fachada (interior, exterior o combinado) y la profundidad de la repisa de luz, siempre será un compromiso entre los requerimientos de luz natural y sombra. Una repisa de luz interior que redirige y refleja la luz, reduce la cantidad de luz que recibe el espacio interior. Para espacios orientados al sur y en el hemisferio norte, se recomienda que la profundidad de la repisa de luz interior sea más o menos igual a la altura de la claraboya que se da por encima de la repisa. El mover la repisa de luz hacia el exterior crea un movimiento paralelo del área en sombra hacia la fachada de la ventana, lo cual reduce los niveles de luz cerca de la ventana y mejora la uniformidad de la luz natural. La profundidad que se recomienda para una repisa lumínica exterior es aproximadamente igual a su propia altura por encima del plano de trabajo. La altura de la parte del cristal y la profundidad de la repisa lumínica deben seleccionarse de acuerdo a la latitud y el clima específico.

En latitudes cercanas al ecuador la profundidad de las repisas lumínicas interiores puede ampliarse para bloquear la luz solar directa que penetra a través de la ventana con claraboya en todo momento. En latitudes mayores y con espacios orientados al oriente o poniente, una repisa lumínica puede permitir el ingreso de parte de la luz solar directa (con elevación solar pequeña), a través del espacio entre la repisa y el plafón, teniendo como resultado el que se requieran dispositivos adicionales para proporcionar sombra.

El aumentar la profundidad de la repisa reducirá el problema, pero también va a obstruir la penetración de luz natural deseada e impedirá la vista al exterior. El proporcionarle sombra al perímetro de la ventana, inclinando la repisa hacia abajo, va a reducir la cantidad de luz reflejada hacia el plafón. Inclinarla hacia arriba va a mejorar la penetración de luz natural reflejada y también reducirá los efectos de sombra. La repisa lumínica horizontal generalmente representa el mejor compromiso entre los requerimientos de sombra y la distribución de luz natural.

El plafón es una parte secundaria importante del sistema de repisa lumínica, porque la luz es reflejada por la repisa hacia el plafón y luego ésta, a su vez, es reflejada del plafón hacia el espacio arquitectónico. La característica del plafón que afecta este proceso es el acabado, incluyendo su textura, y su inclinación. Aunque un plafón con una superficie muy lisa va a reflejar más luz hacia el espacio, debe cuidarse que no produzca deslumbramiento de la luz reflejada del plafón cerca de la repisa. Para evitar deslumbramiento, el acabado del plafón debe ser blanco difuso o pintura mate.

La penetración de luz desde un sistema de repisa lumínica depende de la inclinación del plafón. Un plafón de dos aguas que se inclina hacia arriba a partir de la ventana y hacia el centro del edificio va a aumentar de manera dramática la profundidad a la que va a penetrar la luz por medio de la repisa lumínica y hacia el interior del edificio. En un plafón plano, la luz de la repisa se refleja mayormente hacia el espacio cercano a la ventana, por lo que la penetración de la luz hacia el espacio es mucho menor.

### **Repisa lumínica convencional**

Una repisa lumínica es principalmente un sistema fijo sólido, sin embargo, algunas repisas lumínicas exteriores pueden incorporar persianas que reduzcan la reflexión hacia arriba. El acabado de una repisa lumínica afecta el aprovechamiento y dirección de la luz que se refleja desde su parte superior hacia el plafón. Un acabado mate produce una reflexión difusa sin control direccional, en contraste con una reflexión especular en que el ángulo de incidencia es casi igual al ángulo de reflexión. Para una superficie perfectamente difusa, sólo la mitad de la luz reflejada será distribuida hacia el espacio arquitectónico, pero, para una repisa lumínica interior, parte de esa luz “perdida” se refleja hacia el interior desde la superficie de cristal de la claraboya. Una superficie altamente reflejante (por ejemplo, un espejo, aluminio o un material pulido) refleja más luz hacia el plafón que una superficie difusa, pero también puede reflejar hacia el plafón una imagen de alguna configuración de suciedad que se encuentre en la parte superior de ésta. Un acabado semi-especular, para la parte superior de la repisa lumínica, puede dar mejores resultados. Otra posibilidad es el uso de una película prismática para enviar luz a mayor profundidad del espacio.

### **Repisa lumínica con tratamiento óptico**

Las repisas lumínicas con tratamiento óptico logran dos mejoras significativas sobre las convencionales, especialmente en climas de mucho soleamiento (figura 4.3:1). La primera mejora es que la geometría de la repisa lumínica es curva y segmentada para reflejar de manera pasiva la luz solar para altitudes solares específicas; y la segunda es que se encuentran disponibles comercialmente películas ópticas semi-especulares, altamente reflejantes que pueden incrementar el aprovechamiento de la luz de manera considerable. Los objetivos de diseño de las repisas lumínicas son: (1) bloquear el sol directo a todas horas, (2) aumentar los niveles de iluminancia provenientes de luz natural a una distancia de hasta de diez metros del muro en donde se encuentra la ventana, (3) minimizar las ganancias de calor solares a través de un tamaño de abertura de ventana óptimo y, de (4) mejorar la uniformidad de luz natural y el gradiente de luminancia en todo el espacio arquitectónico, bajo condiciones de luz

solar variable. Para un desempeño consistente durante todo el año, una repisa lumínica ópticamente tratada va a proyectarse de diez a treinta centímetros desde el muro exterior para interceptar ángulos solares elevados en verano, en ésta no se requiere ajuste activo ni control.

El diseño de una repisa lumínica tratada ópticamente consiste de un reflector principal inferior y un reflector secundario superior. Este sistema se ha desarrollado utilizando modelos a escala. Para ventanas verticales un desempeño eficiente requiere una altura del local mayor a 2.5 metros del piso al plafón. Es posible diseñar y adaptar una repisa de luz ópticamente tratada a edificios ya construidos pero, debe cuidarse que se integre a todas las características arquitectónicas existentes.

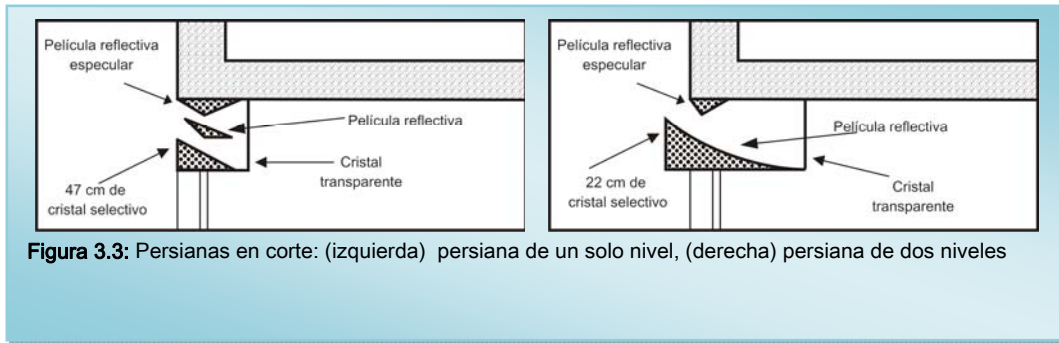


Figura 3.3: Persianas en corte: (izquierda) persiana de un solo nivel, (derecha) persiana de dos niveles

### Repisa lumínica de rastreo solar

Un ensamble reflejante de luz de superficie variable (VALRA = variable area light reflecting assembly) es un sistema de repisa lumínica de rastreo (figura 3.4) que refleja luz hacia el interior de un edificio. El sistema usa una superficie con película reflectiva de plástico sobre un ensamble de rodillo de rastreo dentro de una repisa lumínica fija. Este sistema aumenta la capacidad de proyección de una repisa fija de tal manera que

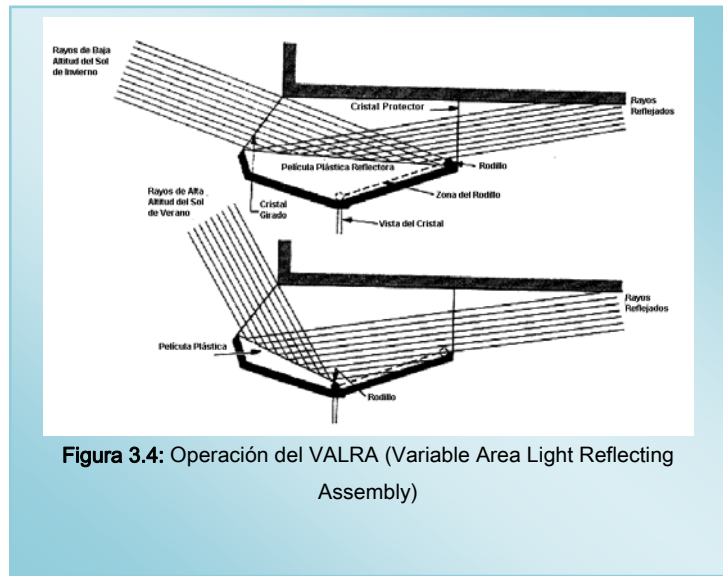


Figura 3.4: Operación del VALRA (Variable Area Light Reflecting Assembly)



funciona para todos los ángulos solares. A la fecha este sistema no se ha instalado en ningún edificio pero, existe una versión simplificada que puede ajustarse de acuerdo a la posición del sol o de la luminancia del cielo. Ésta es una repisa exterior articulada empleada en Dinamarca.

#### 15.3.4 Control

En general, repisas lumínicas móviles, y especialmente las motorizadas, son más caras que las repisas fijas; sin embargo, los sistemas móviles son mucho más flexibles en su control y aplicación.

#### 15.3.5 Mantenimiento

Las repisas lumínicas requieren limpieza continua. Una repisa interior se llena de polvo y una repisa exterior se ensucia fácilmente y es un lugar en el que anidan pájaros e insectos. Una superficie especular requiere de limpieza continua para mantener sus propiedades reflectivas. Repisas lumínicas ópticamente tratadas deben de estar selladas totalmente del medioambiente interior y exterior y, protegidas contra la suciedad y contacto con usuarios. Éstas no requieren de mayor mantenimiento que el de la limpieza de cristales interiores y exteriores.

#### 15.3.6 Costo y ahorro de energía

Comparando con otros sistemas de introducción de luz natural, las repisas lumínicas no representan grandes ahorros de energía, pero, si representan beneficios cualitativos para la percepción del usuario.

#### 15.3.7 Ejemplos de aplicación

- Universidad de Ingeniería de Montfort, Reino Unido: Repisa lumínica interna
- Greenpeace, Londres, Reino Unido: Repisa lumínica externa
- Sur de Staffordshire, Walsall, Reino Unido: Repisa lumínica inclinada interna y externa
- Cuartel general del distrito de Sacramento, Sacramento, California, USA: Repisa lumínica interna inclinada de poliéster (figura3.5)

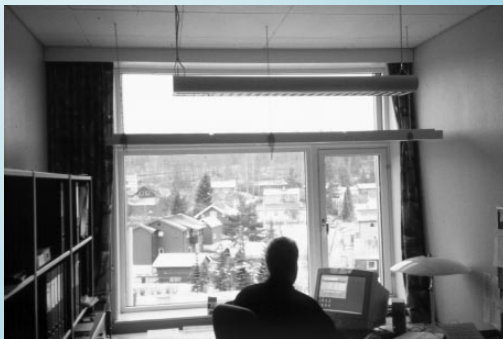
- Cámara de comercio de Palm Springs, Palm Springs, California, USA: Repisa lumínica con tratamiento óptico y claraboya



**Figura 3.5:** Vista Interior/Exterior de persianas interiores, SMUD California.



**Figura 3.6:** Lado sur de un sistema de luz natural ópticamente tratado, Palm Springs, California.



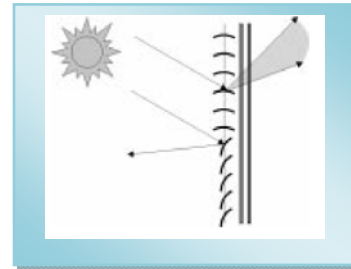
**Figura 3.7:** Vista interior de un cuarto de estudio con una repisa interior semi-transparente en un día de invierno



**Figura 3.8:** Persiana exterior inclinada descendente con su superficie semi-reflectiva, Dinamarca

## 15.4 Sistema de persianas de tiras y persianas ciegas

Sistema de persianas de tiras y persianas ciegas son sistemas clásicos de luz natural que pueden aplicarse como protección solar para evitar deslumbramientos y para redirigir la luz natural.



### 15.4.1 Descripción técnica

#### Componentes

Las persianas se componen de tiras múltiples horizontales, verticales, múltiples o inclinadas. Existen varios tipos de sistemas de persianas, algunos de los cuales utilizan formas y acabados muy especiales.

#### Ubicación en el sistema de vanos

Las persianas pueden colocarse al interior o exterior de cualquier ventana o tragaluz o entre dos cristales.

#### Barreras técnicas

Dependiendo del ángulo que hacen las tiras, las persianas interiores y exteriores obstruyen parcial o completamente las vistas exteriores. Las persianas verticales permiten una vista vertical del domo celeste, y las persianas horizontales reducen la vista vertical de la vista exterior. La percepción que tiene el usuario de una vista puede obstruirse a través de la estructura de tiras a pequeña escala, lo cual puede generar confusión visual al tratar que el ojo intente ordenar la vista exterior a través de la propia persiana. Muchos de los dos tipos de persianas se diseñan para que se les pueda retraer parcial o completamente. Bajo condiciones de sol directo y cielo despejado las persianas pueden producir líneas extremadamente brillantes a lo largo de las tiras provocando problemas de deslumbramiento. El sol directo y la luz de cielo difuso en persianas con un ángulo horizontal, pueden aumentar el deslumbramiento en la ventana debido a un aumento en el contraste de luminancia entre las tiras y las superficies adyacentes. El inclinar las persianas hacia arriba aumenta el deslumbramiento al igual que la visibilidad del cielo. El inclinar las persianas hacia abajo proporciona sombra y disminuye los problemas de deslumbramiento. Si el acabado de las persianas es brillante puede generar problemas adicionales de deslumbramiento, dado que el sol y la luz del cielo pueden verse reflejados por la superficie de las tiras directamente al campo visual del usuario. Algunos de estos problemas pueden resolverse utilizando superficies mate.

## 15.4.2 Aplicación

Estos distintos tipos de persianas pueden emplearse en todas las orientaciones y latitudes; éstas pueden añadirse a un sistema de vanos cuando se requiera. Persianas exteriores afectan el diseño arquitectónico y estructural de un edificio. Persianas interiores tienen un menor impacto. En la práctica, las persianas horizontales generalmente se usan en todas las orientaciones del edificio, mientras que las verticales se usan predominantemente en ventanas con orientación este y oeste. Diseños avanzados tienen diferentes requerimientos que los de persianas convencionales.

## 15.4.3 Principios y características físicas

Las persianas pueden obstruir, absorber, reflejar y / o transmitir radiación solar (difusa y directa) al interior de un edificio. Su efecto depende de la posición del sol y de la ubicación de las persianas exteriores o interiores, del ángulo de las tiras y de las características de reflexión de las tiras. De esta manera, las propiedades térmicas y ópticas de una ventana con persianas son altamente variables. Las persianas horizontales en una posición horizontal pueden recibir luz del sol del cielo y del piso. Tiras inclinadas hacia arriba transmiten luz principalmente del sol y del cielo, y las tiras que se inclinan hacia abajo transmiten luz principalmente del piso. Varios tipos de persianas pueden aumentar la penetración de luz natural que proviene de luz solar directa. Cuando el cielo está nublado, las persianas promueven una distribución pareja de la luz natural.

### Persianas fijas y móviles

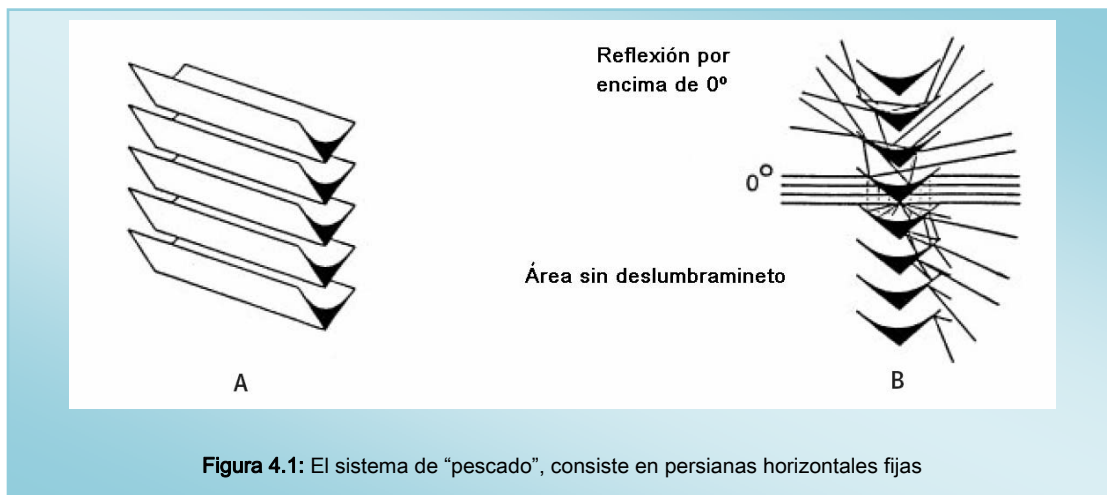
Los sistemas fijos, se utilizan generalmente para proporcionar protección solar en la forma de sombra, y los sistemas móviles se pueden emplear para controlar ganancias de calor, para proteger contra deslumbramiento, y para redirigir la luz natural. En días soleados las tiras inclinadas hacia abajo producirán protección solar por sombras efectivas, pero, bajo condiciones de cielo nublado, un sistema fijo puede causar un efecto desfavorable de sombras de manera importante, debido a que reducen la luz natural al interior. Los sistemas móviles deben poderse retraer parcial o completamente para controlar de manera óptima las condiciones exteriores. El ángulo de inclinación de las tiras, el acabado y el espaciamiento entre éstas, contribuyen a reflejar la luz solar y la luz del cielo hacia el interior.

### Persianas translucidas

Las persianas translucidas transmiten una fracción de la luz cuando se encuentran cerradas. Persianas verticales translucidas miden típicamente 10 cm de ancho y casi no requieren de limpieza. Las persianas translucidas pueden fabricarse de tela, plástico o material plástico perforado, ofreciendo varios niveles de transmitancia de luz. Cuando se iluminan por detrás las persianas pueden convertirse en grandes fuentes de deslumbramiento

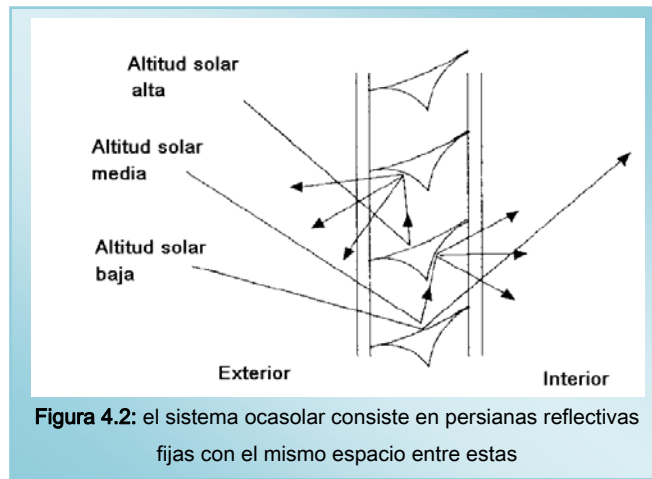
### Persianas que dirigen la luz

Hay muchos tipos de persianas que reflejan o dirigen la luz y generalmente consisten de superficies superiores de material altamente especular que, en ocasiones, incorpora perforaciones y curvatura cóncava. Las persianas que dirigen luz generalmente se colocan entre cristales y miden típicamente 10 a 12 cm. Estas persianas han sido diseñadas para reflejar la máxima cantidad posible de luz natural hacia el plafón, al igual que tener muy baja brillantez en ángulos por debajo de la horizontal.



Este sistema diseñado sólo para ventanas verticales, limita el deslumbramiento y redirige la luz difusa. Se necesitan dispositivos adicionales para proporcionar sombra en el caso de que se requieran limitar las ganancias de calor y la penetración de luz solar. Las persianas están diseñadas para que una cuarta parte de la luz del cielo que incide en éstas, sea transmitida a la parte superior de la habitación (plafón). Teóricamente el sistema sin cristales transmitirá el 60% de la luz difusa para la superficie de aluminio con una reflectancia del 80%.

El sistema “Okasolar”, que también es un sistema fijo, consiste de numerosas tiras curvas reflejantes de sección triangular (véase la figura 4.2) dentro de una unidad de doble cristal. El sistema refleja luz hacia el paflón en el invierno y tiene un efecto de sombra en el verano. Estas persianas se diseñan para ajustarse a la latitud en que se van a emplear.



#### 15.4.4 Control

Las persianas pueden operarse manualmente o de manera automatizada. Las persianas controladas de manera automática pueden aumentar el ahorro de energía, si se controlan para reducir las ganancias de calor solares, y admitir luz natural visible durante el día y variaciones estacionales de posición solar. Sin embargo, los sistemas automatizados pueden producir incomodidad en los usuarios, a quienes no les gusta sentir que no tienen control personal sobre el sistema. Sistemas operados manualmente son generalmente menos eficientes debido a que los usuarios pueden o no operarlos de manera óptima; por ejemplo, la operación puede motivarse por deslumbramiento o vista, o los sistemas pueden dejarse en una sola posición cuando el usuario se ausenta del espacio. Los estudios realizados demuestran que las posiciones para las persianas preferidas por los usuarios, son relativamente independientes a condiciones diarias, estacionales, y climáticas. Algunos estudios muestran que existe un vínculo entre el clima y las posiciones preferidas para las persianas.

#### 15.4.5 Mantenimiento

El mantenimiento de las persianas puede ser muy difícil, especialmente cuando tienen tiras de alta reflexión. Las tiras interiores recogen polvo, mientras que las tiras exteriores acumulan suciedad y nieve. Los sistemas entre cristales tienen la ventaja de requerir poca limpieza y no son tan susceptibles al daño, como por ejemplo, a doblarse como los sistemas interiores y exteriores.

### 15.4.6 Costo y ahorro de energía

Bajo condiciones de cielo despejado y sol brillante, algunos sistemas pueden aumentar la penetración de luz natural, reducir las cargas de refrigeración, y pueden lograr mayor uniformidad entre las áreas de alta iluminancia cerca de las ventanas y la zona interior más oscura. El costo y ahorro de energía resultan del uso más eficiente de la luz natural, sin las ganancias de calor solar, ni de cargas de refrigeración. Para condiciones de cielo nublado, los sistemas de persianas pueden ser eficientes en su consumo de energía si se operan adecuadamente, dado que la mayor parte de estos sistemas proporcionarán menos luz interior que la que penetraría a través de cristal transparente sin obstrucciones. Con sistemas de persianas reflejantes, los niveles de iluminancia pueden aumentarse bajo condiciones de cielo nublado, o soleado cuando el sol es perpendicular a la ventana, por ejemplo, aquéllos que se colocan en la parte superior de una ventana para evitar deslumbramiento reflejado.

### 15.4.7 Ejemplos de aplicación

- Edificio de Oficinas Gartner, Gundelfingen, Alemania: Persianas espejadas externas
- Edificio de Oficinas Riehle, Reutlingen, Alemania: Persianas reflectivas
- Banco NMB, Ámsterdam, Holanda: Persianas reflectivas
- Escuela Secundaria Swanlea, Whitechapel, Reino Unido: Persianas espejadas
- Cuartel Químico Hooker: Buffalo, Nueva York, Estados Unidos: Persianas móviles
- Oficina Ambiental del Futuro (Environmental Office of the Future), Watford, Reino Unido: Persianas cristalizadas motorizadas
- (Figura 4.3 análogos alrededor del mundo)





Figura 4.3: Persianas motorizadas de cristal las oficinas ambientales. Watford, Reino Unido

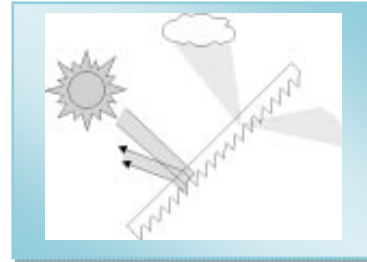


Figura 4.4: Vista interior del cuarto de prueba (derecha) y vista del cuarto de referencia (izquierda)



## 15.5 Paneles prismáticos

Los paneles prismáticos son dispositivos planos, delgados, de diente de sierra fabricados de acrílico transparente y se usan en climas templados para redirigir o refractar la luz natural. Cuando se emplean como sistemas para proporcionar sombra, refractan la luz solar directa, pero transmiten la luz del cielo difusa. Pueden aplicarse de muchas maneras diferentes en arreglos fijos o de rastreo solar, para fachadas y tragaluces.



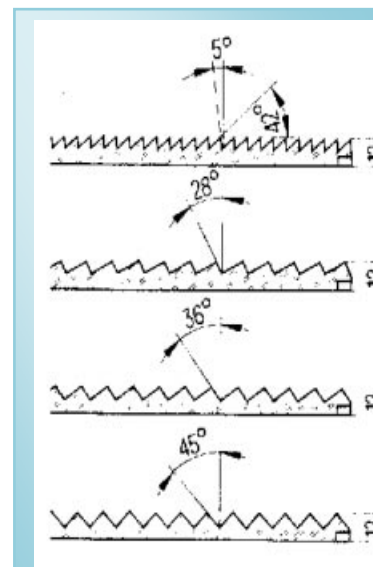
### 15.5.1 Descripción técnica

#### Componentes

Un panel lineal prismático consiste en un arreglo de prismas acrílicos con una superficie de cristal. Cada prisma forma una superficie plana conocida como respaldo y estas superficies cuentan con dos ángulos de refracción. Muy a menudo estos sistemas prismáticos se colocan dentro de una unidad de doble cristal para eliminar los problemas de mantenimiento.

