

**DISEÑO DEL SISTEMA DE ILUMINACIÓN BASADO EN TUBOS
REFLECTANTES PARA EL ÚLTIMO NIVEL DE LA REFORMA DEL EDIFICIO
DE LA E3T.**

DIEGO ALBERTO LUIS RINCÓN FLOREZ

**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
FACULTAD DE INGENIERÍAS FÍSICO-MECÁNICAS
ESCUELA DE INGENIERÍAS ELÉCTRICA, ELECTRÓNICA Y
TELECOMUNICACIONES
BUCARAMANGA**

2012

**DISEÑO DEL SISTEMA DE ILUMINACIÓN BASADO EN TUBOS
REFLECTANTES PARA EL ÚLTIMO NIVEL DE LA REFORMA DEL EDIFICIO
DE LA E3T.**

DIEGO ALBERTO RINCÓN FLOREZ

Trabajo de grado presentado como requisito para optar al título de
INGENIERO ELÉCTRICISTA

DIRECTOR:

Ing. MANUEL JOSE ORTIZ RANGEL

**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
FACULTAD DE INGENIERÍAS FÍSICO-MECÁNICAS
ESCUELA DE INGENIERÍAS ELÉCTRICA, ELECTRÓNICA Y
TELECOMUNICACIONES
BUCARAMANGA**

2012

CONTENIDO

	Pág.
INTRODUCCIÓN	21
1. FUNDAMENTOS Y CONCEPTOS BÁSICOS	22
1.1 GENERALIDADES.	22
1.2. DESCRIPCIÓN ESTRUCTURAL DEL OJO.	27
1.2.1. Formación de imágenes	29
1.2.2. Curva de sensibilidad del ojo	29
1.2.3. Acomodación	30
1.2.4. Contraste	31
1.2.5. Adaptación	31
1.2.6. Deslumbramiento	32
1.3. PROPIEDADES ÓPTICAS DE LA MATERIA.	33
1.3.1. Reflexión	33
1.3.1.1. Reflexión especular	34
1.3.2. Trasmisión	36
1.3.3. Absorción	37
1.3.4. Difracción	38
1.4. EL COLOR.	39
1.4.1. Temperatura de color	39
1.4.2 Índice de rendimiento de color (IRC)	40
1.4.3. Efectos psíquicos de los colores y su armonía	41
1.5. MAGNITUDES LUMINOSAS.	42
1.5.1. Flujo luminoso	42
1.5.2. Intensidad luminosa	43
1.5.3. Iluminancia	45
1.5.4. Luminancia	45

1.6. MARCO REGLAMENTARIO PARA ILUMINACIÓN DE INTERIORES.	47
1.6.1. Niveles de iluminación	48
1. CONTEXTUALIZACIÓN DEL PROYECTO.	49
2.1. UBICACIÓN GEOGRÁFICA DE COLOMBIA.	49
2.2. BUCARAMANGA.	50
2.2.1. Soleamiento	50
2.3. UBICACIÓN DEL PROYECTO.	51
3. SISTEMAS DE ILUMINACIÓN NATURAL.	54
3.1. INTRODUCCIÓN.	54
3.2. MATRIZ DE SISTEMAS.	56
3.2.1. Sistemas de iluminación natural con apantallamiento	57
3.2.2. Sistema de iluminación natural sin apantallamiento	57
3.2.3. Para tener en cuenta en la matriz de sistemas	58
3.3. LIGHT SHELVES.	65
3.3.1. Descripción técnica	66
3.3.2. Principios de funcionamiento	66
3.3.3. Aplicaciones	67
3.3.4. Control	68
3.3.5. Mantenimiento	68
3.3.6. Costos y ahorros de energía	68
3.4. REJILLAS Y PERSIANAS - “LOUVERS AND BLINDS SYSTEMS”	70
3.4.1. Descripción técnica	70
3.4.2. Principio de funcionamiento	70
3.4.3. Aplicaciones	71
3.4.4. Control	71
3.4.5. Mantenimiento	71
3.4.6. Costos y ahorros de energía	72
3.5. PÁNELES PRISMÁTICOS - “PRISMATIC PANELS”	72
3.5.1. Descripciones técnicas	72
3.5.2. Principios de funcionamiento	74