#### Fabricación

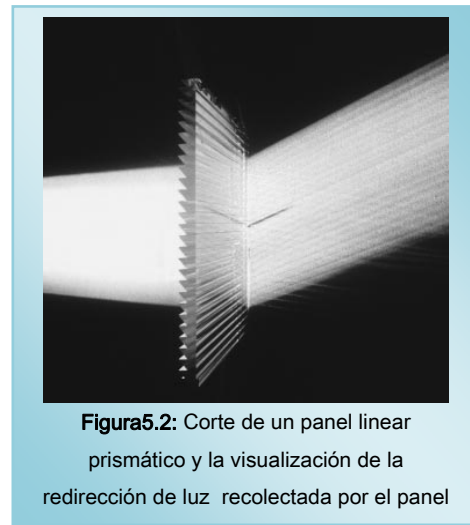
Actualmente existen dos procesos diferentes de manufactura para elaborar paneles prismáticos: uno de estos procesos es el **moldeado por inyección**, en este sistema los paneles prismáticos se fabrican de polímero acrílico en 4 diferentes configuraciones (ángulos distintos de refracción). Algunos paneles están recubiertos parcialmente con una película de aluminio con una reflectancia especular muy alta en una de las superficies de cada prisma. El segundo proceso llamado **grabado especializado**, es un proceso de grabado mediante el cual se producen prismas en un polímero de acrílico con un espaciamiento de menos de un milímetro de distancia. La película de acrílico resultante es muy ligera, sin embargo, mantiene muy buenas propiedades ópticas. Esta película puede aplicarse en la parte interior de una unidad de doble cristal.



**Figura 5.1:** Cuatro tipos diferentes de paneles prismáticos disponibles en el mercado

### Ubicación en el sistema de vanos

Los paneles prismáticos se emplean en configuraciones fijas y móviles. Dependiendo de la estrategia de luz natural que se emplea, pueden ubicarse del lado interior o exterior del cristal de la ventana. Los paneles ofrecen una vista transparente pero distorsionada hacia el exterior. Se requerirá de una ventana adicional para proporcionar vista, a menos de que se pueda abrir el panel para permitir el acceso a esa vista. Los paneles prismáticos cumplen dos funciones muy distintas: a) proporcionar forma, y b) redirigir la luz natural. Su ubicación con relación a la fachada o el techo depende de la aplicación específica que se le va a dar.



**Figura 5.2:** Corte de un panel linear prismático y la visualización de la redirección de luz recolectada por el panel

### Barreras técnicas

Si los paneles prismáticos se emplean como dispositivos para proporcionar sombra en una configuración fija, se requieren de componentes adicionales para evitar la dispersión del color. Estas pueden incluir, por ejemplo, un cristal grabado ligeramente difuso como respaldo del sistema.

Si se utilizan los paneles prismáticos disponibles para redirigir la luz solar, tienen la capacidad de redirigir parte de la luz solar hacia abajo provocando deslumbramiento. Análisis por computadora muestra que para un panel prismático vertical fijo, es inevitable que parte de la luz solar se dirija hacia abajo en ciertas épocas del año, pero con un perfil y una inclinación estacional correcta, se puede evitar este fenómeno. Históricamente, se ha conocido el efecto que tienen los paneles prismáticos con respecto a la luz natural. Existen patentes para este tipo de tecnología que data desde el principio del siglo XX, sin embargo, su fabricación constituía la barrera principal en el pasado. Con el desarrollo de polímeros acrílicos, fue posible, por primera vez, producir paneles de alta precisión. Adicionalmente, el cubrir las superficies de un prisma con acabados reflejantes, ha expandido las posibilidades de los sistemas prismáticos, sin embargo, el costo sigue siendo una barrera importante para que sea utilizado de manera frecuente.

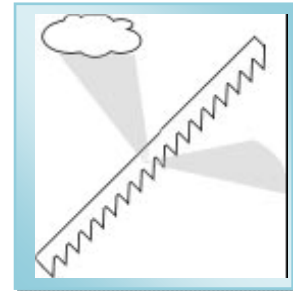
El elevado coeficiente de expansión de estos paneles, generalmente requiere que se diseñen tomando en cuenta la expansión térmica. Dado que el acrílico se incendia deben cuidarse los aspectos de peligro de incendio cuando se emplean los paneles prismáticos.

### 15.5.2 Aplicación

Como un sistema para dirigir la luz natural, los paneles prismáticos pueden emplearse para guiar la luz difusa del cielo o la luz directa solar.

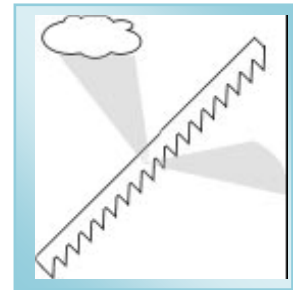
#### Luz natural difusa

Los paneles prismáticos generalmente se emplean en el plano vertical de la fachada para redirigir la luz desde el cielo exterior hacia la mitad superior del espacio arquitectónico. Para evitar el deslumbramiento y la dispersión de la luz en los paneles prismáticos, son esenciales un perfil correcto e inclinación adecuada, de acuerdo a las estaciones.



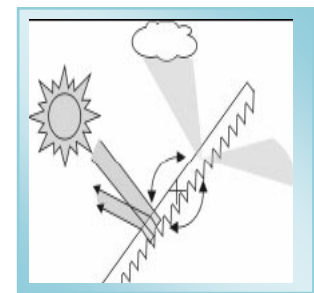
#### Sistema de protección solar fija

Esta aplicación se encuentra generalmente en techos con estructura de aluminio y cristal. La estructura prismática se diseña de acuerdo al movimiento solar, y los paneles se integran dentro de una unidad con doble cristal.



#### Sistema de protección solar móvil

Para esta aplicación los paneles prismáticos se colocan en forma de persiana. Se colocan por delante o por detrás del doble cristal, en un arreglo vertical u horizontal, por lo que una unidad de doble cristal ya no es necesaria. Esta aplicación controla deslumbramientos de luz solar directa pero no de luz de cielo. En otras palabras, sólo funciona como un dispositivo de protección solar por sombra.

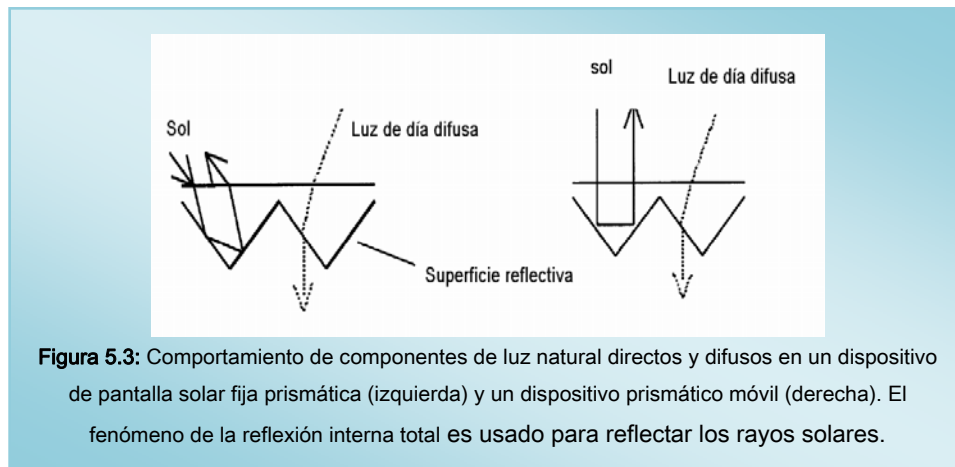


### 15.5.3 Principios y características físicas

La función principal del cristal prismático es lograr penetración profunda de la luz natural. El panel prismático utiliza tanto reflexión como refracción para permitir el uso controlado de la luz natural en los edificios. Este sistema puede ser diseñado para reflejar la luz que ingresa de ciertos rangos de ángulos a la vez que transmite la luz que proveen de otros ángulos. La refracción y la reflexión total interna basada en el ángulo crítico del material puede utilizarse

para cambiar la dirección de los rayos de luz. Las fracciones de luz reflejada y refractada dependen del ángulo de incidencia, los índices de refracción y el estado de polarización de la luz incidente.

Para la penetración profunda de la luz solar, un panel prismático se puede acomodar de tal modo que logre un amplio rango de altitudes solares. La luz refractada debe emerger a un ángulo menor de  $15^\circ$  por encima de la horizontal para obtener máxima penetración sin crear rayos de luz solar descendientes que puedan producir deslumbramiento. El desempeño del panel se determina a través de una configuración adecuada de ángulos de refracción. Generalmente se requiere una configuración específica para el perfil prismático dependiendo de las distintas situaciones geométricas y geográficas con el propósito de lograr niveles elevados de iluminación en las partes posteriores del espacio arquitectónico. Adicionalmente se requiere que el plafón tenga una gran textura y una elevada reflectancia, especialmente en el área cercana a la ventana y aproximadamente en una tercera parte del plafón.



#### 15.5.4. Control

Cuando los paneles prismáticos son utilizados como un sistema móvil, generalmente se requiere un dispositivo automático de rastreo para los paneles, según el movimiento del sol. Algunos paneles que redirigen la luz solar sólo requieren ciertos ajustes estacionales.

#### 15.5.5. Mantenimiento

Los paneles prismáticos son dispositivos delgados dentro de una unidad doble de cristal, por lo tanto no requieren de ningún mantenimiento, excepto la limpieza de los cristales interiores y exteriores. En caso de que los paneles se encuentren expuestos, se requerirá de cuidados especiales, de tal forma que se cuiden las superficies ópticas para no dañarlas.

### 15.5.6 Costo y ahorro de energía

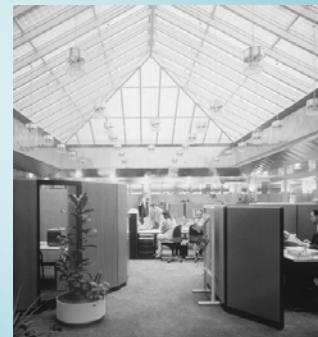
En este caso podemos mencionar que los costos de este material aún son elevados, en cuanto al ahorro de energía no podemos valorar este concepto porque este sistema es prácticamente nuevo y todavía no se han realizado todas las valoraciones necesarias con respecto a esté.

### 15.5.7 Ejemplos de aplicación

- Edificio 3M, Minnesota, Estados Unidos: Emisores de luz elaborados con película prismática
- Edificio de oficinas 3M, Texas, Estados Unidos: Tragaluz con película prismática en atrio



**Figura 5.4:** Biel, Suiza. Esta imagen muestra como la estructura enfrente del muro de cristal, se encuentra sostenida por unos postes que liberan la planta baja de paneles prismáticos móviles. Por detrás de esos paneles, se ubican paneles prismáticos redireccionadores de luz.



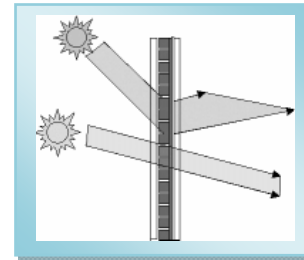
**Figura 5.5:** Alemania. Paneles prismáticos redireccionadores de luz en cámaras de doble cristal



**Figura 5.6:** Edificio del parlamento alemán, Bonn, Alemania. Paneles prismáticos móviles

## 15.6 Panel con cortes por laser

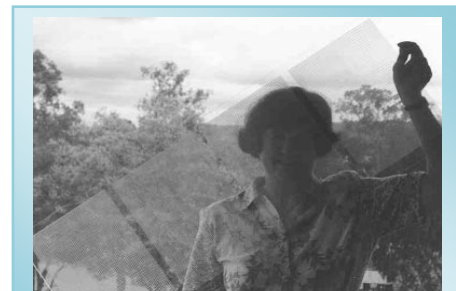
Paneles con cortes a través de rayo laser se convierten en sistemas de redirección de luz natural elaborados en paneles delgados de acrílico transparente.



### 15.6.1 Descripción técnica

#### Componentes

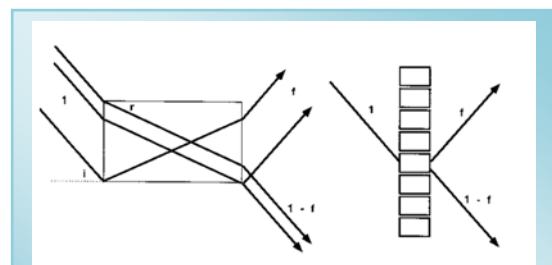
Los paneles con cortes por rayo laser son paneles delgados que se han fraccionado a través de rayos laser conformando un arreglo de elementos rectangulares. La superficie de cada corte laser se convierte en un pequeño espejo interno que desvía la luz que pasa a través del panel. Las características principales de este tipo de paneles son las siguientes:



**Figura 6.1:** Vista de un panel cortado por rayo laser.

1. Una elevada proporción de luz desviada a través de un gran ángulo ( $<120^\circ$ )
2. El mantener la vista que se percibe a través del panel (figura 6.1)
3. Un método flexible de fabricación adecuado para pequeñas o grandes cantidades

La luz se desvía dentro de cada elemento del panel; primero, por refracción; posteriormente, por reflexión interna total; y, nuevamente, por refracción (figura 6.2). Debido a que todos los desvíos son en la misma dirección, el desvío total es altamente provechoso. Generalmente los paneles se fijan dentro de las unidades de cristal, pero también pueden emplearse como cristal exterior, si la superficie cortada se protege por medio de laminación entre hojas de cristal. Normalmente los paneles se cortan a un ángulo perpendicular a la superficie, pero es posible efectuar los cortes a distintos ángulos para un control individual sobre la dirección de la luz desviada.

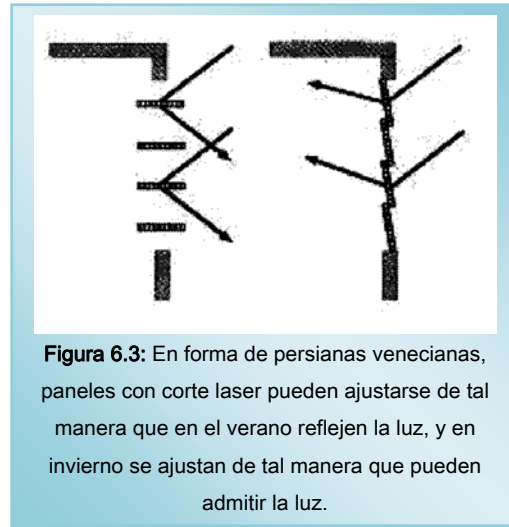


**Figura 6.2:** Esta imagen muestra la fracción "F" de la luz reflejada en un prisma y en prismas lineales. La fracción "F" está determinando la función de la incidencia del ángulo en esta imagen.



### Ubicación en el sistema de vanos

Los paneles con cortes por rayo láser pueden emplearse en arreglos fijos y móviles. Dentro de un sistema de vanos, los paneles permiten una vista a través de ellos, sin embargo, aún cuando estos paneles mantienen una alta transparencia, con distorsión limitada de la vista al exterior, deben emplearse principalmente como aberturas que permiten la penetración de luz natural y no como ventanas que proporcionan vistas; o por lo menos, no cuando el usuario se encuentra cerca del vano. Debido a que estos paneles redirigen la luz que penetra desde abajo y la redirigen hacia arriba, conviene que se instalen arriba del nivel de la vista para evitar el deslumbramiento.



**Figura 6.3:** En forma de persianas venecianas, paneles con corte laser pueden ajustarse de tal manera que en el verano reflejen la luz, y en invierno se ajustan de tal manera que pueden admitir la luz.

Estos paneles también pueden emplearse en arreglos de persianas, si consisten en tiras angostas como persianas venecianas u horizontales. Como persianas móviles, estos sistemas rechazan la luz solar cuando están en una posición abierta (figura6.3) y redirigen la luz cuando los paneles están en una posición de persianas cerradas (figura6.4). Ya sea en forma de persiana o veneciana, estos paneles con corte de rayo láser pueden ajustarse para utilizarse de manera abierta para impedir el paso de la luz en verano, o de manera cerrada para admitir la luz en invierno.

### Barreras técnicas

La barrera técnica principal con respecto a paneles con cortes por rayo láser es su costo. Actualmente estos paneles se diseñan y fabrican por pedido para dar la forma y tamaño que se requiera.

### 15.6.2 Aplicación

Los paneles desviadores de luz con cortes de rayo láser se pueden utilizar de las siguientes maneras:

- Un sistema fijo de control solar como se muestra en la figura 6.4
- Un sistema de redirección de luz fijo o móvil como se muestra en la figura 6.8

- Un sistema de protección solar y redirección de luz para ventanas en forma de persiana o veneciana como se muestra en la figura 6.3



Figura 6.4. Paneles cortados por laser con un ancho de 200 mm pueden ser instalados en una ventana con doble panel de cristal. Los paneles de la ventana en un ángulo correcto, rechazan una alta cantidad incidente de rayos solares mientras que al mismo tiempo mantiene una buena vista.

### 15.6.3 Principios y características físicas

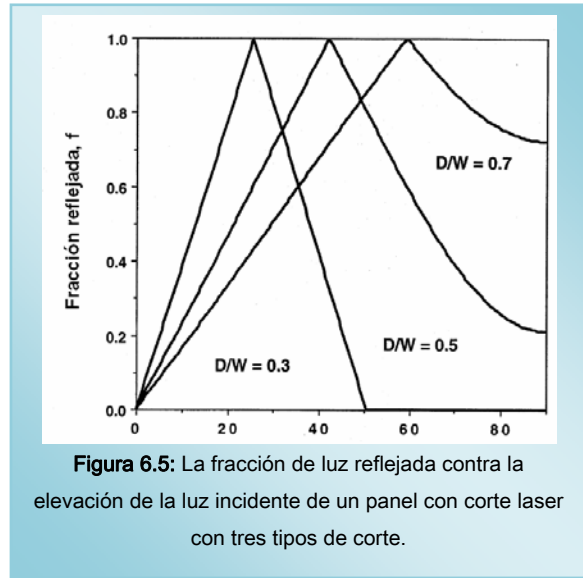
#### Sistema fijo de redirección de luz

Un panel con un espaciamiento y una profundidad de corte de 0.7 mm que se fija verticalmente en una ventana, va a desviar toda la luz que incide desde un ángulo superior de  $45^\circ$  y transmitirá la mayor parte de la luz incidente a un ángulo menor a  $20^\circ$  (figura 6.5). De esta manera, una gran parte de la luz se desvía a través del panel hacia el plafón, el cual funciona como una fuente secundaria de luz reflejada difusa de una manera semejante a la de una repisa lumínica.



**Sistema de redirección de la luz en ventanas**

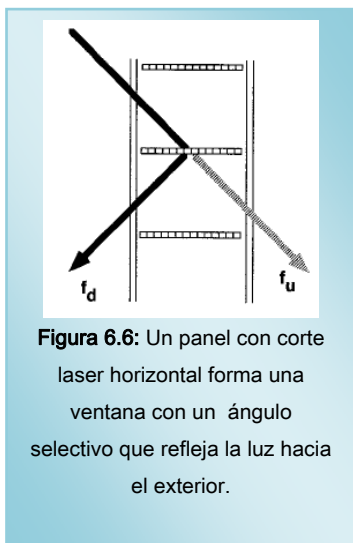
Un panel con corte láser vertical desvía la luz mayormente de elevaciones mayores a 30°, mientras que transmite la luz con muy poca desviación, permitiendo la vista del exterior. La figura 6.5 muestra la porción de luz desviada de acuerdo al ángulo de elevación de la luz incidente en un panel vertical. El panel tiene muy bajo deslumbramiento debido a que la luz desviada se dirige principalmente hacia arriba mientras que la luz no desviada sigue en la misma dirección hacia abajo al igual que la luz incidente. La cantidad de luz dispersa es mínima debido a que no resultan superficies redondeadas en el proceso de manufactura. Sin embargo, es conveniente emplear estos paneles en la parte superior de las ventanas.



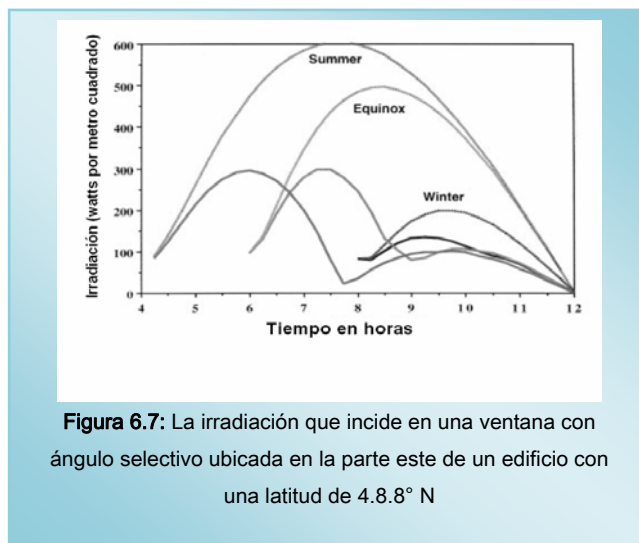
**Figura 6.5:** La fracción de luz reflejada contra la elevación de la luz incidente de un panel con corte laser con tres tipos de corte.

**Sistemas de protección solar en ventanas**

Si un conjunto de paneles angostos se montan horizontalmente en una ventana, es decir, con la cara de los paneles de manera horizontal, entonces la luz solar que proviene de arriba se desvía de regreso al exterior; es decir, es reflejada. De esta manera, este sistema es muy eficiente para excluir la luz solar, pero permanece permanentemente abierta a la vista (figura 6.6 y 6.7)



**Figura 6.6:** Un panel con corte laser horizontal forma una ventana con un ángulo selectivo que refleja la luz hacia el exterior.



**Figura 6.7:** La irradiación que incide en una ventana con ángulo selectivo ubicada en la parte este de un edificio con una latitud de 4.8.8° N

#### 15.6.4 Control

Los paneles con corte láser generalmente se fijan para convertirse en un sistema de cristal secundario interno para ventanas y tragaluces. Sin embargo, cuando estos paneles se instalan como sistema interior en ventanas tipo toldo o invernadero, al inclinarse éstas hacia fuera la luz de las partes superiores se desvían más profundamente hacia el espacio arquitectónico. En principio la inclinación del panel puede ajustarse continuamente para lograr la penetración óptima de la luz solar (figura 6.8 ilustra la desviación de la luz solar en el plafón de un espacio a través de paneles de corte láser en ventanas tipo toldo).

#### 15.6.5 Mantenimiento

Los paneles se fijan por la parte interior del cristal de ventanas o tragaluces que se encuentran instalados; éstos no requieren de ningún mantenimiento. Cuando los paneles están laminados entre delgadas hojas de cristal e instaladas como una unidad, el mantenimiento es igual que el que requiere el cristal.

#### 15.6.6 Ahorro de Energía

El ahorro de energía depende de la aplicación; por ejemplo, paneles con cortes láser fijos en la parte superior de una ventana para desviar luz de manera profunda dentro de un espacio, pueden aumentar el aprovechamiento de la luz natural de un 10% a un 30%, dependiendo de las condiciones del cielo. Si los paneles pueden inclinarse hacia la parte exterior de la ventana, pueden incrementarse tanto cantidad como penetración de la luz en forma dramática.

### 6.7 Ejemplos de Aplicación



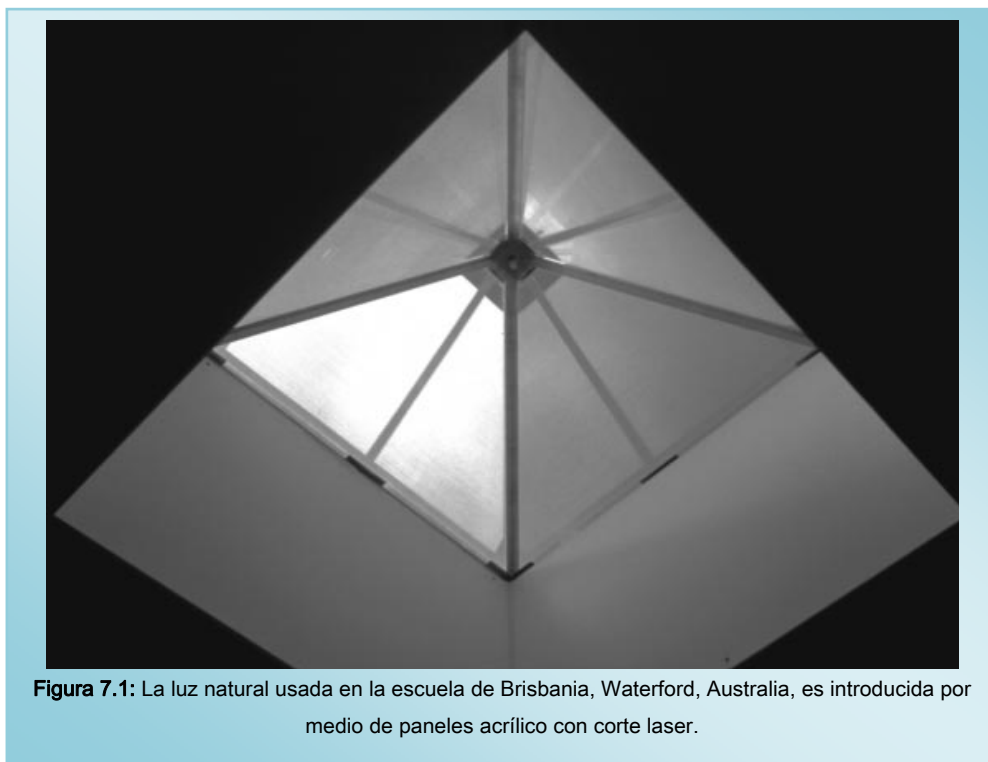
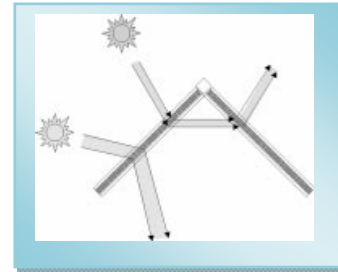
**Figura 6.8:** Ventanas elaboradas con paneles con corte laser pegadas a la techumbre de un salón de clases



**Figura 6.9:** Vista hacia el exterior por medio de una ventana que cuenta con paneles con cortes de rayo laser instalados en la parte superior de la ventana.

## 15.7 Tragaluz selectivo angular (panel de corte láser)

El tragaluz selectivo angular (figura 7.1), incorpora una configuración piramidal o triangular de paneles con cortes láser dentro de una cubierta transparente del tragaluz para proporcionar una transmisión angular selectiva.



**Figura 7.1:** La luz natural usada en la escuela de Brisbania, Waterford, Australia, es introducida por medio de paneles acrílico con corte láser.

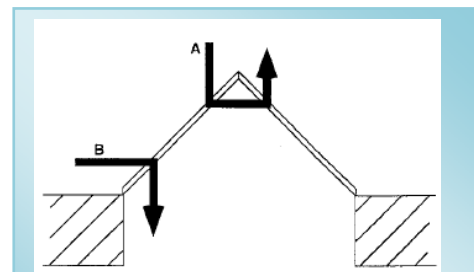
### 15.7.1 Descripción técnica

#### Componentes

Un tragaluz angular selectivo es un tragaluz transparente convencional; éste puede ser tanto piramidal como triangular. Se incorporan paneles desviadores de luz de corte láser dentro de la cubierta transparente exterior formando un doble cristal (figura 7.2). Este sistema transmite mayor luz en la parte inferior y menor luz en la parte superior. Normalmente un panel difusor se emplea en la abertura plafonal.

## Producción

Estos paneles se producen haciendo cortes finos a través de un panel delgado de acrílico. Cuatro paneles de forma triangular cada uno, se fijan en el tragaluz de forma piramidal. Para un tragaluz triangular o tipo aguilón, los paneles se cortan en forma rectangular y se fijan al interior del marco del tragaluz. Generalmente los paneles se cortan de acrílico con un espesor de 3 mm, y los cortes láser tienen un espaciamiento de 4 mm. Los ángulos útiles para los paneles dentro de un tragaluz abarcan de  $45^\circ$  a  $55^\circ$  para latitudes tropicales y subtropicales en que es indispensable el rechazo de la luz solar que proviene de las partes superiores. Para latitudes más al norte, en que es muy importante la penetración de luz de ángulos menores, los ángulos de inclinación deben ser de entre  $25^\circ$  y  $35^\circ$ .



**Figura 7.2:** La luz en la sección "A" es reflejada hacia el exterior, mientras que la luz en la sección "B" es transmitida hacia el interior.

## Ubicación en el sistema de vanos

Los tragaluces se instalan en el techo del edificio. La función principal de un tragaluz angular selectivo es la de proporcionar una relativamente constante irradiación hacia el interior durante el día y, reducir la tendencia de sobrecalentamiento en el edificio durante los días de verano.

## Barreras técnicas

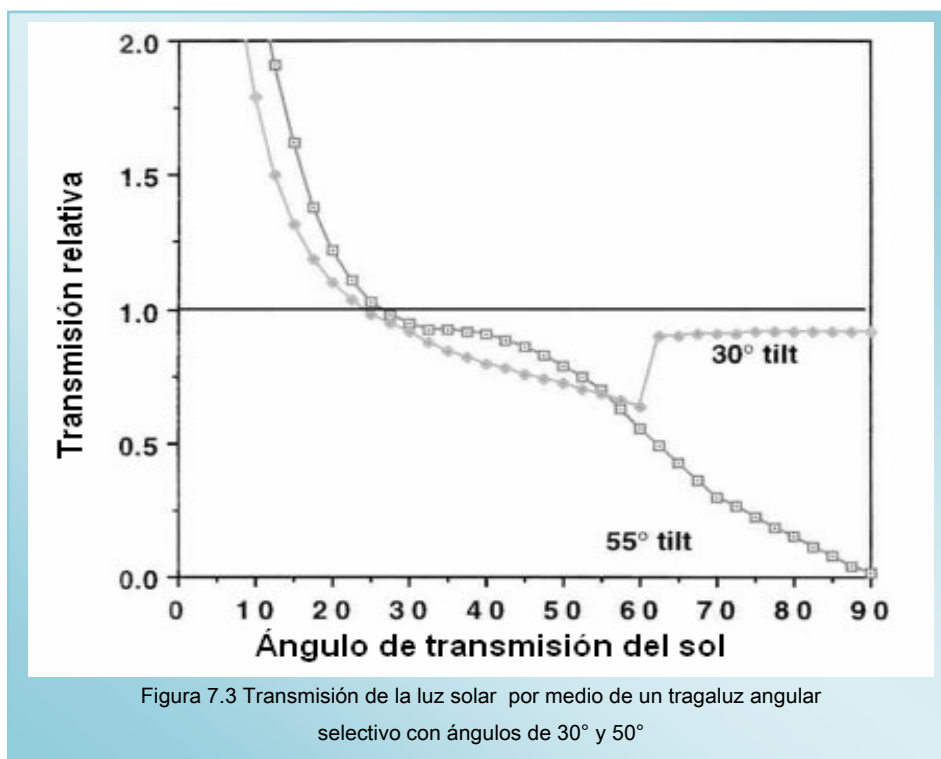
Debido a que los tragaluces angulares selectivos rechazan la luz de las partes superiores, no son adecuados para climas con cielos predominantemente nublados. Fueron diseñados específicamente para latitudes tropicales con cielos despejados. Sin embargo, el diseño puede aplicarse en latitudes más al norte con cielos despejados para incrementar la irradiancia de los rayos de luz de baja inclinación en invierno. Estos tragaluces no se prestan para ser empleados en techos muy inclinados porque es difícil mantener la abertura horizontal, y esto requiere dispositivos adicionales que aumentan su costo.

### 15.7.2 Aplicación

Los tragaluces angulares selectivos son especialmente utilizados para aprovechar la luz natural de edificios con ventilación o aire acondicionado que cuentan con gran área de piso y techumbres de poca inclinación, tales como supermercados y escuelas (figura 7.5).

### Latitudes tropicales o subtropicales

En latitudes de clima subtropical es importante rechazar la luz solar de las partes superiores para evitar el sobrecalentamiento al medio día. Para esto, el ángulo de inclinación de los paneles del tragaluz debe ser mayor a  $45^\circ$ , como se muestra en la figura 7.2. Como se ve en la figura 7.3 en la cual la inclinación del panel es igual a  $55^\circ$ , la transmisión de luz de cielo se reduce rápidamente al acercarse la luz solar incidente a un ángulo de elevación de  $90^\circ$ , mostrando que este tipo de tragaluz mejora el ingreso de luz a ángulos bajos y rechaza la penetración de luz a ángulos elevados.



### Latitudes hacia el norte

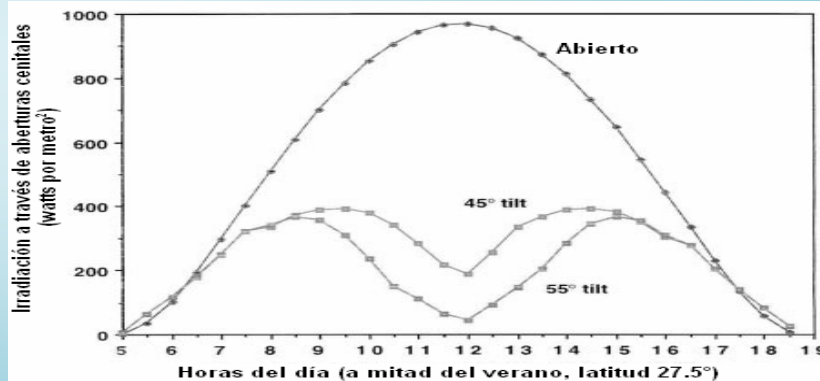
En latitudes muy al norte, es importante mejorar el ingreso de luz solar a ángulos de menor altura y mantener el ingreso de luz del cielo difusa de las partes superiores. De tal manera, para latitudes al norte, el ángulo de inclinación de los paneles de corte láser debe ser de  $35^\circ$  o menos. Como se indica en la figura 7.3, para un tragaluz triangular en que la inclinación del panel es de  $30^\circ$ , el aumento en la penetración de luz de baja elevación es considerable y la penetración en altas elevaciones sólo disminuye en poca cantidad.

## Tragaluces

Los tragaluces en edificios con plafones bajos, proporcionan generalmente demasiada luz directamente por debajo del tragaluz y muy poca luz a los lados de éste. Si se emplean paneles de corte láser en una V invertida de bajo del tragaluz, la luz que penetra de la parte superior a la inferior, mejorará la distribución de luz hacia el interior (figura 7.6 ejemplo de un tragaluz que amplía la penetración de luz instalada en un local muy amplio).

### 15.7.3 Principios y características físicas

Tragaluces convencionales transmiten mucha luz de ángulos elevados y transmiten muy poca luz de ángulos pequeños. La configuración piramidal o triangular de paneles de corte láser en tragaluces angulares selectivos (figura 7.1), desvían la luz de ángulos bajos hacia el tragaluz y aumenta la transmisión de esta luz hacia el interior del edificio. Cuando el ángulo de inclinación de los paneles es mayor a  $45^\circ$ , reducen la transmisión de luz de ángulos elevados desviándola de un panel superior lateral hacia el panel opuesto del otro lado del tragaluz y posteriormente hacia afuera de éste. (Figura 7.2).



**Figura 7.4:** Relación de radiación y horas del día en el verano con una latitud de  $27.5^\circ$ , por medio de la abertura de un tragaluz angular selectivo con un ángulo de inclinación de entre  $45^\circ$  y  $55^\circ$

El desempeño detallado de los tragaluces angulares selectivos depende del espaciamiento de los cortes por rayo láser que tiene el panel, el ángulo de inclinación de la configuración piramidal o triangular del panel, la profundidad del pozo del tragaluz, la hora del día, la estación del año y las condiciones del cielo. Al aumentar la profundidad del pozo del tragaluz, su desempeño para los ángulos de luz de baja elevación se incrementa rápidamente. La manera más útil de medir el desempeño es: comparar la irradiación a través de un tragaluz angular selectivo, a través de un tragaluz abierto o en función de la hora del día (la figura 7.4 muestra un tragaluz con la profundidad del pozo igual a cero).

#### 15.7.4 Control

Los tragaluces angulares selectivos siempre se emplean como sistemas fijos; su transmisión, que depende de su inclinación, proporciona un método de control que depende de la hora del día.

#### 15.7.5 Mantenimiento

No requiere de ningún mantenimiento aparte del que se le da a un tragaluz común y corriente.

#### 15.7.6 Ahorro de energía

Un tragaluz angular selectivo es esencialmente un tragaluz convencional con doble cristal de paneles con corte láser añadido. Se pueden lograr ahorros de energía considerables dado que los tragaluces angulares selectivos pueden reducir el sobrecalentamiento. También se puede reducir el uso de energía eléctrica para la iluminación comparándolos con edificios con tragaluces o edificios que emplean tragaluces más pequeños para controlar el sobrecalentamiento.

#### 15.7.7 Ejemplos de aplicación

- Escuela estatal Waterford, Brisbane, Australia (figura 7.5)
- Edificio de despachos Konica, Sydney, Australia
- Iglesia parroquial Canugra, Queensland, Australia
- Herbario Monte Cootha, Brisbane, Australia (figura 7.6)



Figura 7.5: Tragaluz Angular selectivo instalado en un salón de clases de la escuela estatal de Waterford, Brisbane, Australia

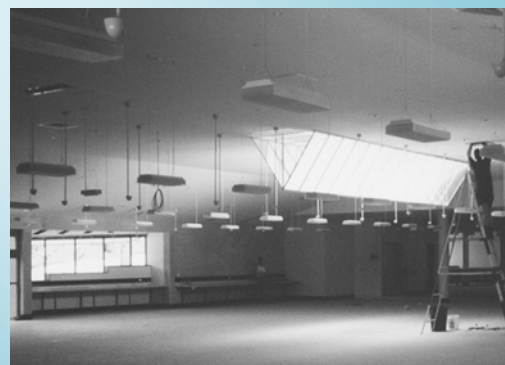
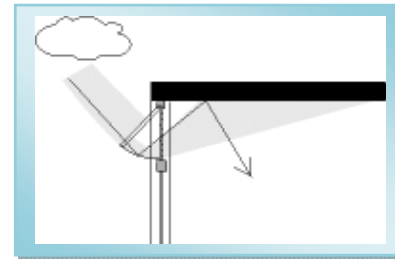


Figura 7.6: Paneles con corte láser instalados en "V" por debajo de una abertura cenital. La luz que accede por medio del tragaluz es reflejada por debajo del plafón. (Mount Cootha, Brisbane, Australia)



## 15.8 Persianas guidoras de luz

Una persiana guidora de luz es un sistema de control solar exterior que proporciona sombra y redirige la luz solar del cielo hacia el plafón.



### 15.8.1 Descripción técnica

#### Componentes

Una persiana guidora de luz consiste de una abertura de cristal difusor y dos reflectores diseñados para dirigir la luz difusa de la abertura hacia el edificio, en ángulos dentro de un rango angular específico (figura 8.2). Generalmente el rango angular de distribución de luz dentro del edificio se proyecta para extenderse desde la horizontal hacia arriba, llegando a una elevación cercana a los 60°. La elevación inferior de la persiana se fija a cero, u horizontal, para evitar deslumbramiento.

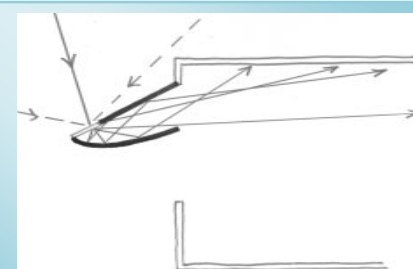


**Figura 8.1:** Persiana guidora de luz montada en las ventanas norte del herbario ubicado en Brisbane, Australia

La persiana guidora de luz se fija de la misma manera que una persiana exterior sobre una ventana; le proporciona sombra a la ventana protegiéndola de la luz solar directa como lo efectúa una persiana normal.

#### Producción

Las persianas guidoras de luz son más complejas y se definen de manera más precisa que las persianas convencionales. Material altamente reflectivo, por ejemplo, el aluminio con un acabado brillante, debe utilizarse para sus superficies interiores. Sin embargo, el método de fabricación con metales ligeros es esencialmente el mismo para ambos tipos de persianas.



**Figura 8.2:** Principios básicos de la persiana guidora de luz.



### Ubicación en el sistema de vanos

Las persianas guadoras de luz se instalan sobre la tercera parte o mitad superior de un sistema de ventanas. Las persianas tienen paneles laterales verticales de apoyo para proporcionar sombra adicional.

### Barreras técnicas

La principal barrera con respecto a persianas guadoras de luz es que cuestan más que persianas convencionales, principalmente por el costo de la hoja de metal de alta reflectancia con la que se fabrica la persiana guadora de luz y el requerimiento de que el material reflectivo se configure de manera precisa, para limitar el ancho de las haz lumínico. En la práctica se observa un problema que consiste en que las persianas tienden a filtrar el agua. Este problema generalmente puede corregirse por medio de pequeñas perforaciones para drenar.

### 15.8.2 Aplicación

En las zonas subtropicales, las ventanas casi siempre reciben sombra por medio de volados amplios, persianas interiores y exteriores, cristal reflectivo y cristal absorbente; en consecuencia, la luz natural que penetra por la ventana se ve muy reducida. Los niveles de luz natural en edificios subtropicales protegidos de esta manera, están muy por debajo de los niveles de luz natural en edificios con ventanas sin protección solar, en climas mas templados. Es posible adaptar la forma de una persiana exterior de tal manera que guíe parte de la luz que cae sobre la persiana hacia el interior del edificio. Si esta adaptación se realiza con cuidado para evitar el deslumbramiento y para dirigir la luz profundamente hacia el espacio arquitectónico, es posible aumentar la iluminancia por luz natural a la vez que proteger el espacio con respecto a luz solar directa. Este es el objetivo que se persigue con una persiana guadora de luz (figura 8.1).

Las persianas guadoras de luz pueden emplearse en cualquier edificio que utilice protección solar exterior en las ventanas. Toda luz natural que penetra a través de las persianas guadoras de luz se dirige hacia el plafón; por esto, la persiana es la fuente de luz difusa la cual no es lumínica cuando la observan los usuarios de un espacio arquitectónico, por lo que es totalmente libre de deslumbramiento. La figura 8.3 compara la iluminancia de los espacios arquitectónicos con una persiana convencional y con una persiana guadora de luz del mismo tamaño. Es evidente que la luz natural aumenta muchísimo y que la fuente de luz natural no produce deslumbramiento cuando se emplea una persiana guadora de luz. Sin embargo, el

plafón a través del cual se refleja la luz puede convertirse en una fuente de deslumbramiento si se emplea un acabado brillante. Generalmente un plafón con un acabado blanco mate evita todos los problemas de deslumbramiento.



**Figura 8.3:** Compara la luz natural en un cuarto de prueba con una persiana convencional (izquierda) y una persiana guiadora de luz (derecha). El otro borde de la persiana es una banda horizontal amarilla para reducir el área de la ventana.

### 15.8.3 Principios y características físicas

Las persianas guiadoras de luz se diseñan para mejorar la luz natural en espacios arquitectónicos de edificios subtropicales que cuentan con protección solar externa, para reducir las ganancias de calor radiante a través de las ventanas. Por esto, su desempeño con respecto a luz natural, debe ser medido en relación a una ventana con protección solar y no con una ventana abierta.

La luz que le llega a la persiana guiadora proviene de muchas direcciones. Sin embargo, debido a que la abertura de ingreso es difusora, se reitera la dependencia direccional con respecto a la luz de ingreso. Dado que la luz que penetra por la abertura de ingreso es difusa, es posible utilizar los principios de la óptica sin imágenes para proyectar los reflectores que guían la luz, de tal manera que la luz de egreso cae dentro un rango angular definido con precisión. Este rango puede ser tan estrecho o tan amplio como se requiera. Sin embargo, un rango angular de egreso muy estrecho requiere una guía reflectiva de luz muy larga y una relación abertura de ingreso entre abertura de egreso muy pequeña. Para un rango de egreso estrecho, el sistema

puede recoger solo una pequeña parte de luz incidente en la persiana; como resultado, el potencial para mejorar la luz natural es muy pequeño. Se debe lograr un compromiso entre la precisión con la que se dirige la luz al espacio arquitectónico y la cantidad de luz que se dirige hacia él. Debido a que los sistemas de persianas guadoras de luz se proyectan para aumentar la luz natural de día desde un nivel de iluminancia muy bajo, dentro de espacios con mucho control solar, es conveniente dirigir la luz a través de un rango angular de egreso muy ancho, por ejemplo, de  $0^\circ$  a  $60^\circ$ , y emplear la relación entre abertura de ingreso y abertura de egreso generalmente de 1:2 para maximizar el ingreso total de luz natural. Mucha de la luz natural incide sobre el plafón cerca de la ventana, pero debido a que los niveles de luz cerca de la ventana son frecuentemente muy bajos, las persianas guadoras de luz pueden mejorar los niveles de iluminancia en los interiores.

Si las superficies reflectivas de la ventana se fabrican con precisión, entonces el haz de egreso está muy bien definido. Si el sistema se proyecta de tal manera que ninguna parte de la luz se emite por debajo de la horizontal, la fuente de luz de la persiana guadora aparece oscura cuando es vista desde el interior del edificio (figura 8.3). Aunque esto resulta ideal para reducir el deslumbramiento, los usuarios que no conocen este sistema pueden pensar que no está funcionando, por lo que puede haber una buena razón para dirigir un a pequeña cantidad de luz hacia abajo, por ejemplo, en un rango angular desde menos  $5^\circ$  y hasta más  $50^\circ$ . Las ecuaciones de diseño se resumen en la patente de Edmons 1992.

#### **15.8.4 Control**

Las persianas guadoras de luz se fijan en posición. El control de la dirección de luz se logra a través de la óptica.

#### **15.8.5 Mantenimiento**

No se requiere ningún mantenimiento más que una limpieza ocasional del cristal de la abertura externa de ingreso.

#### **15.8.6 Costo y ahorro de energía**

El costo de la persiana guadora de luz debe compararse con el costo de una persiana exterior o con un sistema de protección solar equivalente. Los costos de fabricación son muy superiores a los costos de las persianas convencionales debido a su configuración exacta y la alta

reflectancia que se requiere para sus superficies. Sin embargo, los costos de instalación y mantenimiento son los mismos, y el desempeño en el aprovechamiento de luz natural es muy superior al de las persianas convencionales (figura 8.3).

Este es un beneficio considerable de ahorro de energía en cuanto a las persianas guiadoras de luz. Persianas externas convencionales reducen significativamente el ingreso de la luz natural y además se encuentran diseñadas para excluir la luz directa del sol. Típicamente, el valor promedio de luz natural en un espacio arquitectónico con ventanas con mucho control solar es menos que 50 luxes. Bajo condiciones de cielo despejado una persiana guiadora de luz puede producir un a iluminancia de mas de 1000 luxes sobre el plano de trabajo a una distancia de 5 metros de la ventana. Bajo condiciones de cielo nublado, la iluminancia promedio lograda es de más o menos 5 veces menos, es decir, 250 luxes. De este modo, una persiana guiadora de luz puede aumentar los niveles mínimos de luz natural en un espacio cuya profundidad es de 5 metros, con respecto a niveles de iluminancia establecidos en los reglamentos. Este ejemplo ilustra las ganancias posibles con un sistema de persianas guiadoras de luz. En la práctica, las ganancias dependerán de la forma y tamaño de la ventana; de la inclinación y reflectancia del plafón, muros y pisos, el tipo de cristal en la ventana, y las condiciones ambientales.

### 15.8.7 Ejemplos de aplicación

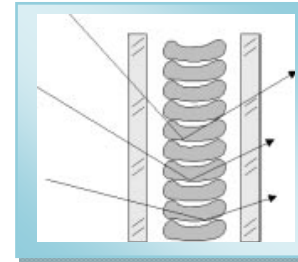
- Escuela Estatal del Parque Regents, Queensland, Australia (figura 8.4)
- Herbario Monte Cootha, Brisbane, Australia



Figura 8.4: Persiana guiadora de luz en un edificio de la escuela E-statal de Parks Regent, Brisbane, Australia

## 15.9. Cristal redirector de luz solar

Elementos de acrílico cóncavos, colocados verticalmente dentro de un doble cristal, redirigen la luz del sol directa de todos los ángulos de incidencia hacia el plafón.



### 15.9.1 Descripción técnica

#### Componentes

El componente principal de un sistema de cristal redirector de luz solar consiste de una unidad sellada de cristal doble, o de doble cristal que contiene elementos de acrílico. Esta unidad sellada se coloca normalmente por encima de la ventana que proporciona vista. El coeficiente de ganancias de calor solar de la unidad "U" es igual a 0.36, y su valor es aproximadamente 1.3 W/m<sup>2</sup>K (dependiendo de la combinación del tipo de cristal y el gas de relleno). Un patrón sinusoidal en la superficie interior de la unidad de la ventana puede emplearse para difundir la luz que egresa dentro de un ángulo azimutal horizontal estrecho. Una película holográfica en la hoja exterior de cristal, también puede emplearse para enfocar la luz natural que ingresa dentro de un ángulo horizontal estrecho.

Una parte importante del sistema es el plafón, el cual recibe la luz redirigida y la refleja hacia la parte inferior, iluminando las superficies sobre las que se realizan tareas visuales. Elementos reflejantes inclinados en el plafón pueden utilizarse para reflejar la luz hacia áreas específicas de trabajo visual. Un simple plafón blanco mate también funciona para redirigir la luz; la iluminación resultante va a ser más difusa.

#### Producción

Los elementos de cristal acrílico redirectores de luz solar se producen por extrusión. Los elementos se apilan y se colocan en una unidad de doble cristal común y corriente. Cuando se emplean hologramas para desviar la luz natural en un plano horizontal, se producen utilizando una película holográfica que se expone a una configuración de interferencia de dos o más rayos láser. La película se coloca entre dos hojas de cristal que forman la cara exterior de la unidad sellada. La superficie sinusoidal puede producirse en línea durante el procesado de extrusión a través de un rayo láser de bióxido de carbono o, posteriormente, por láser, de manera mecánica.

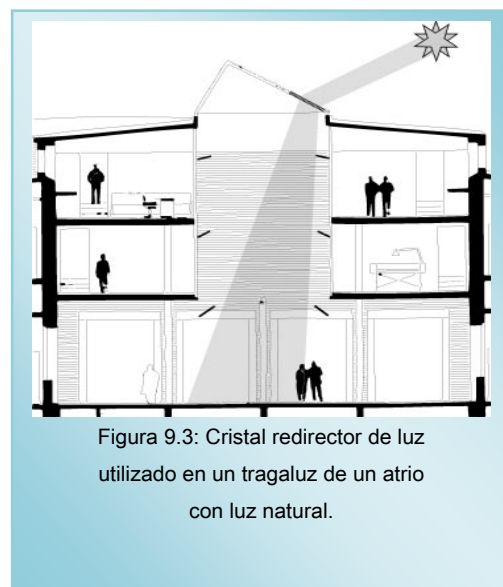
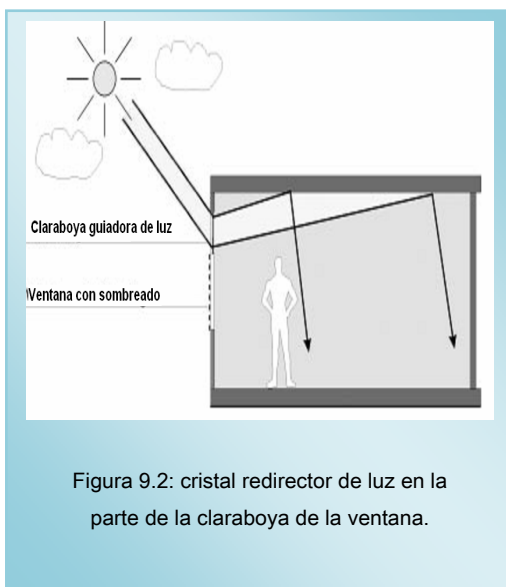
## Ubicación del sistema de vanos

El cristal redirector de luz solar se coloca en el área de la ventana por encima del campo visual, para evitar deslumbramiento y otros fenómenos semejantes. También se puede colocar enfrente de la fachada o detrás de ella, en situaciones de remodelación. La altura del área a la que va a servir el cristal redirector de luz debe de ser, en la mayor parte de los casos, de aproximadamente un 10 % de la altura del local. La ventana normal inferior que proporciona vista puede protegerse a través de persianas convencionales.



**Figura 9.1:** Cristal redirector de luz en la parte superior adosado a un cristal común y corriente en el edificio de oficinas de ADO. Coloane. Alemania

El cristal redirector de luz solar también puede colocarse en tragaluces para ayudar a que penetre la luz solar en atrios o pasillos. El cristal debe inclinarse a un ángulo de aproximadamente  $20^\circ$  para redirigir la luz solar desde posiciones inferiores del sol (figura 9.3).



## Barreras técnicas

Está disponible comercialmente el cristal redirector de luz. La única barrera para su uso es el costo. El cristal redirector de luz se ve diferente de una ventana convencional. Puede parecer ser un poco lechoso, lo que pudiera causar la interrupción del diseño de la fachada, en especial si el cristal de la fachada es transparente.

### 15.9.2 Aplicación

El sistema está diseñado para su uso en luz solar directa. La mejor orientación en una fachada es la sur, en zonas con clima moderado (en el hemisferio norte). En las fachadas oriente o poniente solo es útil en la mañana o tarde. El sistema también desvía la luz difusa, pero el nivel de iluminancia logrado es mucho menor que con luz solar directa. De tal manera, para fachadas que dan al norte, los elementos deben de ser de menor tamaño.

Los elementos de acrílico han sido diseñados para latitudes específicas. La altitud solar óptima para el cristal redirector de luz es entre  $10^\circ$  y  $65^\circ$  (figura 9.4). En regiones tropicales, en las cuales las altitudes solares son mas elevadas, el cristal redirector de sol debe instalarse a un ángulo de inclinación vertical para poder redirigir una mayor cantidad de luz. En este caso, la geometría de los elementos redirectores de luz solar tendrán que cambiarse para evitar el deslumbramiento. Un tragaluz redirector de luz debe instalarse con una inclinación de más o menos  $20^\circ$  hacia el sol.

### 15.9.3 Principios y características físicas

El cristal redirector solar desvía la luz en un plano horizontal al igual que el vertical, por lo que la luz puede alcanzar una profundidad del local para todas las posiciones solares sin necesidad de partes móviles en la fachada del edificio. La desviación vertical se logra a través de la forma de los elementos acrílicos, mientras que la desviación horizontal se puede obtener por medio de elementos ópticos holográficos o por medio de superficies de cristal sinusoidal.

#### Desviación vertical

La luz de ingreso se enfoca a través de la primera superficie de elementos de acrílico (figura 9.4) y se redirige a través de reflexión total en la superficie inferior del perfil. Se difunde levemente a través del plafón cuando egresa de aquellos elementos.



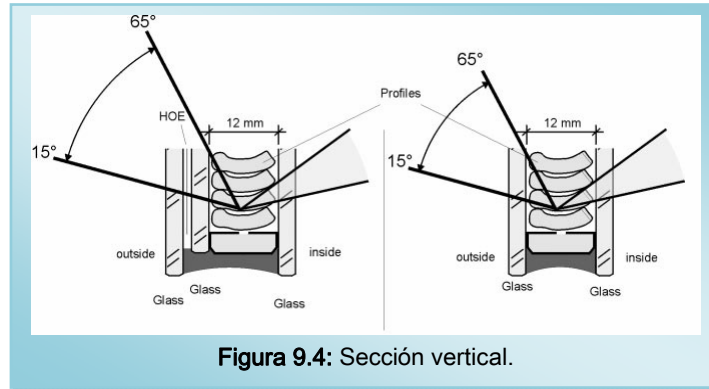


Figura 9.4: Sección vertical.

### Desviación horizontal

Para difundir la luz más ampliamente a través del ancho del local, los elementos ópticos holográficos, o alguna estructura superficial sinusoidal en la cara interior del cristal, puede emplearse para desviar la luz horizontalmente dentro del espacio.

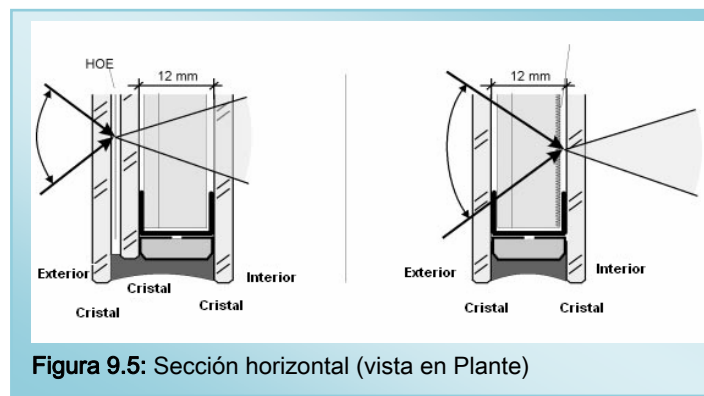


Figura 9.5: Sección horizontal (vista en Plante)

### 15.9.4 Control

El cristal redirector de luz solar no incluye partes móviles o ajustables, por lo que no se requiere ningún control.

### 15.9.5 Mantenimiento

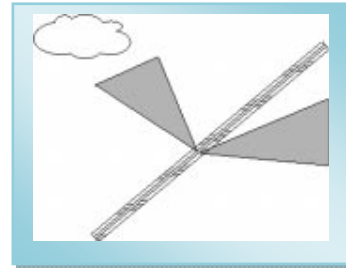
Debido a que los perfiles redirectores de luz solar están instalados entre dos hojas de cristal, no requieren mantenimiento, excepto la limpieza del cristal.

### 15.9.6 Ejemplos de Aplicación

- Edificio de oficinas Geysel, Cologne, Alemania (figura9.8)
- Edificio de oficinas ADO, Cologne, Alemania

### 15.10 Cristal guiador de luz cenital con elementos ópticos holográficos

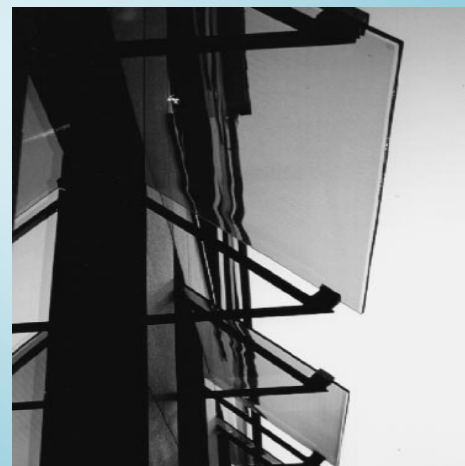
El cristal guiador de luz cenital redirige la luz difusa de un tragaluz dentro de un local.



#### 15.10.1 Descripción técnica

##### Componentes

El principal componente del cristal redirector cenital, es una película polimérica con una rejilla de difracción holográfica, la cual se lamina entre dos hojas de cristal. El elemento holográfico redirige la luz difusa que ingresa al edificio de una región cenital del cielo. Dado que el sistema puede causar dispersión del color cuando recibe la luz solar directa, sólo debe utilizarse en fachadas que no reciben luz solar directa.



**Figura 10.1:** Vista exterior de Cristal Guiador de Luz Cenital con Elementos Ópticos Holográficos

##### Producción

El cristal redirector de luz cenital se produce cuando una película holográfica se expone a un patrón de interferencia entre dos rayos láser. Después de desarrollarse la configuración se fija en la película como una variación periódica del índice de refracción. La película se lamina entre dos cristales para darle estabilidad mecánica y protección contra la humedad.

## Ubicación del sistema de vanos

El cristal redirector de luz cenital puede integrarse a un sistema de ventana vertical, o integrarlo a la fachada que incide directamente con la parte superior de la ventana a un ángulo de inclinación de aproximadamente  $45^\circ$ . Dado que el cristal redirector cenital distorsiona levemente la vista, sólo debe aplicarse a la porción superior de la ventana.

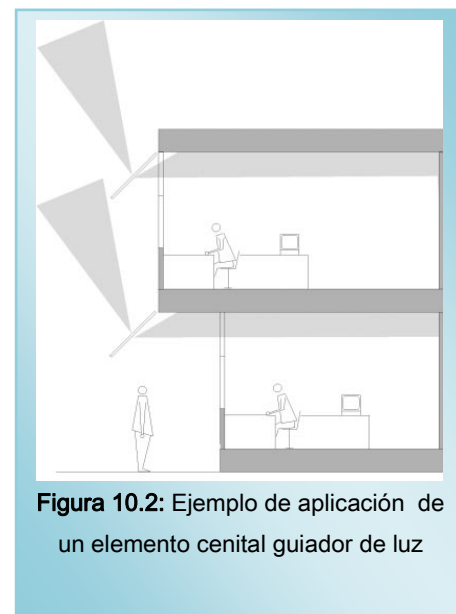
## Barreras técnicas

El cristal redirector cenital está diseñado para emplearse solamente con luz difusa. Si la luz solar directa llega a la película, puede ocurrir deslumbramiento y dispersión de color. Están en fase de desarrollo los elementos ópticos holográficos redirectores de luz.

### 15.10.2 Aplicación

Debido a que el cristal redirector cenital se integra a la envoltura del edificio se requiere de integración arquitectónica. El cristal redirector se instala en un edificio igual que una ventana normal o una unidad de cristal estructural. La instalación no requiere equipo ni conocimientos especiales.

El sistema puede emplearse en fachadas que no estén expuestas a luz solar directa. Es particularmente útil en ocasiones en que la vista del cielo está muy obstruida; por ejemplo, en ambientes urbanos o en climas nublados con elevadas luminancias del cielo.



**Figura 10.2:** Ejemplo de aplicación de un elemento cenital guiador de luz

### 15.10.3 Principios y características físicas

El nivel de iluminancia de la región cenital de un cielo nublado, es típicamente mucho más elevado que el nivel en una región horizontal, por lo que el cristal redirector de luz cenital se convierte en una estrategia prometedora para climas predominantemente nublados para redirigir la luz del cenit del cielo hacia las profundidades de un espacio arquitectónico. Inclinarse a un ángulo de  $45^\circ$  con respecto a la fachada aumenta su exposición al cielo, de tal suerte que se dirige mayor luz hacia el espacio. De esta manera el cristal redirector cenital es

particularmente apropiado para edificios con obstrucciones externas, por ejemplo, la situación de un patio.

La luz incidente de un área específica del cielo, se difracta debido al índice de refracción de la película holográfica y se guía hacia el plafón del local. Debido al rango de ángulos de la luz incidente, la dispersión de color se mezcla de tal manera que sólo ocurren pequeños cambios de color. Cuando existe luz solar directa incidente dentro del ángulo activo del elemento, ocurre deslumbramiento y no puede evitarse la dispersión del color. Es posible la visibilidad dentro del elemento óptico holográfico, excepto en la dirección general del ángulo activo.

### 15.10.4 Control

El cristal redirector cenital es un sistema de luz natural fijo, por lo que no requiere ningún control.

### 15.10.5 Mantenimiento

Este sistema no requiere mantenimiento alguno, sólo una adecuada limpieza.

### 15.10.6 Ejemplos de Aplicación

La primera instalación se llevó a cabo en un edificio de oficinas en Cologne, Alemania. El cristal redirector cenital se aplico en una fachada norte frente a tres ventanas.

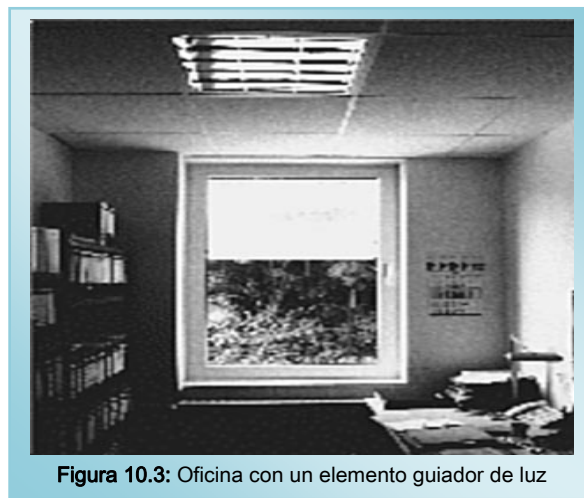


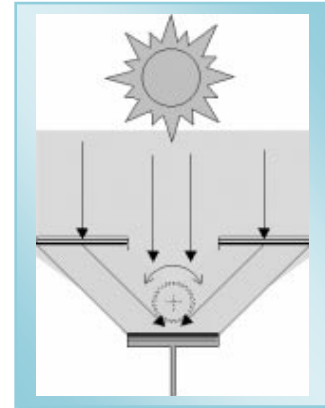
Figura 10.3: Oficina con un elemento guiador de luz

Distancia de la fachada	0.2 m	1.2 m	2.2 m	3.2 m	4.2 m
Sin HOE	15.78%	4.10%	1.35%	0.75%	0.57%
Con HOE	14.71%	3.09%	1.40%	0.86%	0.72%

Tabla 10.1: Factor de Luz de día con y sin Elemento Óptico Holográfico redirector de luz de día

## 15.11 Sistemas de protección solar selectivos direccionales empleando elementos ópticos holográficos (HOES)

Los sistemas de protección solar selectivos direccionales, rechazan la luz incidente que proviene de un área con un ángulo pequeño desde la bóveda celeste. Este sistema puede redirigir o reflejar un rayo solar incidente, a la vez que transmitir luz difusa de otras direcciones. Esta protección selectiva proporciona luz natural hacia el interior de los edificios, prácticamente sin alterar la vista de las ventanas.



### 15.11.1 Descripción Técnica

#### Componentes

Rejillas de difracción holográfica ahogadas en un laminado de cristal, pueden emplearse de dos distintas maneras para proporcionar control solar para grandes áreas de cristal.

- **En sistemas de Control Solar Transparente**, los elementos holográficos ópticos se diseñan para reflejar directamente la luz solar incidente dentro de un rango angular relativamente estrecho y normal a la superficie. Si el cristal que incorpora estos elementos se gira para seguir los rayos solares, puede evitar que la luz solar directa penetre al espacio, mientras que la luz incidente desde otros ángulos sí penetra a través del sistema.

- **En sistemas de Concentración de Luz Solar**, los elementos holográficos se diseñan para redirigir y concentrar la luz directa solar hacia tiras o pacas en un segundo juego de elementos de cristal. En estos elementos la luz solar se refleja, se absorbe, o se convierte en electricidad o energía térmica. Este diseño permite la construcción de un sistema de protección solar que bloquea la luz solar directa, pero que, a su vez, se mantiene transparente con respecto a la luz difusa y para los observadores que miran hacia el exterior.



Figura 11.1: Sistemas de Protección Solar Selectivos Direccionales. Vistas interior y exterior del cuartel General en Cologne, Alemania

En ambas estrategias todo el elemento de protección solar tiene que rastrear la trayectoria solar para lograr una protección óptima, por lo que, sólo hace falta un sistema de rastreo.

## Producción

El elemento crítico funcional en ambos tipos de sistemas de protección solar selectivo direccional es una capa holográfica. La película holográfica se expone a un patrón de interferencia de dos rayos láser. Después de su desarrollo, el patrón se fija en una película como una variación periódica del índice de refracción. La película se coloca entre dos cristales para lograr estabilidad mecánica y protección contra la humedad. Uno o más cristales que contienen estos elementos ópticos holográficos se integran con otros elementos estructurales y de rastreo para crear módulos lineales como se describieron anteriormente.

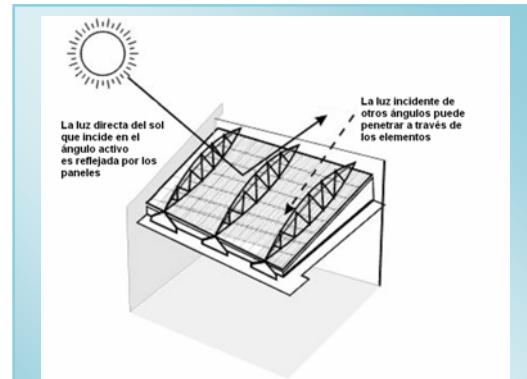


Figura 11.2: aplicación de sistemas de Protección Solar Selectivos Direccionales en el cuartel General de Cologne, Alemania

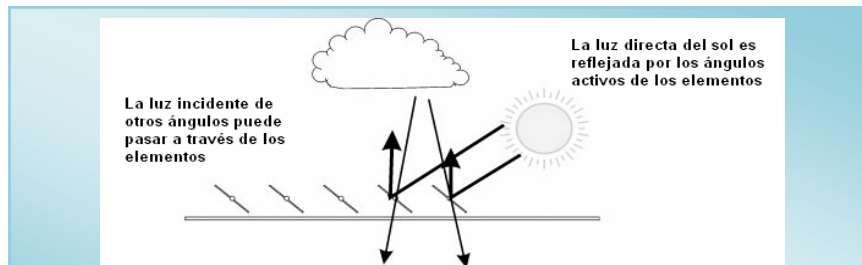


Figura 11.3: Principio de los sistemas de protección solar selectivos direccionales aplicados en un sistema de sombreado transparente.

## Ubicación en el sistema de vanos

Este elemento móvil de cristal que incorpora el recubrimiento holográfico, se aplicaría normalmente frente a la fachada principal vertical de cristal o a alguna abertura en el techo, como por ejemplo, un sistema de protección solar. En algunas aplicaciones estos elementos de protección solar pueden aplicarse al interior del edificio si las ganancias de calor solar pueden ventilarse a través de la estructura de la techumbre; este arreglo reduce los requerimientos de climatización para un sistema de rastreo de un solo eje. Ya sea en el interior o en el exterior, el

sistema de protección solar operable requiere integrarse al diseño técnico y arquitectónico del edificio.

### Barreras Técnicas

Los elementos ópticos holográficos se encuentran en las primeras etapas de desarrollo, por lo que existe poca información sobre su desempeño en condiciones de uso, ruido y otros factores que influyen en su efectividad. Los sistemas mecánicos que se requieren para rastrear y los paneles de control representan barreras de costo y mantenimiento similares a los que enfrentan otro tipo de sistemas operables de rastreo.



Figura 11.5: Sistema de sombreado transparente con elemento óptico holográfico.

#### 15.11.2 Aplicación

Los elementos ópticos holográficos han sido diseñados para emplearse como sistemas transparentes de protección solar, los cuales permiten la penetración de luz difusa para propósitos de iluminación; permiten una vista buena, y, a su vez bloquean los rayos intensos de sol directo. Estos elementos tienen máxima aplicación en aquellos lugares en que se requiere una gran área de cristal, pero en los cuales el deslumbramiento o sobrecalentamiento de sol directo puede constituir un gran problema. Mientras que muchos sistemas de protección solar operables o sistemas opacos están disponibles comercialmente, estos sistemas de protección transparente tienen la ventaja potencial de mantener un alto grado de transparencia para la estructura del edificio en su totalidad, y de proporcionar un buen control solar. Pueden instalarse para girar alrededor de un eje horizontal o vertical, ya sea en una fachada vertical o sobre un techo de cristal. Pueden causarse efectos de color por dispersión dentro del elemento óptico holográfico. Con un sistema de diseño correcto, esta dispersión de color es imperceptible al interior, a menos de que no se alineen o ajusten correctamente los paneles.

Sistemas de concentración de luz solar utilizan sistemas opacos para bloquear la luz solar directa. Los elementos opacos pueden directamente reflejar la luz, o esta puede ser absorbida para su conversión y utilización térmica, o absorbida por un panel fotovoltaico para convertirla en electricidad. En estas últimas aplicaciones requerirán elementos adicionales de integración para los sistemas de conversión térmica o fotovoltaica.





#### 15.11.4 Control

Ambos elementos, de protección solar transparente y de concentración, tienen que rastrear la trayectoria solar. Este rastreo se lleva a cabo normalmente por un sistema automatizado controlado por computadora, similar a los sistemas que operan persianas motorizadas. La posición del sol puede precalcularse y almacenarse en una tabla o determinarse directamente con varios sensores de luz. Generalmente los sensores para tal sistema serían automatizados con algunas opciones para su control manual.

#### 15.11.5 Mantenimiento

El mantenimiento de los elementos de cristal en sí involucran limpieza periódica en casi cualquier medioambiente. Sin embargo, las experiencias pasadas muestran que para que funcionen confiablemente los sistemas electromecánicos, se requiere que el gran número de paneles de cristal móviles se encuentren completamente limpios, y por lo tanto, esta tarea puede resultar difícil, debido a la gran cantidad de éstos.

#### 15.11.6 Costos y ahorro de energía

El costo de sistemas de control solar selectivos direccionales es elevado, por que los elementos holográficos todavía no se producen en volumen, además de que los sistemas de control son muy complejos.

#### 15.11.7 Ejemplos de aplicación

- Casas Row, Stuttgart, Alemania-  
Sistemas de control solar  
concentradores de luz
- REWE Sede Central, Cologne,  
Alemania-Sistemas de control solar  
transparentes

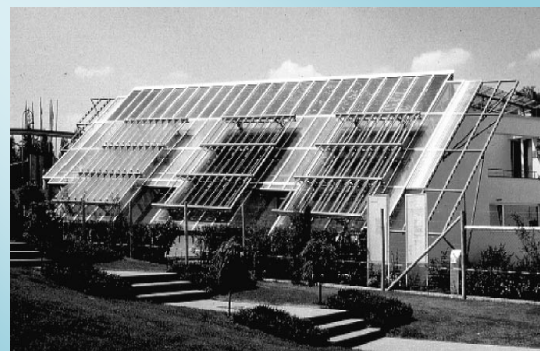
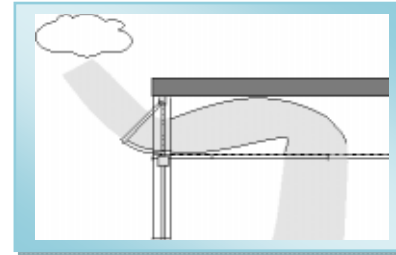


Figura 11.7: Un sistema de concentración de luz solar aplicado en casas IGA, Stuttgart, Alemania

## 15.12 Plafones anidólicos

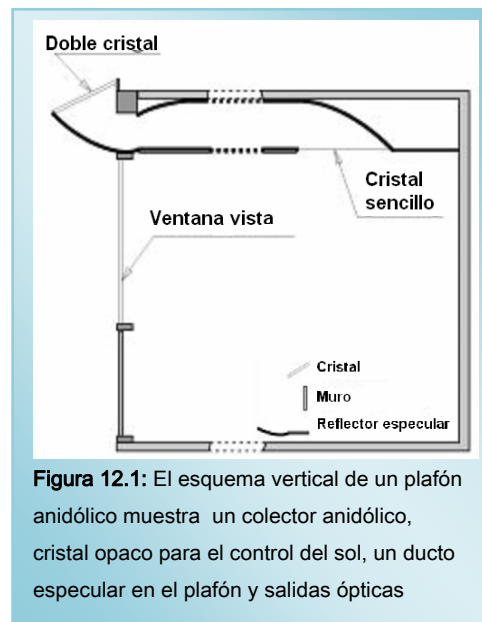
Sistemas de plafones anidólicos emplean las propiedades ópticas de concentradores parabólicos compuestos para recoger la luz natural difusa del cielo; el concentrador se acopla a un ducto de luz especular arriba del plano del plafón, el cual transporta la luz hacia la parte posterior del espacio. El objetivo principal es proporcionar luz natural adecuada a los espacios interiores en condiciones predominantemente de cielo nublado.



### 15.12.1 Descripción técnica

#### Componentes

Un plafón anidólico consiste en un sistema óptico de recolección de luz natural acoplado a un ducto de luz en un plafón suspendido. El sistema está diseñado para iluminación natural de edificios no residenciales. Elementos ópticos anidólicos que no producen imágenes se colocan en ambos extremos del ducto de luz. En la parte exterior del edificio un concentrador óptico anidólico captura y concentra la luz difusa del área superior de la bóveda celeste, la cual es, típicamente, el área de mayor luminancia en cielos nublados, e introduce los rayos de luz de manera eficiente hacia el ducto. En la abertura de egreso del ducto, en la parte posterior del local, un reflector parabólico distribuye la luz hacia abajo, evitando cualquier reflexión hacia atrás. La luz natural se transporta de manera más profunda hacia el espacio por medio de múltiples reflectores especulares que cubren la parte interior del ducto de luz, el cual ocupa la mayor parte superior de la superficie del plafón. En días soleados, la penetración directa de luz solar se controla a través de una persiana que puede ser desplegada sobre el cristal de la entrada. El sistema entero plafonal anidólico se muestra en forma esquemática en la figura 12.1.



## Disponibilidad

Los reflectores empleados en los elementos anidólicos consisten de superficies de aluminio anodizado, (reflectancia  $\rho = 0.9$ ), que se aplican a marcos a los cuales se les da la forma necesaria para producir el control óptico deseado. Los marcos prototipo se han elaborado de madera, pero si los volúmenes de producción aumentan, se podrían emplear marcos de metal, plástico o compuestos. Los ductos se recubren de cristal para mantener las superficies reflectoras limpias. La persiana operable debe integrarse adecuadamente al sistema.

## Ubicación en el sistema de vanos

Un sistema de plafón anidólico se diseña para ubicarse en una fachada vertical arriba de la ventana de vista. Debido a que el dispositivo externo anidólico recoge los rayos de luz difusa con alta eficiencia óptica, el plafón anidólico se presta para iluminar espacios con luz natural difusa en condiciones de cielo nublado. El sistema se diseña para recoger luz difusa de la bóveda celeste, de tal manera que puede emplearse en cualquier latitud si se instalan persianas solares, o para evitar deslumbramiento y proteger del sobrecalentamiento que produce la luz solar directa.

## Barreras técnicas

En sus aplicaciones actuales, el objetivo principal del sistema es proporcionar luz natural adecuada bajo condiciones de cielo nublado. Para recoger suficiente flujo lumínico, el colector anidólico debe abarcar el ancho completo de la fachada del espacio, y el ducto de luz debe ocupar totalmente el pleno por encima del plafón suspendido dentro del espacio. Ninguna otra obstrucción o elemento estructural debe colocarse en este espacio. En caso contrario, el desempeño lumínico será menor. Además, debido a que el uso de plafones anidólicos afecta a muchos otros elementos constructivos, el uso de este sistema requiere coordinación adicional en su planificación y construcción.

### 15.12.2 Aplicación

El mejor uso de este sistema es aplicarlo a fachadas verticales en edificios que se ubican en lugares con condiciones predominantemente de cielo nublado, que tienen acceso limitado a luz directa solar, o en las que se encuentran obstrucciones en una buena parte de la bóveda celeste. Los requerimientos de diseño incluyen:

- Luz natural disponible recolectada de manera eficiente por medio de un recolector solar y guiada por el ducto de luz, aún durante las peores condiciones de nublado, generalmente en invierno.
- Deben reducirse los riesgos de deslumbramiento canalizando la luz natural desde la fachada hacia el espacio arquitectónico, y redistribuyéndola hacia abajo desde el plafón de manera convencional igual que la luz artificial.
- Las dimensiones del ducto de luz deben ser compatibles con el espacio disponible para este propósito.

El canalizar la luz en un ducto arriba del plafón reduce la posibilidad de deslumbramiento no deseado. Cuando la luz solar directa es la fuente principal de luz natural, es posible un alto factor de concentración, permitiendo un sistema con ductos de menor tamaño que ocupen menormente el pleno del plafón, (véase repisas de luz ópticamente tratadas, capítulo 3). Debido a que la meta de esta aplicación es proporcionar luz natural bajo condiciones de cielo nublado y con el cielo como fuente de luz difusa, la concentración se limita a un factor de 2 o 3, de tal manera que se requiere un ducto de luz de gran tamaño. El diseño actual se ha optimizado en base a este hecho, para acomodar un ducto de luz que ocupa toda la cavidad del pleno del plafón.

Plafones anidólicos pueden emplearse igualmente en zonas urbanas densamente pobladas como en áreas rurales. Su efecto reflectivo es más impresionante en un ambiente urbano debido a que las obstrucciones alrededor del edificio aumentan la necesidad e importancia de recoger la luz difusa que proviene de la parte superior de la bóveda celeste. Los plafones anidólicos pueden emplearse en condiciones de cielo despejado o nublado, siempre y cuándo se proporcione el control solar adecuado de la luz solar.

Los plafones anidólicos pueden emplearse en edificios comerciales, industriales o institucionales. Las soluciones específicas de diseño variarán con el clima y latitud. Su aplicación en la remodelación de sistemas de luz natural en edificios con espacios adecuados, con respecto a los plenos de los plafones, o con espacios de gran altura, puede ser adecuada si no existen grandes obstrucciones o interferencia con otros sistemas constructivos.

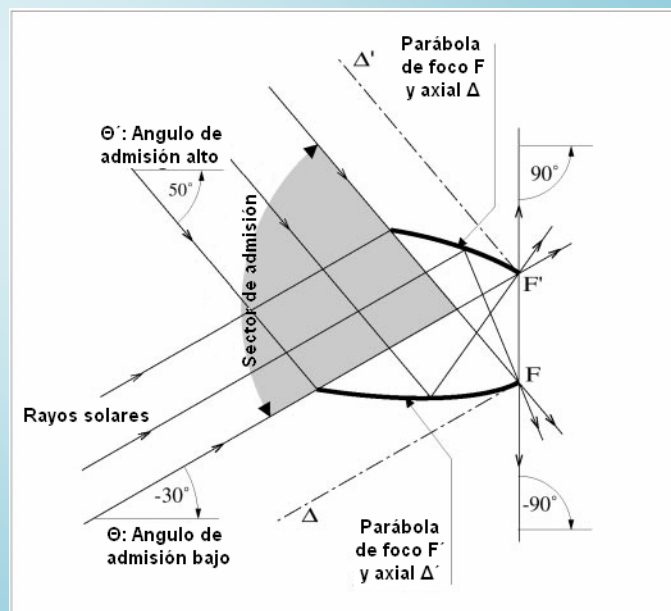


Figura 12.2: Principio de un sistema anidólico no simétrico bidimensional.

### 15.12.3 Principios y características físicas

El campo de la óptica que no se refiere a las imágenes, ha establecido métodos eficientes y confiables para diseñar concentradores solares que han alcanzado casi el límite teórico de la concentración solar (46,000 según las leyes de la termodinámica). Los mismos principios ópticos pueden emplearse para desarrollar sistemas que maximizan el uso de luz difusa que proviene de la bóveda celeste (figura 12.2)

Características de estos sistemas incluyen:

- Tamaño del haz de rayos luminosos determinados por la apertura de ingreso y la transmisión total en la apertura de egreso de los ángulos  $\theta$  y  $\theta'$  (parámetros de diseño dados).
- Los ángulos que se emplean incluyen todas las direcciones hemisféricas
- El número de reflexiones pueden minimizarse a través de un diseño adecuado, lo cual explica la alta eficiencia óptica que se logra a través del sistema.

- Una selección precisa de los rayos incidentes en la abertura de ingreso del sistema, al igual que un control exacto de los rayos emergentes en la abertura de egreso, puede lograrse a través de una elevada selectividad angular.
- Dado que el sistema se basa en la reflexión de una superficie altamente reflectiva, por ejemplo, aluminio anodizado, no introduce ninguna dispersión óptica con luz solar directa. El plafón anidólico se desarrollo utilizando los principios anteriores produciendo un colector de luz natural anidólico que se coloca frente a la guía de luz para recoger y concentrar la luz natural a la entrada del ducto.
- Otro dispositivo anidólico se instaló al final del ducto para distribuir el flujo de luz natural hacia el espacio arquitectónico para evitar incomodidad visual.

Cuando el cielo es la fuente de luz, la concentración de luz es esencial para el buen desempeño del sistema de plafón anidólico. Aún cuando el factor de concentración, bajo condiciones de cielo nublado, se limita a entre 2 y 3, esto es adecuado para lograr los niveles de la iluminancia de luz natural interior. En el extremo inicial del ducto la luz se desconcentra por medio de un segundo dispositivo anidólico para dirigir el flujo hacia el plano de trabajo.

### 15.12.4 Control

Si se emplea una persiana exterior para controlar el sol directo y el deslumbramiento excesivo, se requieren de controles manuales o automatizados. El propio control anidólico no requiere de controles adicionales.

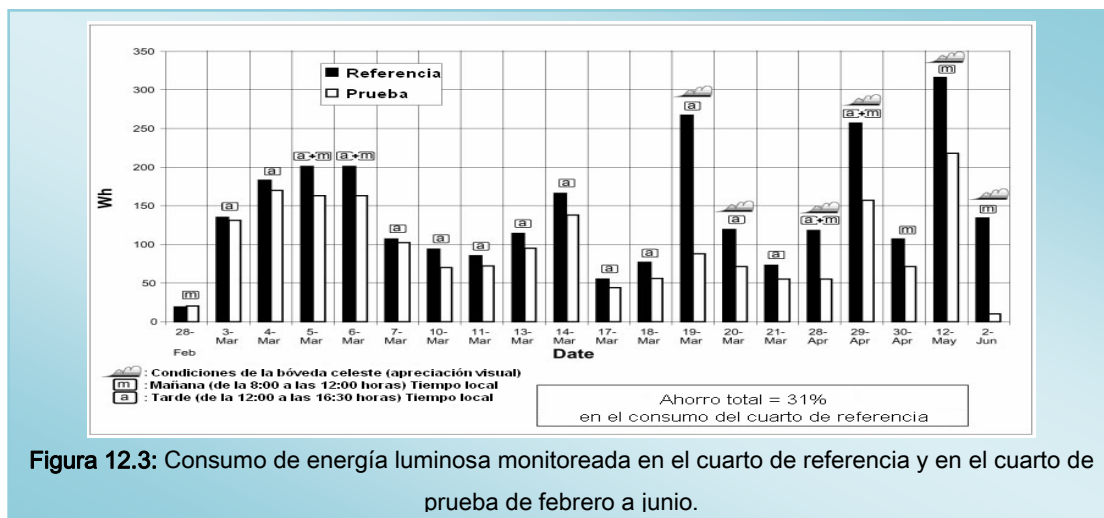


Figura 12.3: Consumo de energía luminosa monitoreada en el cuarto de referencia y en el cuarto de prueba de febrero a junio.



### 15.12.5 Mantenimiento

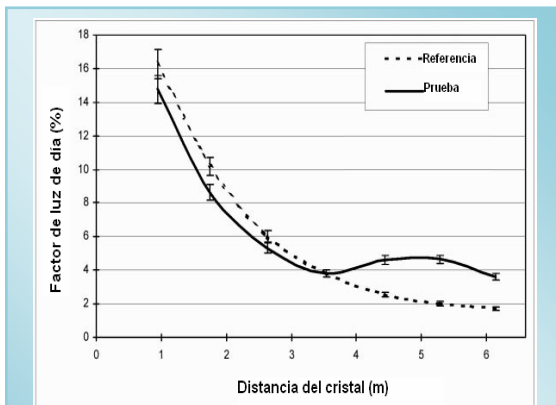
El sistema básico de plafón anidólico, normalmente no requiere de mantenimiento. En condiciones usuales atmosféricas, es decir, sin polvo, y con una calidad de aire típico de un ambiente urbano, la lluvia se encargara de limpiar la cara o el cristal de entrada al sistema para mantener niveles normales de desempeño. La operación de un sistema plafonal anidólico durante aproximadamente 3 años, ha confirmado lo anterior (figura 12.4). Cuando se instala una persiana para proporcionar control solar también debe de proporcionársele mantenimiento al sistema de persianas.

Un sistema plafonal anidólico requiere gastos adicionales iniciales en relación a una ventana convencional para lograr un sistema de colector óptico en la fachada y para construir un pleno reflejante con un elemento de emisión óptica. Suponemos que las persianas y controles de luz se incluirían en un sistema convencional, por lo que no se les consideraría como costo adicional. El consumo de energía para proporcionar iluminación eléctrica fue monitoreado en dos modelos de oficinas de tamaño real midiendo 6.6 metros de profundidad y equipados con el mismo controlador de luz atenuable y luminarias suspendidas consistentes en dos hileras de 2 lámparas fluorescentes de 32 watts cada una. En un local, (espacio de prueba), se instaló un plafón anidólico y el otro, (el espacio de referencia), fue dotado de una fachada convencional de doble cristal. Ninguna de las fachadas contaban con control solar y se orientaban hacia el norte durante el período de monitoreo. Ambos locales emplearon cristal transparente, la iluminancia de la zona donde se realizarían las tareas visuales ( $300 \text{ luxes} \pm 15\%$ ) a 5 metros de la ventana, se equilibraba en ambos locales a través del control de atenuación de luz eléctrica, (la figura 12.3 muestra los resultados del monitoreo del consumo de energía para propósitos de iluminación). El local de prueba con plafón anidólico utilizó 31% menos electricidad para iluminación, durante este periodo de monitoreo, que el espacio de referencia para una profundidad convencional (6.6 m en este caso). Aún mayores ahorros relativos pueden esperarse en un local de mayor profundidad.

Debe enfatizarse que estos ahorros de energía suponen control automático total de la luz de la iluminación eléctrica, sin tomar en cuenta la conducta del usuario. Dependiendo de la conducta del usuario, la utilización de persianas de protección solar, al igual que control automatizado, pueden dar lugar a diferentes resultados, especialmente para fachadas orientadas al sur u otras fachadas que reciben luz solar directa.

### 15.12.6 Ejemplos de Aplicación

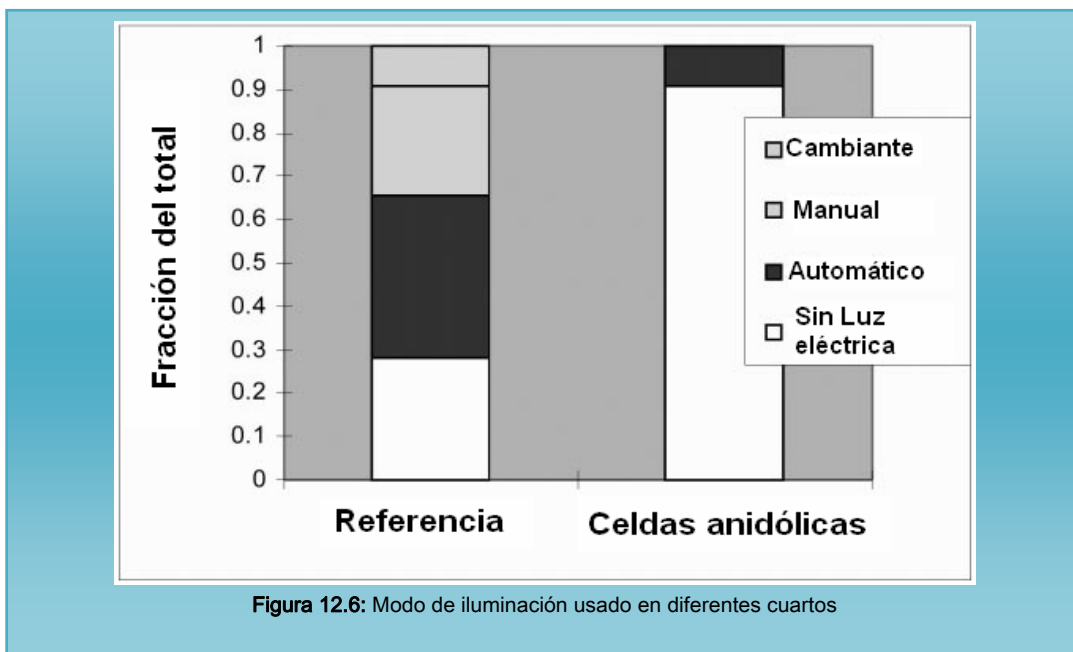
- Módulo de demostración de luz natural (DEMONA), Lausanne, Suiza.
- Edificio experimental solar LESO, Lausanne, Suiza.



**Figura 12.5:** Comparación del Factor de Luz de Día con celdas anidólicas contra el otro cuarto con ventana de doble cristal y persiana.



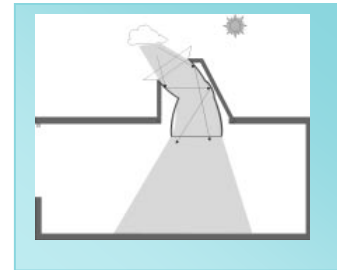
**Figura 12.4:** Edificio experimental solar LESO, Lausanne, Suiza.



**Figura 12.6:** Modo de iluminación usado en diferentes cuartos

## 15.13 Aberturas cenitales anidólicas

La abertura cenital anidólica es un sistema de luz natural basada en una óptica sin imágenes. La alta selectividad angular de este dispositivo anidólico (véase capítulo 4.12), se emplea para recoger la luz natural difusa de una gran parte de la bóveda celeste sin introducir penetración solar directa. Este tipo de sistema de luz cenital se emplea, de manera óptima, para proporcionar luz natural en edificios de un solo piso, atrios, o en el último piso de un edificio de gran altura.



### 15.13.1 Descripción técnica

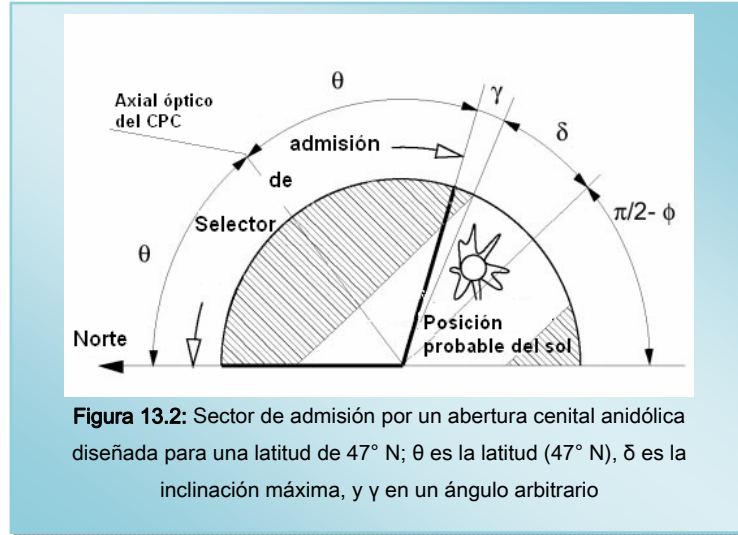
#### Componentes

El sistema de abertura cenital anidólica se compone de un elemento óptico concentrador y un elemento emisor desconcentrador. El colector se basa en un concentrador lineal bi-dimensional sin imágenes, y un compuesto parabólico, cuyo eje longitudinal se orienta de oriente a poniente. La abertura se inclina hacia el norte para ubicaciones en el hemisferio norte y se diseña de tal manera que el sector en el que admite la luz incluye todo el cielo entre el horizonte norte y la posición más elevada del sol en la porción sur del cielo durante todo el año. Como se muestra en la figura 13.2, el sol nunca penetra el sector de ingreso, excepto al principio o al final de cada día, entre los equinoccios de invierno o primavera. La protección solar se completa por medio de una serie de tiras verticales colocadas uniformemente sobre la abertura y espaciadas a 0.5mm.



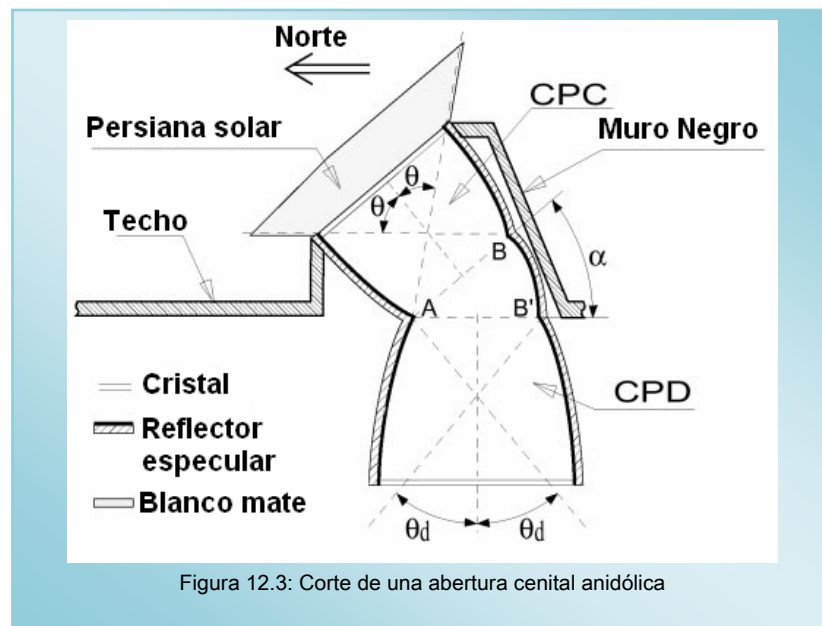
Figura 13.1: Modelo a escala de una abertura cenital anidólica localizada en un tejado

El ángulo de admisión,  $\theta$  equivale a  $50^\circ$ , y el ángulo de inclinación  $\alpha$ , a partir de la horizontal, equivale a  $40^\circ$  (véanse las figuras 13.2 y 13.3). Estos ángulos pueden determinarse empleando una simple ecuación proporcionada en Courret (1999) y dependen de la latitud del lugar que, en este caso, equivale a  $45^\circ$  norte. Un desconcentrador parabólico



**Figura 13.2:** Sector de admisión por un abertura cenital anidólica diseñada para una latitud de  $47^\circ$  N;  $\theta$  es la latitud ( $47^\circ$  N),  $\delta$  es la inclinación máxima, y  $\gamma$  en un ángulo arbitrario

compuesto, similar al concentrador parabólico compuesto mencionado anteriormente, pero en sentido opuesto, se coloca en el extremo emisor de la abertura para guiar el flujo de luz natural hacia la parte inferior del local. En la situación ilustrada en la figura 13.3 apunta verticalmente hacia abajo. La conexión entre el concentrador y desconcentrador se realiza por medio de una sección de reflector cilíndrico. El dispositivo completo equivale a la abertura cenital anidólica que se muestra en la figura 13.3. El ángulo de egreso del dispositivo  $\theta_d$  equivale a  $40^\circ$  y se recorta a los  $45^\circ$  para reducir su longitud. La abertura cenital anidólica no constituye una fuente de deslumbramiento directo para los usuarios, bajo condiciones normales. Para evitar que los reflectores recojan polvo, el dispositivo se envuelve entre dos capas de cristal cuya transmitancia visible es de 0.9.



**Figura 12.3:** Corte de una abertura cenital anidólica

## Producción

Las superficies reflectoras consisten en hojas de aluminio anodizado cuya reflectancia especular es del 0.9 y que se coloca sobre marcos de madera u otros materiales estructurales. Con la economía de la producción en volumen, el marco puede fabricarse de material compuesto.

## Ubicación en el Sistema de Vanos

Este sistema se diseña para colocarse en techumbres con un eje longitudinal este-oeste. Su abertura de ingreso se inclina hacia el norte en el hemisferio norte y hacia el sur en el hemisferio sur (figura 13.4).

## Barreras Técnicas

La abertura cenital anidólica debe ser diseñada como parte de un sistema de techumbre sobre un área de tarea visual o en un atrio para que el sistema se integre al proceso general de diseño en sus etapas más tempranas. Los detalles constructivos son similares a las de otros sistemas de iluminación cenital en techumbres.

### 15.13.2 Aplicación

La abertura cenital anidólica se diseño para aplicarse en techumbres. Como cualquier abertura en el techo orientada hacia el norte en el hemisferio norte, este dispositivo tiene la ventaja de proporcionar luz natural sin depender prácticamente de los cambios en la distribución de luminancia del cielo que son resultado del movimiento de nubes o del propio sol. Dado que la cantidad de luz no va a ser tan variable como la de aquellos sistemas que admiten luz solar directa, la abertura cenital anidólica debe producir menos deslumbramiento y proporcionar mayor comodidad visual, por lo que tendrá gran aplicación en aquellos lugares en que es esencial la comodidad visual, por ejemplo, instalaciones deportivas, museos, atrios y mercados. Sin embargo, puede requerir áreas de aberturas mayores que aquellos sistemas que han sido diseñados para admitir luz solar directa.

### 15.13.3 Principios y Características Físicas

El diseño del sistema se basa en ópticas sin imágenes y es similar al diseño de cualquier sistema anidólico de luz natural. Una descripción más detallada de los principios de la óptica se proporciona en el capítulo 12 de esta sección (plafón anidólico).

### 15.13.4 Control

Las aberturas cenitales anidólicas proporcionan una protección eficiente con respecto a la radiación solar directa sin emplear partes móviles. Esta protección ha sido verificada en pruebas con modelos a escala. Aún cuando las aberturas cenitales anidólicas no contienen partes móviles, la luz natural que transmiten durante el todo el año debiera ser menos variable que aquella transmitida por sistemas fijos o móviles que deben controlar la luz solar directa.

### 15.13.5 Mantenimiento

Dado que las aberturas cenitales anidólicas no tienen partes móviles y porque no es importante la transmisión de imágenes, no existen problemas de mantenimiento. Bajo condiciones atmosféricas normales, es decir, sin polvo, y en latitud media, la lluvia debe ser suficiente para limpiar el cristal de entrada.

Radio de operación (%)	10			15			20			25			30			35			40		
Cobertizo con persianas	10	0	0	45	5	0	60	40	0	65	40	5	75	50	20	80	60	35	82	65	45
Cobertizo sin persianas	30	0	0	60	25	0	70	60	10	80	60	30	82	65	45	84	72	55	85	75	60
Sistemas a nidólicas	55	20	0	74	52	25	82	75	45	85	75	65	87	80	65	88	82	72	89	84	75
Luz necesaria:	<input type="checkbox"/> 300 luxes			<input type="checkbox"/> 500 luxes			<input type="checkbox"/> 750 luxes														

Tabla 13.1: Autonomía de la luz natural (%) calculada desde el promedio de luz natural disponible por debajo de la bóveda celeste. El radio de abertura es el radio del área del cristal con respecto al área total del techo.

### 13.6 Costo y ahorro de energía

En climas templados frecuentemente ocurren condiciones de cielo nublado, principalmente en primavera, verano y otoño. Bajo estas condiciones se requiere un **factor de luz de día** adecuado para lograr ahorro de energía. La eficiencia y optimización de transmisión de luz no debería de priorizarse por encima de la comodidad visual y térmica. Se compararon las aberturas cenitales anidólicas de dos tipos de sistemas cenitales convencionales: cristal horizontal difusor y cristal en techo diente de sierra utilizando simulaciones por computadora. **Autonomía de luz natural** se calculó para distintas relaciones entre aberturas y conjuntos de puntos a iluminar en que se quería establecer una iluminancia horizontal media para cada uno de estos tres tipos de diseño.

La **autonomía de luz natural** es el porcentaje de tiempo en que el cielo nublado es suficientemente luminoso para que se puedan apagar las luces artificiales dentro del período de horas de trabajo de las 8:00 a las 18:00 horas. Si uno multiplica este parámetro por la frecuencia de tiempo en condiciones de cielo nublado y el consumo de energía eléctrica para iluminar, se puede obtener una estimación del consumo de energía anual para propósitos de iluminación. Los resultados se presentan en la tabla 13.1. En claraboyas con aberturas anidólicas se requiere una relación de aproximadamente 15%.

Bajo condiciones de cielo despejado y en un clima semi-templado con una relación de abertura del 20%, los niveles de luz natural alcanzan 500 luxes durante el 79% de las horas de ocupación del edificio.

### 15.13.7 Ejemplos de aplicación

Una abertura cenital anidólica se incorporó en el diseño de un atrio para el nuevo edificio de los archivos cantonales en Suiza. Con el propósito de integrar la abertura a la techumbre, se requirieron varias modificaciones debido a que el atrio no estaba orientado al eje oriente-poniente. Un corte que se muestra en la figura 13.4 nos da las proporciones generales. En el diseño original del edificio sólo se proporcionaba luz natural por medio de una serie de ventanas verticales colocadas en la parte superior del atrio. Al introducir aberturas cenitales anidólicas aumentó la iluminancia horizontal en la parte inferior del atrio en un 64%; la relación de abertura se incrementó solamente en un 11%. Aunque estos estudios de diseño aparecen como favorables, la abertura cenital anidólica no se incorporó al diseño final del edificio.

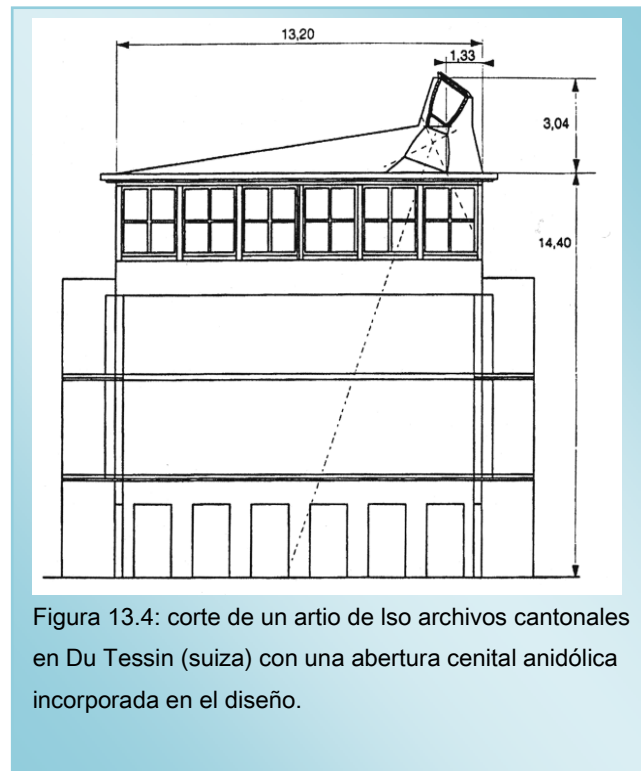
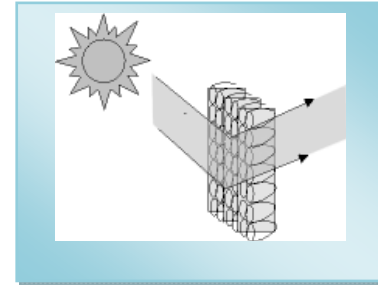


Figura 13.4: corte de un atrio de los archivos cantonales en Du Tessin (suiza) con una abertura cenital anidólica incorporada en el diseño.



## 15.14 Persiana solar anidónica

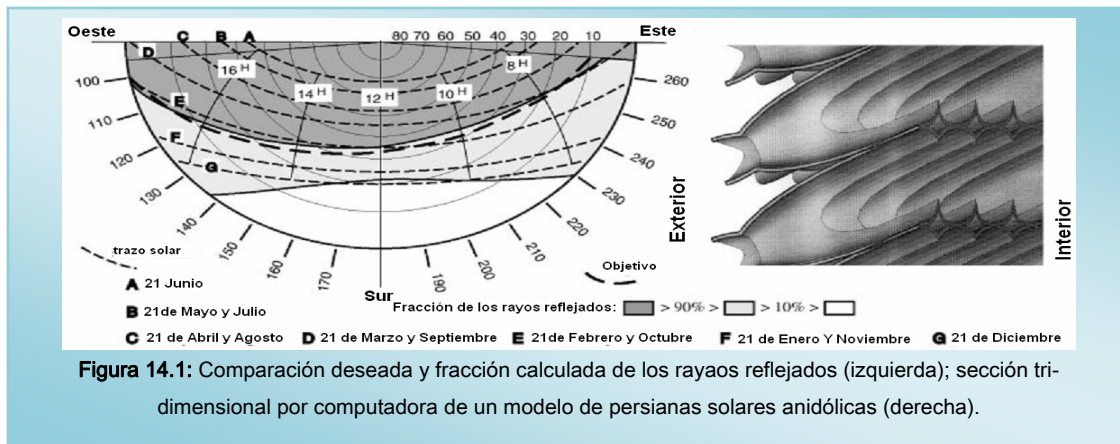
Las persianas solares anidónicas consisten de una retícula de elementos huecos reflejantes, cada uno de los cuales se compone de dos concentradores parabólicos compuestos tridimensionales. Las persianas se diseñan para luz lateral y proporcionan una transmisión de luz angular selectiva para controlar la luz solar y el deslumbramiento.



### 15.14.1 Descripción técnica

#### Componentes

La característica innovadora de las persianas solares anidónicas comparadas con otros sistemas solares anidólicos, por ejemplo, plafones anidólicos y aberturas cenitales anidólicas, es el uso de elementos reflejantes tridimensionales, (véase la figura 14.1) y su pequeño tamaño. El sistema óptico de estas persianas está diseñado para impedir que la mayor parte de los rayos solares de las partes superiores del sol directo penetren, pero de permitir la transmisión de luz difusa o luz solar en invierno de las partes inferiores. La figura 14.1 muestra una fracción de los rayos rechazados en función de altitud y azimut. El diseño de la porción de las persianas que admiten la luz puede adaptarse a la orientación específica de una fachada y a los ciclos diurnos típicos de temperatura exterior; por ejemplo, se requiere mayor penetración solar antes del medio día que después. La óptica de la porción de persianas que emiten luz se diseña para dirigir luz natural hacia el cuadrante superior del local hacia el plafón y posteriormente distribuir la luz de manera horizontal dentro de un ángulo de más o menos 25° de la superficie normal de la ventana. Este diseño ayuda a difundir la luz solar transmitida sin producir deslumbramiento.



## Producción

Los elementos del sistema de persianas pueden, en teoría, producirse a cualquier escala mayor y deben optimizarse para cada latitud y orientación. En el presente estudio se supone que la fachada esta orientada hacia el sur 47° N

La simulación por computadora se basa en el trazo de rayos y se empleó para evaluar el desempeño final del dispositivo, cuya forma debía modificarse para cumplir con los requerimientos de fabricación por medio de estereolitografía laser. La transmitancia de las persianas solares anidólicas también fue evaluada experimentalmente por medio de una esfera integradora. La selectividad angular del dispositivo con respecto a las distintas posibles direcciones de los rayos de ingreso también fue evaluada.

Una serie de 20 piezas de 31 X 35 X 10 cm dentro de 48 elementos huecos, cada uno, se fabricó en plástico por medio de moldeo frío al alto vacío en un molde de silicón. La pieza matriz inicial se creó por medio de estereolitografía laser a través de un modelo de computadora. Las superficies especulares se crearon depositando un recubrimiento de aluminio por medio de una deposición de vapor al vacío. La figura 14.2 muestra el aspecto de una sección de la persiana.

## Ubicación en el Sistema de Vanos

El sistema de persianas anidólicas puede aplicarse ya sea como una persiana fija a aberturas de ventana que se diseñaron principalmente para recoger luz natural, o pueden colocarse en la parte superior de una ventana normal en los casos en que debe mantenerse la vista hacia afuera a través de una porción inferior de la ventana. En cualquiera de las dos aplicaciones las persianas solares anidólicas se colocarían típicamente entre dos cristales para protegerlas del polvo.



**Figura 14.2:** fotografía tomada por detrás de la abertura de salida del dispositivo. Una celda brilla solamente si la vista es parte de la dirección del sector angular

## Barreras técnicas

Un número de problemas de producción deben resolverse antes de que este sistema esté disponible a un costo razonable. Debe desarrollarse un procedimiento eficiente para traducir los criterios de diseño en una aplicación específica en un molde y luego producir el producto final en paneles de gran tamaño. También se requieren métodos mejorados para aplicar y mantener el recubrimiento reflejante.

### 15.14.2 Aplicación

Las persianas solares anidólicas constituyen un sistema fijo para controlar luz natural y ganancias térmicas en fachadas que reciben una gran cantidad de luz solar. El propósito de estas persianas es aumentar la penetración de luz natural bajo un amplio rango de condiciones, al mismo tiempo que evitar ganancias de calor excesivas en el espacio interior. No emplean partes móviles. Aunque el sistema está principalmente diseñado para controlar luz natural en climas soleados, puede emplearse bajo cielos predominantemente nublados.

### 15.14.3 Principios y características físicas

El sistema se basa en óptica sin imágenes y es similar a otros sistemas anidólicos, excepto que se compone de elementos tridimensionales. Una descripción más detallada de óptica sin imágenes se proporciona en el capítulo 12.

Los resultados experimentales (véase la figura 14.3), muestran que la máxima transmitancia de un sistema de persianas anidólicas solares alcanza un 26% en la parte central de la zona en la que ingresa la luz. Este valor corresponde a la relación entre las áreas efectivas de las aberturas para los ángulos de incidencia más favorables. La discrepancia entre la selectividad angular media y la teórica es mayormente un resultado del proceso de fabricación del prototipo.

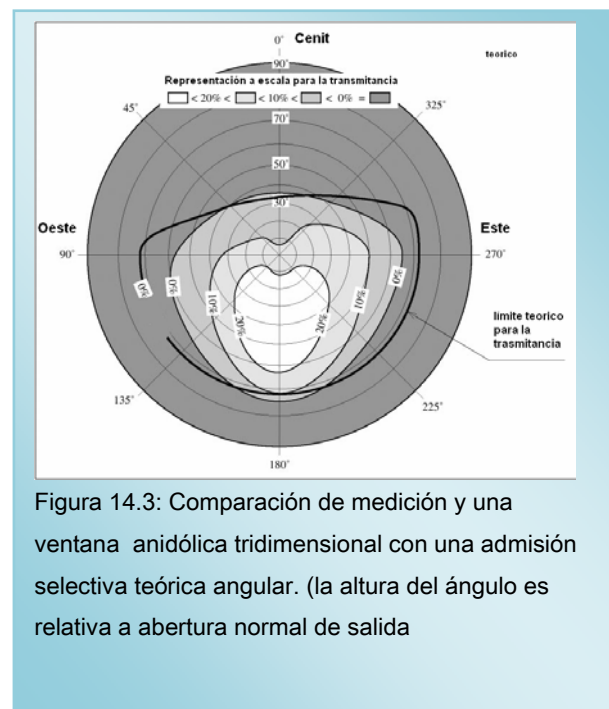


Figura 14.3: Comparación de medición y una ventana anidólica tridimensional con una admisión selectiva teórica angular. (la altura del ángulo es relativa a abertura normal de salida)

#### 15.14.4 Control

El sistema de persianas solares anidólicas está expresamente diseñado para controlar la penetración de luz solar para posiciones del sol específicas (véase la descripción técnica arriba y la figura 14.1). Puede permanecer en una posición fija y no requiere ser movida como una persiana convencional.

Se pueden incrementar los niveles de iluminancia o ganancias solares dándole una inclinación al dispositivo en relación a su posición vertical. Esta posibilidad fue probada experimentalmente con un ángulo de inclinación hacia arriba de 18° y se confirmó una mejora en el desempeño del dispositivo.

#### 14.5 Mantenimiento

Debido a que la persiana anidólica es un sistema fijo protegido contra el polvo y suciedad a través de cristal por ambos lados, no requiere mantenimiento especial.

#### 15.14.6 Costo y ahorro de energía

Debido a sus requerimientos de desempeño, la forma tridimensional requerida por el sistema es más compleja que los sistemas anidólicos bidimensionales, tales como plafón anidólico o abertura cenital anidólica. Su costo depende principalmente de los detalles del proceso de fabricación. El dispositivo podría, en principio, diseñarse y fabricarse con un alto grado de automatización y mecanización, resultando en una reducción de costo. El proceso de fabricación de persianas solares anidólicas es más complejo, por lo que el costo de este dispositivo puede ser mayor que para otros dispositivos. Sin embargo, debido a que la óptica que se emplea en las persianas solares anidólicas debe funcionar a cualquier escala, se da la posibilidad que un panel de persianas solares puede fabricarse en gran volumen y bajo costo.

Los principales ahorros de energía se logran controlando el uso de energía eléctrica para iluminación cuando está disponible la luz natural por medio de persianas anidólicas. Pueden esperarse mayores ahorros de energía en su uso empleando luz directa solar que luz natural difusa. Debido a que el problema de deslumbramiento se resuelve redirigiendo la luz hacia el plafón, las persianas también pueden proporcionar una considerable ganancia de calor en invierno sin un impacto visual adverso. Su muy eficiente función de control solar en verano

reduce el consumo de energía para aire acondicionado al igual que la capacidad pico instalada para enfriamiento y los requerimientos necesarios de energía.

#### **15.14.7 Ejemplos de Aplicación**

Las persianas solares anidólicas no se han empleado todavía en ningún edificio.

## 16.0 Cálculo de iluminación natural

### 16.1 Introducción

Muchos problemas en el diseño de la iluminación – artificial al igual que natural – pueden ser, hoy en día, tratados y resueltos con software de simulación. Dependiendo de la complejidad del problema, la etapa del proceso de diseño, la precisión deseada, al igual que la calidad de la información de salida, el uso de herramientas de vanguardia es frecuentemente el único camino a seguir. Aunque estas herramientas normalmente precisan modelado detallado, requieren conocimientos profundos de los programas y exigen una capacidad muy elevada de poder computacional. Los procesos de modelado se han simplificado a través de los últimos años, sin embargo, consumen mucho tiempo.

Las simulaciones complicadas no son la manera más apropiada para iniciar el desarrollo de estrategias de luz natural en las etapas tempranas del diseño, ni para resolver problemas sencillos que ocurren con frecuencia, como, por ejemplo, la duración del soleamiento en puntos específicos, o una decisión general con respecto al tipo de tragaluces que han de seleccionarse, porque requieren demasiado tiempo para emplearlos, es decir, no son eficientes desde un punto de vista de costo.

El desarrollo de herramientas simples de diseño, se da por un buen número de razones:

- Históricamente, debido a la necesidad de abordar los problemas de luz natural sin que estuviera disponible la tecnología de la computación, se han desarrollado un número de herramientas simples de acuerdo a los requerimientos de los diseñadores. Estas herramientas proporcionan resultados de manera rápida y, generalmente, suficientemente precisos. La mayor parte de estos están probados y validados.
- Herramientas simples de diseño tales como tablas y nomogramas, frecuentemente son el resultado de una “compresión de conocimientos” que se derivan de estudios paramétricos muy complejos. Los datos requeridos se obtienen, por ejemplo, de estudios modelo bajo cielos artificiales o muchas corridas de programas de computadora. La interdependencia de los parámetros de diseño pueden, entonces, rápidamente estudiarse buscando condiciones limítrofes a través de un nomograma y, finalmente, obteniendo los factores de luz de día en las oficinas adyacentes. Estas herramientas se basan en años de experiencia extensa. Las variaciones paramétricas no requieren volver a calcularse por parte del diseñador.

- Dado que las computadoras están disponibles en casi todo lugar de trabajo, se desarrollaron un buen número de programas que todavía se emplean. Se puede utilizar un software sencillo o datos paramétricos que alimentan herramientas más avanzadas para lograr soluciones de problemas específicos, manteniendo los esfuerzos de modelado y el tiempo de cómputo de manera limitada. Estas herramientas se prestan particularmente para determinar parámetros sencillos, como, por ejemplo, ubicación y tamaño de vanos. La implementación de ecuaciones en programas de cálculo y su despliegue en diagramas con programas como MS-Excel, se puede realizar de manera rápida y sencilla.
- También se presentarán varias herramientas de diseño que existen en el campo de luz natural. Este documento no pretende cubrir todas las estrategias desarrolladas y disponibles. Más bien, es una colección de varios tipos de instrumentos y sus distintos campos de aplicación. Todas estas herramientas se basan en soluciones analíticas, tablas, nomogramas, diagramas, transportadores, métodos simples de cómputo, estudios tipológicos, al igual que el empleo de modelos a escala. Las herramientas proporcionan apoyo en las diversas etapas del proceso de diseño, ayudando a analizar el impacto del diseño sobre las condiciones de luz natural, como, por ejemplo: predio, planificación de la zonificación, utilizando número de horas solares en puntos específicos y estudios de sombras y componentes reflejados. Los resultados obtenidos fundamentarán la selección de estrategias de luz natural, la determinación de tipo y tamaño de aberturas de luz natural y los correspondientes factores de luz de día para los distintos espacios arquitectónicos que han de aprovechar la iluminación natural, como también los aspectos energéticos y térmicos del diseño de luz natural.


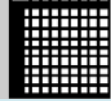
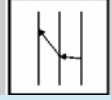
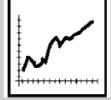
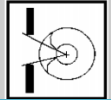

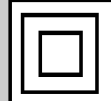
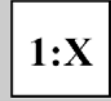
### 16.1.0 Revisando las herramientas

Cada herramienta se analiza de acuerdo a descripción y ejemplo. La parte relacionada con la descripción presenta el método, parámetros de entrada y resultados obtenidos. Se indican las restricciones de cada herramienta. Algunas de las herramientas analizadas son, por ejemplo, en la versión en la que se presentan, sólo aplicables bajo ciertas condiciones limítrofes establecidas, por ejemplo, tipo de predio, clima, o si están sujetas a normas y reglamentos nacionales. Sin embargo, el estar conscientes de esas restricciones, en la mayor parte de los casos, es posible hacer la transición hacia otras herramientas.



Finalmente, para cada herramienta se incluye un *Ejemplo de Aplicación*, conteniendo uso de ecuaciones, gráficas o nomogramas; partes de tablas, y resultados de uso de programas de cómputo. De esta manera se logra dar idea de características específicas, restricciones, al igual que dificultades y tiempo requerido para usar cada herramienta.

Para permitir una rápida selección de las herramientas analizadas, se proporciona una clasificación en forma de matriz de acuerdo al tipo de herramienta y tema que trata. Estas matrices permiten una referencia cruzada entre tipo y tema de estas herramientas, por ejemplo, para un tipo seleccionado se encuentran rápidamente los temas y viceversa.

Tipo		Tema							Herramienta	
		Factor de luz natural iluminado lateralmente	Factor de luz natural iluminado cenitalmente	Diseño de ventanas	Diseño de Tragaluces	Diseño de Atrios	Comportamiento energético/ autonomía de luz natural	Análisis de sombra y reflexión / duración de la luz solar		Confort visual
1 Formulas			◆		◆					2.1.1
		◆	◆	◆	◆					2.1.2
2 Tablas		◆		◆						2.2.1
			◆		◆					2.2.2
3 Nomogramas		◆	◆	◆	◆	◆				2.3.1
		◆				◆				2.3.2
4 Diagramas		◆	◆	◆	◆		◆	◆	◆	2.4.1
		◆		◆						2.4.2
							◆			2.4.3
							◆			2.4.4
5 Transportadores		◆	◆	◆	◆					2.5.1
6 Programas de computadora		◆	◆	◆	◆	◆	◆	◆		2.6.1
								◆		2.6.2
								◆		2.6.3
							◆			2.6.4
		◆	◆	◆	◆		◆			2.6.5
7 Tipologías		◆	◆	◆	◆			◆	◆	2.7.1
8 Modelos a Escala		◆	◆	◆	◆	◆		◆	◆	2.8.1

### 16.1.1 Método simplificado para obtener las dimensiones de un tragaluz dado el FLD

Para un FLD promedio con este método se calcula por medio de:

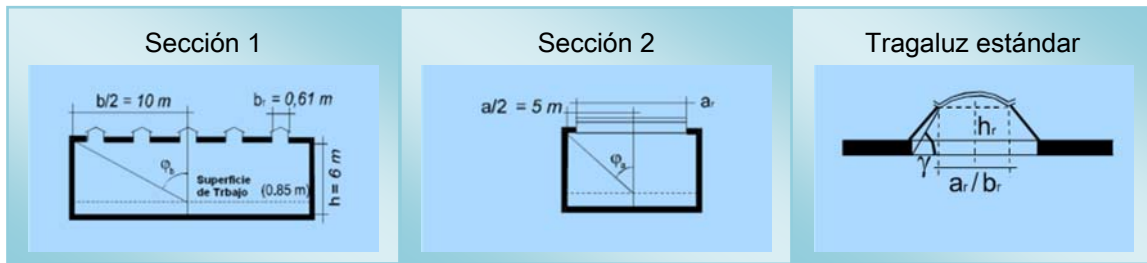
1. Reflectancias de las superficies del local
2. Dimensiones del local
3. Parámetros del cristal (transmitancia, factor de marco, factor de mantenimiento)
4. Tipo de tragaluz con parámetros fotométricos de los pozos de luz y el área total a iluminar. De esta área y el número de tragaluces deseado la altura del pozo al igual que el ancho de cada tragaluz puede determinarse.

Esta herramienta permite una rápida comparación de los distintos tipos de tragaluz en casi cualquier etapa de diseño. Dado que supone un número de simplificaciones y se basa parcialmente en parámetros fijos, el resultado no es muy preciso. Por ejemplo, la influencia que tienen las interreflexiones de los muros laterales del local no se toman en cuenta. Dado que ésta herramienta se basa en una selección libre de FLD, el método puede aplicarse en casi cualquier lugar, y se limita a plantas arquitectónicas rectangulares.

Parámetro	Descripción	Valor Ejemplificativo
$k_1$	Factor del marco del tragaluz,	0.8
$k_2$	Factor de mantenimiento (suciedad sobre el cristal)	0.8
$k_3$	Factor anormal de la transmisión de luz desde el cielo:	0.85
$k_4$	Factor de la forma geométrica y la reflectancia del pozo de luz	0.92
$\tau_{D65}$	Transmitancia del cristal del tragaluz:	0.6
$\rho_D$	Reflectancia de muros:	0.55
$\rho_C$	Reflectancia del plafón:	0.7
$\rho_F$	Reflectancia del piso:	0.2
$\mathcal{G}_a$	Factor que toma en cuenta el ancho del local ( $\rho_a$ )	0.76
$\mathcal{G}_b$	Factor que toma en cuenta el largo del local $f(\rho_b)$	0.88

#### Ejemplo de aplicación

Esta herramienta requiere un juego de parámetros geométricos definido por un espacio tipo.



La geometría del tragaluz está descrita de acuerdo al tipo seleccionado, en un tragaluz estándar. Las descripciones correspondientes están disponibles para otros tipos de tragaluces.

Con los siguientes parámetros de ingreso

Área total de trabajo que debe iluminar el tragaluz para obtener el FLD medio (ejemplo del promedio de FLD = 5% se obtiene de la formula siguiente:

$$A = \frac{FLD \cdot a \cdot b}{\tau_{DGS} \cdot k_1 \cdot k_2 \cdot k_3 \cdot k_4 \cdot \theta_a \cdot \theta_b} \cdot (1 - \rho_f \cdot \rho_c) = 42.6 \text{ m}^2$$

Con un área A y con un número n de tragaluces se puede determinar el largo  $a_r$  y ancho  $b_r$  de cada tragaluz de la siguiente forma:

Número de tragaluces	Ancho Deseado	Longitud Resultante
n = 10	$b_r = 0.61 \text{ m}$	$a_r = A/(n \cdot b_r) = 7 \text{ m}$

### 16.1.2 Factor de luz de día, componente internamente reflejado

Factor de Luz de Día, Componente Internamente Reflejado para espacios con luz lateral y cenital.

Descripción

El factor de luz de día puede ser separado en tres componentes: el componente directo  $FLD_{cielo}$ , un componente que resulta de las partes visibles de las obstrucciones externas  $FLD_{obstruccion}$  y un componente internamente reflejado  $FLD_{refl}$ :  $FLD = FLD_{cielo} + FLD_{obstruccion} + FLD_{refl}$ . Existen una gran variedad de instrumentos para obtener el componente directo.

La ecuación dada para calcular el componente interno reflejado toma en cuenta el flujo lumínico del tamaño del vano, el área de la superficie del local con sus correspondientes coeficientes de reflexión promedios. El método básico, es para la abertura del vano sin tomar en cuenta ninguna otra característica. Para una ventana específica deben tomarse en cuenta todos los parámetros que resultan de todas las diversas características de la ventana. Existe una versión simplificada para luz cenital.

### Ejemplo de aplicación

Con los siguientes parámetros de ingreso

Parámetro	Descripción	Valor Ejemplificativo
$\Sigma b_f h_f$	Suma del área de la ventana (donde: alto 1.7 m, ancho: 2.2 m)	3.74 m <sup>2</sup>
$A_r$	Suma de las áreas de superficies del local (donde: alto: 2.5 m, ancho: 4 m, profundo: 3.5 m)	65.5 m <sup>2</sup>
$\rho$	Reflectancia media de la superficies de los muros	0.45
$\rho_{fw}$	Reflectancia media de piso y partes inferiores de muros sin incluir el muro de la ventana	0.40
$\rho_{cw}$	Reflectancia media del plafón y partes superiores de los muros, sin incluir el muro que contiene la ventana	0.60
$\alpha$	Ángulo de obstrucción	0°
$f_u(\alpha)$	Factor de ventana en función del flujo lumínico externo que incide sobre la ventana desde el hemisferio superior, dependiendo del ángulo de obstrucción $\alpha$	0.319
$F_l(\alpha)$	Factor de la ventana en función del flujo lumínico externo que incide sobre la ventana desde el hemisferio inferior, dependiendo del ángulo de obstrucción $\alpha$	0.067

El componente interno reflejado de FLD se obtiene mediante la fórmula:

$$FLD_{int} = \frac{\Sigma b_f h_f}{A_r} \frac{1}{1-\rho} (f_u F_{fw} + F_l F_{cw}) 100\% = 1.74 \%$$

## 16.2 Método simplificado para tamaños mínimos de vanos para vivienda

### Descripción

Aplicable a espacios iluminados por medio de luz natural a través de una ventana vertical rectangular, este método proporciona el tamaño mínimo de ventana para lograr un factor de luz de día medio de 0.9% sobre el eje a la mitad de la longitud del local y a una altura de 0.85 m.

Obstrucción linear del exterior (rango del ángulo):	0° - 50°
Altura de la habitación: con una variación correspondiente a la altura de la ventana:	2.4 m – 3 m 1.35 m – 1.85 m
Ancho de la habitación:	2 m – 8 m
Profundidad de la habitación:	3 m – 8 m

El ancho necesario de ventana se consigue por medio de tablas. El ancho mínimo de ventana se supone del 55% del ancho del local.

Muchos parámetros de diseño tales como reflectancias de los muros, característicos del cristal, altura de la repisa de la ventana, y la forma geométrica de una obstrucción, son fijos. El método se basa en un factor de luz de día particularmente adecuado para países europeos. Sin embargo, puede emplearse en lugares con otro tipo de situación geográfica y climática, aunque conviene consultar asociaciones de iluminación locales. Estos métodos pueden dar como resultado vanos de mayor tamaño que lo estrictamente indispensable.

### Ejemplo de aplicación

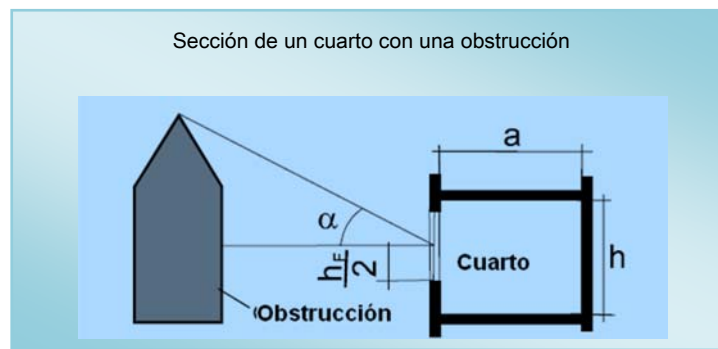


Tabla de ejemplo: ángulo de obstrucción,  $\alpha = 30^\circ$ ; Altura de la Habitación,  $h = 2.7 \text{ m}$ ; Altura de la ventana,  $h_F = 1.55 \text{ m}$

$\alpha$	h	b	Altura Mínima de la Ventana $b_w$ para la Profundidad de una Habitación Determinada																				
			3.00	3.25	3.50	3.75	4.00	4.25	4.50	4.75	5.00	5.25	5.50	5.75	6.00	6.25	6.50	6.75	7.00	7.50	8.00		
30	2.70 ( $h_F = 1.55$ )	2.00	1.31	→	—	—	—	—	1.31	1.34	1.51	1.61	1.69	1.78	1.86	1.95	—	—	—	—	—		
		2.50	1.64	→	—	—	—	—	—	1.64	1.75	1.86	1.96	2.06	2.16	2.26	2.36	2.45	—	—	—	—	
		3.00	1.97	→	—	—	—	—	—	1.97	1.98	2.11	2.22	2.34	2.46	2.57	2.68	2.79	2.91	—	—	—	
		3.50	2.20	→	—	—	—	—	—	—	2.30	2.37	2.50	2.63	2.76	2.89	3.01	3.14	3.27	3.40	—	—	
		4.00	2.63	→	—	—	—	—	—	—	2.63	2.64	2.78	2.93	3.07	3.21	3.36	3.50	3.64	3.78	—	—	
		4.50	2.96	→	—	—	—	—	—	—	—	2.96	3.07	3.23	3.38	3.54	3.70	3.85	4.01	4.17	4.48	—	—
		5.00	3.29	→	—	—	—	—	—	—	—	3.29	3.37	3.54	3.71	3.88	4.05	4.22	4.39	4.56	4.90	—	—
		5.50	3.62	→	—	—	—	—	—	—	—	3.62	3.68	3.86	4.04	4.22	4.40	4.59	4.77	4.96	5.33	—	—
		6.00	3.94	→	—	—	—	—	—	—	—	3.94	4.00	4.19	4.38	4.57	4.77	4.96	5.16	5.36	5.76	—	—
		6.50	4.27	→	—	—	—	—	—	—	—	4.27	4.32	4.52	4.72	4.93	5.14	5.34	5.55	5.77	6.20	—	—
		7.00	4.60	→	—	—	—	—	—	—	—	4.60	4.86	4.86	5.07	5.29	5.51	5.73	5.95	6.18	6.63	—	—
7.50	4.93	→	—	—	—	—	—	—	—	4.93	5.20	5.20	5.43	5.65	5.88	6.12	6.35	6.59	7.07	—	—		
8.00	5.26	→	—	—	—	—	—	—	—	5.26	5.55	5.55	5.78	6.02	6.27	6.51	6.76	7.01	7.52	—	—		

Para una obstrucción lineal horizontal, vista desde un ángulo de  $30^\circ$  del cristal de la ventana, a una altura del local de 2.7 m, una altura de ventana de 1.55 m, un ancho del local de 5.5 m, y una longitud del local de 6.0 m, se requiere una ventana con un ancho mínimo de 4.22 m el resultado obtenido a través de la tabla da un requerimiento mínimo que proporciona un factor de luz de día de 0.9% en un eje a mitad de la longitud del espacio.

### 16.2.1 Determinación de factor de luz de día para espacios con iluminación cenital

#### Descripción

Esta herramienta se basa en el método de *coeficiente de utilización* que se emplea para la luz artificial. Para distintas combinaciones de *índice del local* (que está en función de altura, longitud y ancho del local) y *reflectancias* de las superficies del local se puede obtener el *factor de utilización* para dos distintos tipos de luz natural cenital por medio de tablas, en función de un conjunto de parámetros geométricos:

Tragaluces estándar	Tragaluces cobertizo
Tragaluz inclinado ( $30^\circ, 60^\circ, 90^\circ$ ),	Tamaño de la abertura del tragaluz
Radio fondo y altura y, largo y altura	Inclinado sin cristal del lado del cobertizo
Resultado del exponente del pozo	Inclinado del lado del cristal



El Factor de Luz de Día medio se calcula en función del *coeficiente de utilización* obtenido.

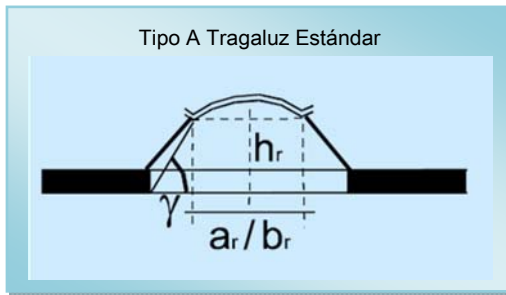
Este método sólo da como resultados Factores de Luz de Día medios. No se pueden obtener valores para puntos específicos. Las tablas permiten variaciones útiles de parámetros de diseño para luz cenital de dos tipos comunes y corrientes, y no se restringen a climas ni a condiciones climáticas específicas.

### Ejemplo de aplicación

Para una habitación: largo  $a = 20$  m, ancho  $b = 100$  m, alto  $h = 5.30$  m el exponente es obtenido por la siguiente fórmula:

$$k = \frac{0.6}{h(0.4 + a)} \approx 1.25$$

El método puede utilizarse con 2 tipos de tragaluces. El tipo A fue seleccionado para este ejemplo.



Un FLD exterior se determina de la siguiente manera:

El factor de utilización  $\eta$  [%] está determinado por las tablas de función o coeficientes de reflexión, obteniendo el cuart de un exponente  $k$ , y la geometría del tragaluz:  $\eta = 68$  %.

Tabla Ejemplificativa:  $\eta$  (factor de utilización) en % para  $a_r / b_r = 1$ ;  $h_r / b_r = 0,25$ ;  $\gamma = 90^\circ$ ,  $w = 0,25$

$\rho_D$	0,8	0,8	0,8	0,5	0,5	0,8	0,8	0,8	0,5	0,5	0,3	0
$\rho_W$	0,8	0,5	0,3	0,5	0,3	0,8	0,5	0,3	0,5	0,3	0,3	0
$\rho_B$	0,3	0,3	0,3	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0
<b>k</b>												
0,6	64	40	32	38	26	49	38	31	36	26	23	16
0,8	75	53	44	50	37	57	49	42	48	36	32	24
1,0	81	59	50	55	41	60	54	47	52	40	35	27
1,25	88	68	59	64	49	65	62	56	60	47	41	32
1,5	93	74	66	69	54	68	67	61	65	51	45	36
2,0	98	83	75	77	61	71	74	69	71	57	51	40
2,5	102	88	81	81	65	73	78	73	75	61	54	43
3,0	104	92	86	85	68	75	81	77	78	63	56	45
4,0	107	98	93	89	73	76	85	81	82	67	59	48
5,0	109	101	97	92	75	77	87	84	84	69	61	49

Un supuesto factor de luz natural  $FLD_{salida} = I_{plano} / I_{ext}$  (ratio de iluminancia en planos inclinados para la iluminancia inferior del domo celeste) está determinada por:

$FLD_{salida} = 1$  para el tipo de estándar de tragaluz. Con una superficie total de la abertura del techo (área de trabajo)  $A = 45 \text{ m}^2$  y parámetros adicionales: transmisión del cristal  $\tau_{D65} = 0.6$ , factor del marco  $k_1 = 0.8$ , factor de suciedad del cristal  $k_2 = 0.8$ , factor de corrección para la penetración anormal de la luz desde el domo celeste hacia el cristal del domo  $k_3 = 0.85$ , y el área total de las superficies de la habitación  $A_{sup} = 200 \text{ m}^2$ , el factor de luz de día medio está determinado por:

$$FLD_{medio} = FLD_{salida} \cdot \tau_{D65} \cdot k_1 \cdot k_2 \cdot k_3 \cdot \frac{\sum A}{A_{sup}} \cdot \eta \cdot 100\% = 5\%$$

### 16.3 Factor de luz de día componente interno reflejado por medio de nomogramas

El Factor de Luz de Día puede separarse en tres componentes: el componente directo del cielo  $FLD_{cielo}$ , un componente ocasionado por la parte visible de las obstrucciones externas  $FLD_{obst}$  y un componente internamente reflejado  $FLD_{refl}$ :

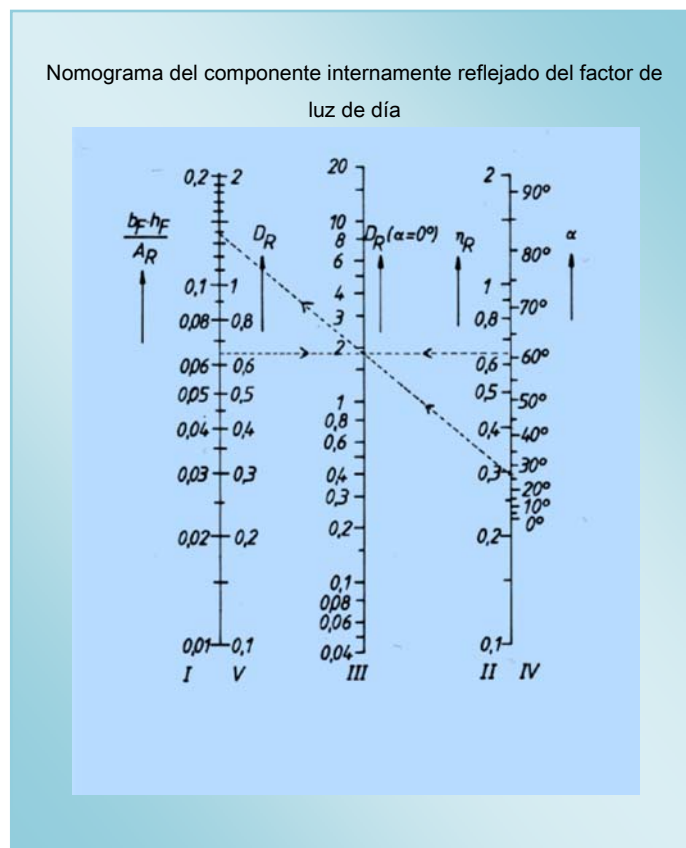
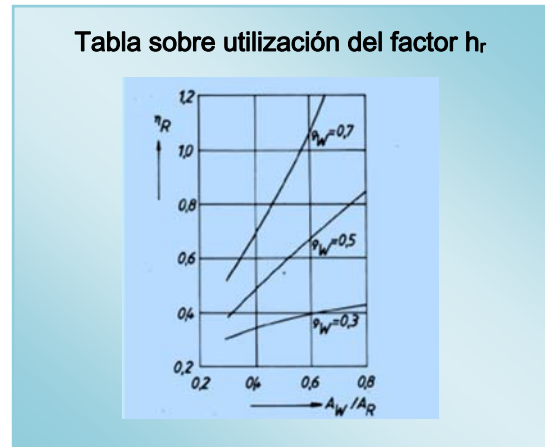
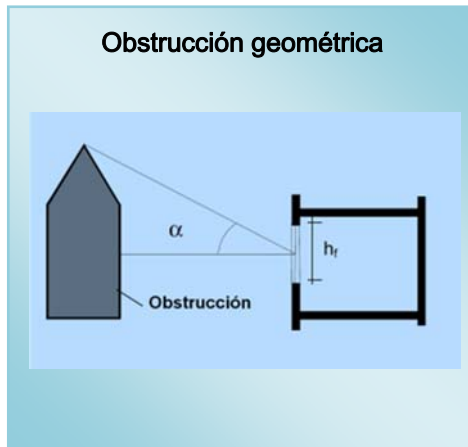
$$FLD = FLD_{cielo} + FLD_{obst} + FLD_{refl}$$

El componente directo y el componente de posibles obstrucciones pueden obtenerse a través de una variedad de herramientas (transportadores FLD, BRE herramienta 2.5.1, 2.4.2 etc.). Este método se basa en un nomograma derivado de una ecuación simple en la que se calcula el componente reflejado interno del FLD en función del tamaño de la abertura del vano, el total de las áreas de las superficies del espacio, un coeficiente de utilización (igual que en cálculos de iluminación artificial) que toma en cuenta las reflectancias de las superficies y, las relaciones entre las áreas de las superficies al igual que el ángulo de reflexión externo. El coeficiente de utilización puede obtenerse de una tabla por separado. Para una ventana específica colocada dentro de la abertura el  $FLD_{refl}$  obtenido se pondera con parámetros de la ventana tales como transmitancia del cristal, factores de limpieza, etc.

En contraste con el cálculo del componente directo del cielo, el nomograma sólo puede proporcionar un componente de factor de luz de día medio. Sólo pueden utilizarse obstrucciones simples lineales; para variaciones mayores, en cuanto a la geometría de las obstrucciones deben considerarse valores angulares medios. Los componentes que no se han considerado deben calcularse empleándose otros métodos. Con nomogramas de este tipo es

posible tratar cristales verticales inclinados y horizontales, y también existen nomogramas para el componente reflejado interno el cual permite analizar cielos despejados.

Ejemplo de aplicación



Se muestra una solución para un ejemplo en que la geometría del espacio incluye un área total superficial  $A$  sub  $A_R$  una ventana cuyo ancho es igual a  $b_f$  y altura = a  $H_f$ , un factor de utilización  $\eta_f$  en función de la relación entre superficies y reflectancia  $\rho_w$  como se muestra en la gráfica anterior, y una obstrucción exterior vista bajo el ángulo  $\alpha$ . El CIR puede obtenerse directamente del nomograma para el caso en que exista obstrucción exterior, al igual que sin obstrucción.

### 16.3.1 Configuración tipo atrio

#### Nomograma para factor de luz día en oficinas adyacentes a atrios

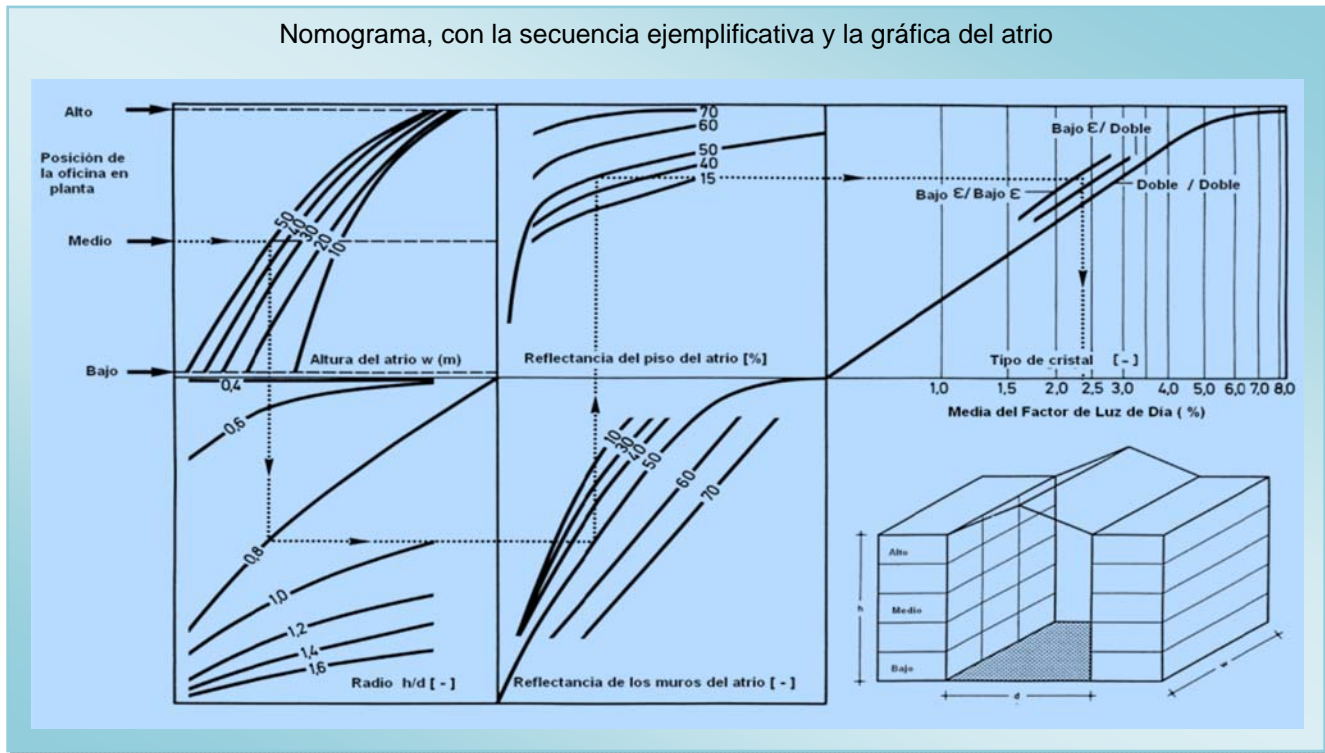
Esta herramienta proporciona un método rápido para estimar los FLD medios en locales adyacentes a atrios lineales. Para una geometría fija para espacios de oficinas (relación ventana entre fachada igual al 60% con un ancho de 3.5m, una longitud de 4.8m y una altura de 2.7m) y reflectancias fijas para las superficies de cada oficina, (piso = 15%, muros = 2.50% y plafón = 70%) Factores de Luz de día medios pueden obtenerse gráficamente para un rango de parámetros de diseño para atrios:

Posición de la oficina:	Pozo , media, o superficie del piso
Radio del atrio altura o profundidad	0.4 - 1.6
Reflectancia de los muros opacos del atrio:	0 % - 70 %
Reflectancia del piso del atrio:	15 % - 70 %
Cristal del atrio:	Doble / Bajo $\epsilon$
Cristal del las oficinas:	Doble / Bajo $\epsilon$

Éste es un método de un solo paso limitado a atrios lineales. Da como resultado solamente factores de luz de día medios para espacios específicos de oficinas. Sin embargo, es una herramienta de fácil empleo que permite entender rápidamente la influencia de los diversos parámetros de diseño sobre situaciones de iluminación en los espacios de trabajo adjuntos a atrios. La base de datos para generar el nomograma se obtuvo de las mediciones de un modelo a escala bajo un cielo artificial.

### Ejemplo de aplicación

Nomograma, con la secuencia ejemplificativa y la gráfica del atrio



Parámetros de diseño para un edificio determinado

Posición de la oficina :	Media
Ancho del atrio, $w$ :	50 m
Altura del atrio, $h$ :	12 m
Profundidad del atrio, $d$	15 m
Reflejo de los muros del atrio:	50 %
Reflejo del piso del atrio:	50 %
Cristalería del atrio:	Low $\epsilon$
Cristalería de la oficina:	Low $\epsilon$

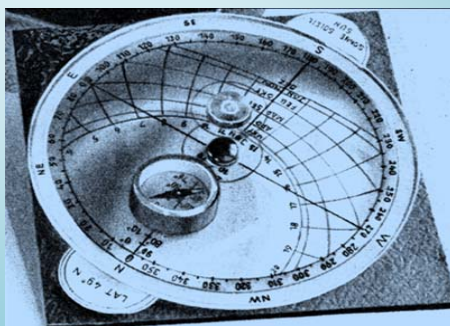
El Promedio del Factor de Luz de día de una oficina propuesta es del 2.4%, este resultado se obtuvo mediante a la utilización del nomograma anterior.

## 16.4 El horizontoscopio para determinar número de horas de sol, FLD del componente de sol de cielo directo, y de penetración de calor radiante.

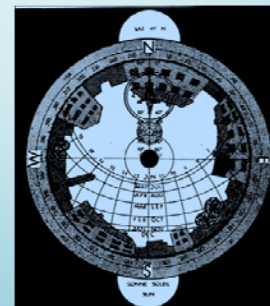
El **horizontoscopio** tiene forma de un medio domo pequeño de acrílico con un compás integrado. Incluye una proyección estereográfica correspondiente con altitud y azimut solares. Este dispositivo se emplea para determinar la duración de luz solar en puntos interiores y exteriores específicos. Las monteas solares comúnmente utilizadas, disponibles para todo tipo de ubicaciones y latitudes contienen la trayectoria para los solsticios de verano e invierno y días promedio de verano e invierno. El número de horas de sol se obtiene de tablas considerando intervalos horarios que se encuentran dentro de los segmentos de cielo no ocultos en la proyección estereográfica. En la fase de diseño, el medio domo de acrílico del **horizontoscopio** puede sustituirse por una proyección geométrica de la abertura de luz natural hacia otro tipo de tabla que luego se sobrepone en la montea solar, Esta herramienta se puede emplear para cualquier tipo de obstrucciones. Otras tablas y gráficas disponibles permiten determinar el componente de cielo directo del Factor de Luz de Día y estimar de manera rápida todas las fuentes posibles de deslumbramiento. Se pueden emplear tablas que proporcionan ganancias de calor radiante para estimaciones rápidas de la penetración de calor solar hacia espacios interiores, en función de orientación, inclinación y tipo de cristal empleados en fachadas.

Ésta es una herramienta útil para determinar la duración del soleamiento de manera estimativa en la fase del diseño y en obra. Las estimaciones del Factor de Luz de Día sólo toman en cuenta el componente solar directo. El componente de reflexión interna debe calcularse utilizando otros métodos. Para emplear las tablas de ganancias de calor, las unidades obtenidas deben convertirse en unidades del sistema internacional; deben actualizarse continuamente los datos empleados para los parámetros de elementos de continuo desarrollo.

Imagen del horizontoscopio con medio domo de acrílico, compás y montea solar



Duración de soleamiento para un punto específico obtenido en el predio por medio del horizontoscopio





### 16.4.1 Diagrama Waldram para determinar el componente de cielo directo del FLD

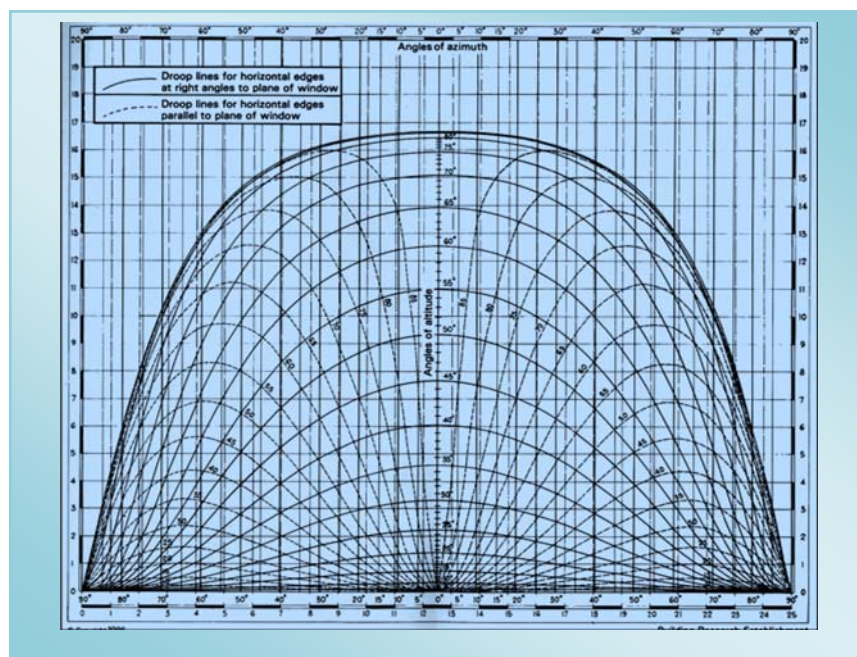
El método se basa en una proyección de la mitad de un hemisferio del cielo sobre una cuadrícula la cual se construye de tal manera que áreas equivalentes de cuadrícula representan contribuciones iguales del cielo a la iluminación en puntos específicos. Estos diagramas están disponibles para distintos modelos de cielo.

Tomando los datos de plantas y cortes a escala, las áreas de cielo y obstrucciones exteriores visibles desde un punto de referencia se dibujan en el diagrama. El área determinada por estas líneas de proyección corresponde a la solución gráfica de la fórmula integral para calcular el componente del cielo basada en un principio de ángulo sólido. El componente del cielo se obtiene evaluando el área de proyección de la ventana sobre el diagrama.

Diagramas de este tipo permiten obtener el componente de cielo directo para aquellos casos en que la forma de las ventanas y las obstrucciones exteriores son complicadas geoméricamente. Pérdidas de transmisión de luz a través de las ventanas deben de tomarse en cuenta. Deben emplearse métodos adicionales para calcular el componente interno reflejado del Factor de Luz de Día.

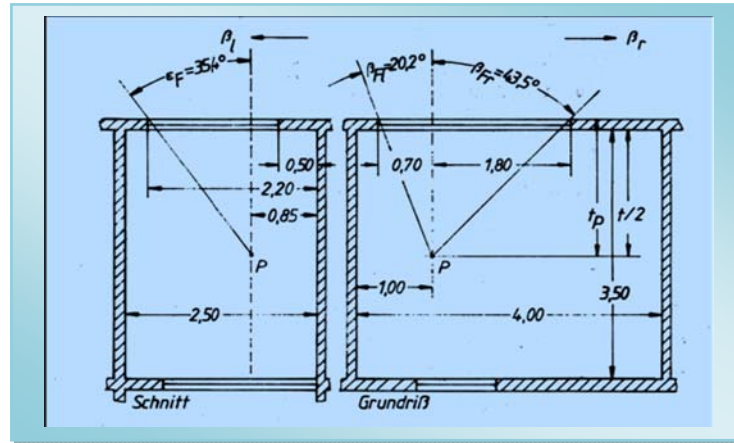
#### Ejemplo de aplicación

Diagrama Waldram para un CIE de la bobead celeste y cristal vertical incluyendo correcciones para pérdida del cristal

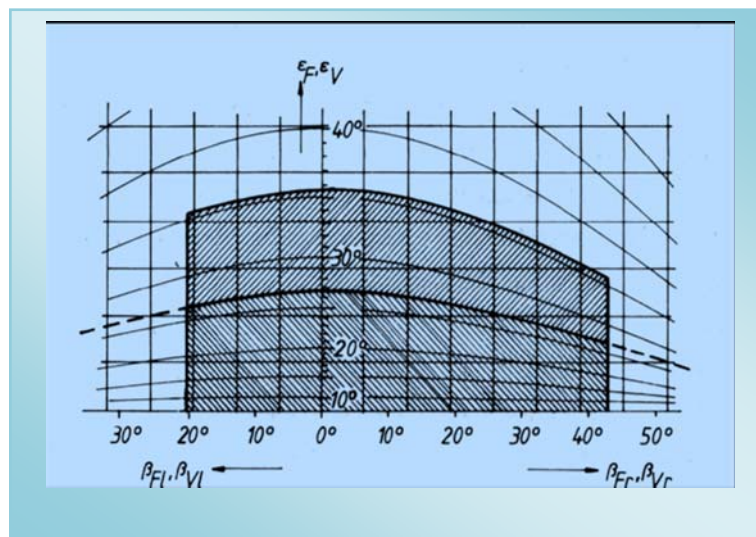




Corte y planta de una habitación con una proyección angular de un punto de referencia seleccionado.



Sección del diagrama con una parte visible proyectada del cielo (por encima de la habitación)



Ejemplo.

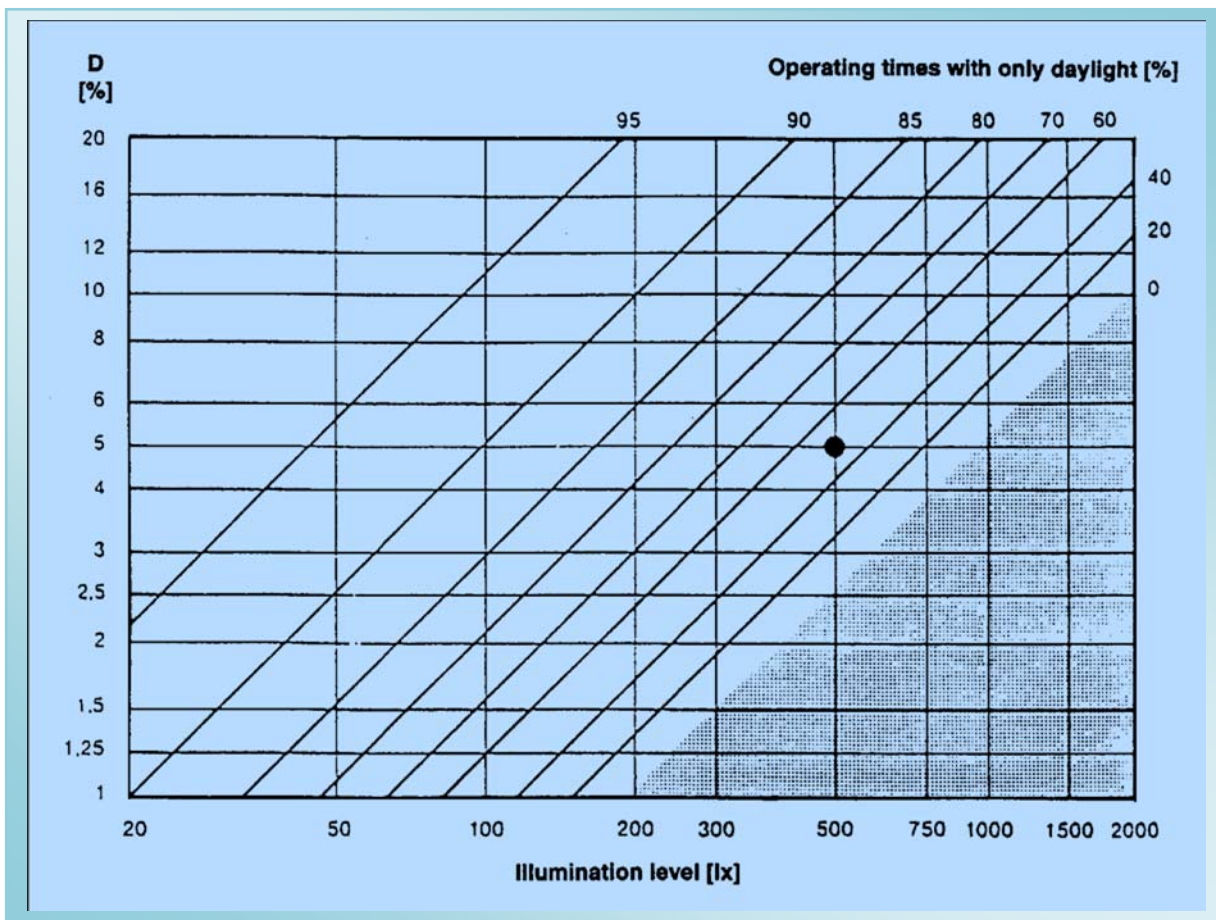
La línea punteada corresponde a una obstrucción lineal frente al espacio arquitectónico. Se obtienen cerca de 19 elementos de la cuadrícula de cielo sin obstrucciones y 26 con obstrucciones. Cada elemento corresponde a 0.1% de componente directo solar. De ésta manera se obtiene un componente directo del sol igual a 1.9% y, suponiendo para la parte obstruida una contribución del cielo del 15%, lo que le corresponde a la obstrucción equivale a 0.39%. El único componente que falta es el de reflexión interna.

### 16.4.2 Determinación de la autonomía de luz natural

Esta herramienta proporciona el mínimo número de horas de operación en porcentaje durante el cual un lugar de trabajo puede iluminarse adecuada y exclusivamente con luz natural, dada una iluminancia requerida y un Factor de Luz de Día deseado. El horario de trabajo se considera o de 7am a 5pm o de 8am a 6pm; y el período considerado es de un año.

#### Ejemplo de aplicación

Tiempos de operación [%] con luz natural para horas de trabajo como una función del Factor de Luz Natural y la estimación de la iluminancia en la zona de trabajo



### 16.4.3 Método para estimar las horas de encendido de luz eléctrica basado en FLD y en información del clima local.

Aún cuando no tiene aplicación para cielos despejados o parcialmente nublados, el FLD es todavía el instrumento de diseño de luz natural más empleado. Este método simplificado utiliza cuatro condiciones limítrofes para la relación entre el Factor de Luz de Día y el horario de luz artificial. Estos cuatro parámetros se obtienen de la información disponible del tiempo local y de las horas en que va a funcionar el edificio. Para un Factor de Luz de Día conocido, en un punto de control de iluminación, el horario de encendido y, por ende, el consumo de energía de las luminarias puede estimarse.

Las condiciones limítrofes para las horas de encendido se obtienen de la siguiente manera:

1. El límite superior que corresponde a  $FLD_1 = 0\%$ , se representa simplemente por la suma total de horas laborables durante el período en consideración.
2. El límite inferior se obtiene a través del tiempo en el cual los intervalos diarios de trabajo en que la iluminancia horizontal exterior se encuentra debajo de la iluminancia deseada en el área de trabajo.

$$E_{\text{exterior}} < E_{\text{tarea}} \quad \text{ésta definición implica} \quad FLD_4 = 100\%$$

3. El horario de encendido sólo se reduce si la iluminancia durante el día excede por lo menos una vez la iluminancia deseada en el punto de control. Para obtener el mínimo horario de apagado, el Factor de Luz de Día tiene que ser mayor que:

$$FLD_2 = E_{\text{tarea}} / E_{\text{máxima, cielo despejado con sol.}}$$

4. La mayor parte del tiempo, las condiciones reales del cielo se encuentran intermedias entre cielo despejado y cielo nublado. De cielos nublados se puede derivar una cuarta condición:

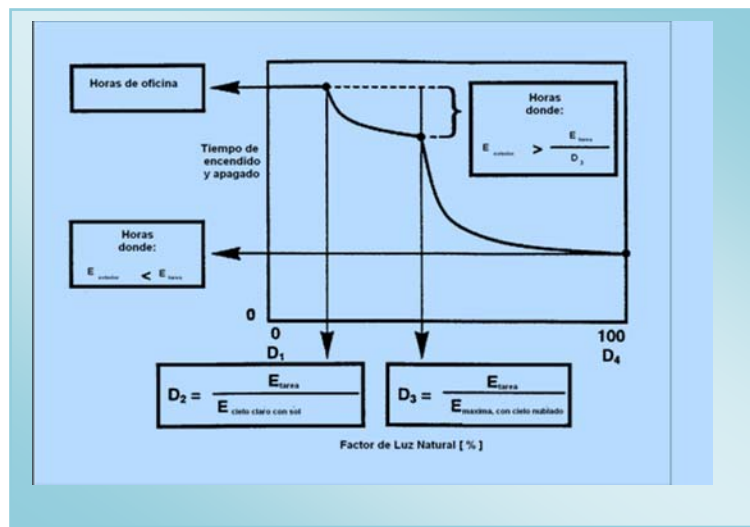
$$FLD_3 = E_{\text{tarea}} / E_{\text{máxima, cielo nublado}}$$

Horas de encendido para  $D_3$  se obtienen restando del total de horas de trabajo, el tiempo durante el cual se cumple la condición:  $E_{\text{exterior}} > E_{\text{tarea}} / FLD_3$

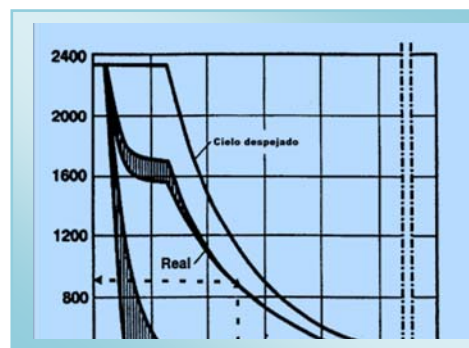
Todas las condiciones limítrofes que se indican en los párrafos anteriores son independientes de la geometría de los espacios. Evaluando la información del tiempo local horaria, se pueden estimar, de manera aproximada, las cuatro condiciones limítrofes. La simulación de condiciones limítrofes involucra un número de incertidumbres y suposiciones. El uso de este método debe restringir estimaciones rápidas en las etapas tempranas de diseño.

### Ejemplo de aplicación

Relación general de factor de luz de día y, encendido y apagado de las horas de luz artificial



Relación de factor de luz de día y, encendido y apagado de las horas de luz artificial derivada de

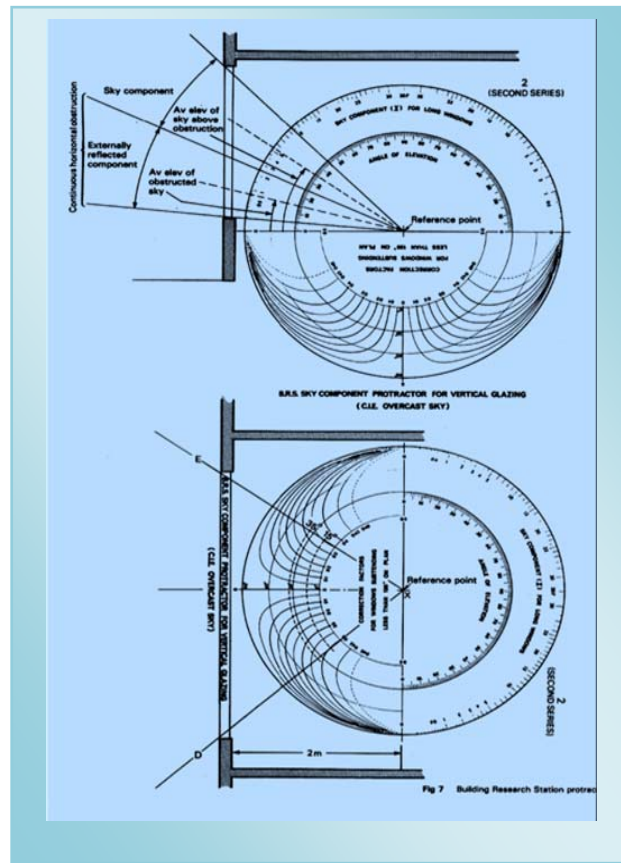


### 16.5 B.R.S. La determinación del componente del cielo directo en puntos específicos por medio de transportadores B.R.S. de luz natural

Los transportadores transparentes de luz natural se colocan sobre los planos. Un susodicho transportador primario contiene una escala de luz natural de la cual se puede obtener el componente directo. Un transportador auxiliar contiene una escala de factores de corrección, para ventanas de ancho determinado, para ángulos de abertura menor que 180° a partir del ángulo de referencia. Transportadores especiales contienen ambas escalas en un solo transportador. Existen numerosos juegos de transportadores para distintos tipos de cielo (nublado según la norma CIE, uniforme y cielos despejados), al igual que para distintos tipos de cristal (horizontal, vertical e inclinado). El principio en que se fundamenta este método es el ángulo solido proyectado. Esta herramienta es de muy fácil empleo, por lo que durante mucho tiempo fue uno de los principales instrumentos manuales de diseño de luz natural. Da resultados mucho más rápidamente que los correspondientes métodos de proyección en cuadrícula, pero, sin embargo, no puede utilizarse para obstrucciones exteriores de forma complicada. Para calcular los componentes de reflexión interna deben usarse otros métodos.

#### Ejemplo de aplicación

B.R.S. transportador del componente del cielo para una ventana vertical del CIE para cielo nublado



## 16.6 Estudio tipológico de los principales parámetros de luz natural

Esta herramienta proporciona información gráfica y numérica de manera rápida y accesible sobre la influencia de algunos de los principales parámetros sobre iluminación y sobre el aspecto visual de los espacios interiores. Se estudian muchos casos de distintos tipos, dimensiones, posiciones e inclinaciones de aberturas de luz natural. Se proporciona información gráfica que contiene isométricos de espacios, gráficas que ilustran la penetración solar directa para verano e invierno en los solsticios, al igual que visualizaciones fotorealísticas de espacios en prueba para días nublados. La visualización y características físicas numéricas seleccionadas (por ejemplo, Factor de Luz de Día cercano a la ventana, 3 m de la ventana, porción de la superficie con iluminación menor que el Factor de Luz de Día del 2%) se han utilizado para elaborar simulaciones empleando programas de cómputo muy usuales. La influencia que tienen las diversas aberturas de luz natural sobre la distribución de luz a medio espacio se relaciona con cada caso estudiado, y se incluyen evaluaciones sobre comodidad visual.

Se anexa no sólo información numérica sino también visual. Esto permite una rápida comprensión de la percepción visual de luz natural en espacios arquitectónicos. Se muestra el fuerte impacto que tienen modificaciones pequeñas de parámetros de diseño de luz natural tales como tamaño y ubicación de ventanas. Este estudio no tiene como intención proporcionar un análisis numérico profundo; más bien, debe considerarse como una guía de diseño para arquitectos y diseñadores de la construcción en las etapas tempranas del diseño arquitectónico.



Ejemplo de aplicación.

Arquitectura					
	Axonometría				
	Luz directa de invierno				
	Luz difusa				
	Io / C.c.	9.6%/90	24%/90	24%/0	60%/0
	Ventana	Centrada	Panorámica	Centro en altura	Total
	Energía	FLJ Máximo	22.2% a 0.5m	27.6% a 0.5m	28.4% a 0.5m
	Superficie < 2%	6/10	4/10	3/10	0/10
	FLJ a 3 m	1.03	2.26%	2.44%	5.66%
	Variación en % a 3m	+100%	+120%	+137%	+450%
Comodidad visual	Estación 1	1/14	1/10	1/7	1/6
		1/83	1/60	1/64	1/30
	Estación 2	1/14	1/10	1/13	1/10
		1/27	1/19	1/20	1/16



## 16.7 Análisis empleando modelos a escala para determinar el desempeño de luz natural de día

Suponiendo que las propiedades fotométricas de las superficies y de las aberturas transparentes para introducir luz natural se modelan correctamente, los edificios pueden reducirse en escala e investigarse de manera correcta fotométricamente bajo cielos y soles artificiales. A diferencia de modelos térmicos, acústicos y estructurales, no se requieren factores de corrección en los modelos de iluminación para tomar en cuenta los cambios de escala.

El empleo de cielos artificiales permite analizar distintas distribuciones de luminancia celeste. Se colocan sensores dentro de los modelos para rastrear iluminancias y/o luminancias. Se pueden obtener Factores de Luz de Día colocando un segundo sensor al exterior del modelo.

Además, soles artificiales permiten desarrollar un análisis de sombras y reflexión simulando sol directo para cada época del año.

Muchos arquitectos trabajan con modelos a escala y, muchos de estos modelos tienen como propósito mostrar las intenciones arquitectónicas más que una correcta evaluación fotométrica para el diseño de la iluminación. Sin embargo, algunos modelos o maquetas se prestan para usarse de manera directa, especialmente para medir el impacto de luz solar directa bajo cielos artificiales. Cielos y soles artificiales permiten llevar a cabo estudios paramétricos sencillos de manera rápida. Sin embargo, debe enfatizarse que el uso de modelos detallados puede ser muy costoso. Para tomar cambios en el diseño del edificio es necesario que el modelo o maqueta también contenga estos cambios. Para la mayor parte de la gente que se dedica a la construcción y al diseño no resulta práctica tener este tipo de herramientas.

### Ejemplo de aplicación

Ejemplo de un cielo artificial



Ejemplo de un sol artificial



## Institutos que cuentan con cielos y soles artificiales

Ciudad	Instituto	Cielo artificial	Sol artificial	Contacto
Austria	Bartenbach Lichtlabor	Si	Si	Lichtplanung Bartenbach Rinnerstraße 14, A-6071 Aldranz / Innsbruck
Alemania	Fraunhofer Institute for Building Physics	Si	Si	Fraunhofer Institute for Building Physics Dept. of Heat Technology, Nobelstr.12, D-70569 Stuttgart
	Technical University Berlin	Si	No	TU Berlin, Fakultät für Architektur, Straße des 17. Juni 152, Berlin
Gran Bretaña	BRE	Si	Si	Building Research Establishment, Lighting Section, Bucknalls Lane, UK-Garston, Watford WD27JR
	TNO	Si	Si	CBO-TNO-TUE Centre for Building Research P.O. Box 513 NL-MB Eindhoven
Suiza	EPFL - LESO	Si	Si	LESO-PB / EPFL, CH- 1015, Lausanne
Estados Unidos	LBNL	Si	Si	Lawrence Berkeley Laboratory, Window and Daylighting Group, Berkeley, CA 94720

### 16.8 Panorama de las herramientas anteriores

La siguiente tabla describe las herramientas de acuerdo a un conjunto de atributos que permite su selección según al problema a resolver.

General - En primera instancia, la tabla indica *la flexibilidad* en la aplicación de las diversas herramientas. *La aplicación* de algunas herramientas se restringe a características de orden *local*, tales como, clima o normas y reglamentos específicos, mientras que otras herramientas pueden utilizarse en cualquier lugar. Algunos instrumentos como el horizontoscopio, tienen aplicación global, sin embargo, se requieren, por ejemplo, tablas o gráficas que dependen de latitud. En tales casos se consideran los atributos de tipo *global* al igual que *local*.

Entrada - La información requerida para ingresar a los distintos métodos se caracteriza de acuerdo al tipo de *Cielo*, *Espacio Geométrico* y *Vanos*.

Salida - La clasificación de información de salida se subdivide en: tipo de método básico empleado; (puede ser un método de un solo paso, por lo que la herramienta proporciona el resultado deseado directamente o de si se requieren múltiples pasos para realizar los diferentes cálculos), y el tipo de datos de salida que se han de obtener.

Software - Se clasifica en hojas de cálculo y de acuerdo a sistemas operativos e interfaces gráficas.



## Bibliografía

American Institute of Architects. 1997. *AIA CAD Layer Guidelines*.  
American Institute of Architects.

ANSI S12.60-2002 Acoustical Performance Criteria, Design Requirements and  
Guidelines for Schools.

Brooks, Martha. 2002. *California Electricity Outlook: Commercial Building  
Systems*. Presentation at PIER Buildings Program HVAC Diagnostics  
Meeting, Oakland, CA on April 16.

CEC, 2003. *2005 Building Energy Efficiency Standards*, Standards for  
residential and Nonresidential buildings, Express Terms 45-Day Language  
Commission Proposed Standards, California

Advanced Lighting Technologies, Applications Guidelines: 1990, EPRI, CEC (EPRI TR-  
101022s).

Advanced Lighting Guidelines: 1993, EPRI, CEC and DOE.

Ander, Gregg D., *Daylighting Performance and Design*, Van Nostrand Reinhold, New York,  
1995.

Applications Manual: Window Design, the Chartered Institution of Building Services Engineers  
(CIBSE), London, 1987.

ASHRAE Applications Handbook, American Society of Heating, Refrigerating and Air-  
Conditioning Engineers, 1995.

ASHRAE Handbook of Fundamentals, American Society of Heating, Refrigerating, and Air-  
Conditioning Engineers, 1993.

Ballast, David, *The Architect's Handbook of Formulas, Tables, and Mathematical Calculations*.  
Prentice Hall, 1988.



Beltran, L.O., E.S. Lee, S.E. Selkowitz, "Advanced Optical Daylighting Systems: Light Shelves and Light Pipes," Proceedings of the 1996 IESNA Conference, Cleveland, OH. Bradshaw, V., Building Control Systems, Wiley and Sons, 1985.

Brown, G.Z., Sun, Wind and Light: Architectural Design Strategies, Wiley & Sons, 1985.

Bryan, H., "Seeing the Light," Progressive Architecture, September 1982.

Advanced Lighting Technologies, Applications Guidelines: 1990, EPRI, CEC (EPRI TR-101022s). Advanced Lighting Guidelines: 1993, EPRI, CEC and DOE.

Ander, Gregg D., Daylighting Performance and Design, Van Nostrand Reinhold, New York, 1995.

Applications Manual: Window Design, the Chartered Institution of Building Services Engineers (CIBSE), London, 1987.

ASHRAE Handbook of Fundamentals, American Society of Heating, Refrigerating, and Air-Conditioning Engineers, 1993.

Ballast, David, The Architect's Handbook of Formulas, Tables, and Mathematical Calculations, Prentice Hall, 1988.

Beltran, L.O., E.S. Lee, S.E. Selkowitz, "Advanced Optical Daylighting Systems: Light Shelves and Light Pipes," Proceedings of the 1996 IESNA Conference, Cleveland, OH. Bradshaw, V., Building Control Systems, Wiley and Sons, 1985.

Survey Simple Design Tools, International Energy Agency (IEA), Solar Heating and Cooling Programme Task 21 /, Energy Conservation in Buildings and Community, Systems Programme Annex 29: DAYLIGHT IN BUILDINGS Daylight factor prediction in atria building designs  
B. Calcagni, M. Paroncini

Dipartimento di Energetica, Universit\_a Politecnica delle Marche, Via Breccie Bianche 60100 Ancona, Italy Received 26 November 2002; received in revised form 22 January 2004; accepted 27 January 2004 Communicated by: Associate Editor Jean-Louis Scartezzini.