3.5.3. Aplicaciones	75
3.5.4. Control	77
3.5.5. Mantenimiento	77
3.5.6. Costos y ahorros de energía	78
3.6. PÁNELES CORTADOS POR LASER – “LASER CUT PANELS”	78
3.6.1. Descripción técnica	78
3.6.2. Principios de funcionamiento	79
3.6.3. Aplicaciones	80
3.6.4. Control	82
3.6.5. Mantenimiento	82
3.6.6. Costos y ahorro de energía	83
3.7. CLARABOYA DE ÁNGULO SELECTIVO - “ANGULAR SELECTIVE SKYLIGHT”	83
3.7.1. Descripción Técnica	84
3.7.2. Principio de funcionamiento	84
3.7.3. Aplicaciones	85
3.7.4. Control	85
3.7.5. Mantenimiento	85
3.7.6. Costos y ahorros de energía	86
3.8. “LIGHT- GUIDING SHADES”	86
3.8.1. Descripción técnica	86
3.8.2. Principios de funcionamiento	87
3.8.3. Control	88
3.8.4. Mantenimiento	88
3.8.5. Costos y ahorros de energía	88
3.9. “SUN DIRECTING GLASS”	89
3.9.1. Descripción técnica	89
3.9.2. Principios de funcionamiento:	90
3.9.3. Aplicaciones	91
3.9.4. Control	91

3.9.5. Mantenimiento	92
3.9.6. Costos y ahorros de energía	92
3.10. UNIDAD DE DOBLE ACRISTALAMIENTO CON ELEMENTOS ÓPTICOS HOLOGRÁFICOS PARA GUÍA DE LUZ CENITAL	92
3.10.1. Descripción técnica	92
3.10.2. Principio de funcionamiento	93
3.10.3. Aplicaciones	94
3.10.4. Control	94
3.10.5. Mantenimiento	94
3.10.6. Costos y ahorro de energía	94
3.11. SISTEMA DE APANTALLAMIENTO SELECTIVO DIRECCIONAL USANDO ELEMENTOS ÓPTICOS HOLOGRÁFICOS (HOES)	94
3.11.1. Descripción Técnica	95
3.11.2. Principios de funcionamiento	96
3.11.3. Aplicaciones	98
3.11.4. Control	98
3.11.5. Mantenimiento	98
3.11.6. Costos y ahorro de energía	99
3.12. “ANIDOLIC CEILINGS”	99
3.12.1. Descripción técnica	99
3.12.2. Principios de funcionamiento	100
3.12.3. Aplicaciones	102
3.12.4. Control	103
3.12.5. Mantenimiento	103
3.12.6. Costos y ahorros de energía	103
3.13. ANIDOLIC ZENITHAL OPENINGS (ABERTURAS CENITALES ANIDOLICAS)	105
3.13.1. Descripción técnica	105
3.13.2. Principio de funcionamiento	107
3.13.3. Aplicaciones	108

3.13.4. Control	108
3.13.5. Mantenimiento	108
3.13. 6. Costos y ahorro de energía	108
3.14. TUBOS SOLARES - “SOLAR TUBE”	110
3.14.1. Descripción Técnica	110
3.14.2. Principio de funcionamiento	112
3.14.3. Aplicaciones	114
3.14.4. Control	114
3.14.5. Mantenimiento:	115
3.14.6. Costos y ahorros de energía	115
4. DISEÑO.	116
4.1. REQUISITOS GENERALES PARA EL DISEÑO DE ILUMINACIÓN.	116
4.2. OFERTA TECNOLÓGICA DOMOS TUBULARES.	120
4.2.1. Monodraught	120
4.2.2. Solatube	126
4.2.3. Velux	130
4.3. TIPO DE LUMINARIA.	132
4.3.1. Domo o Burbuja	132
4.3.2. “Dome Ring”	133
4.3.3. “Flashing o Base”	133
4.3.4. Tubos de Extensión Reflexivos	134
4.3.5. “Ceiling Ring”	134
4.3.6. Ensamblado de Difusor	134
4.3.7. Accesorios	135
4.4. FOTOMETRÍA Y SOFTWARE PARA DISEÑO.	139
4.5. DEFINICIÓN TOPOLÓGICA DE ESPACIOS.	142
4.5.1. Calculo de número de luminarias por recinto.	143
4.6. RESUMEN NÚMERO DE LUMINARIAS.	156
4.7. PRESUPUESTO DE INVERSIÓN.	156
5. CONCLUSIONES GENERALES DEL PROYECTO	160

BIBLIOGRAFÍA

163

ANEXOS

164

LISTA DE ECUACIONES

	Pág.
Ecuación 1.Frecuencia onda sinusoidal	23
Ecuación 2.Velocidad de propagación de ondas sinusoidales	23
Ecuación 3.Coeficiente de contraste objeto-superficie	31
Ecuación 4. Ley de Snell	39
Ecuación 5. Intensidad luminosa	44
Ecuación 6. Iluminancia	45
Ecuación 7. Luminancia de una superficie.	46
Ecuación 8. Coeficiente de luz diurna	118

LISTA DE FIGURAS

	Pág.
Figura 1. Clasificación del espectro visible.	24
Figura 2. Constitución del ojo humano.	28
Figura 3. Símil de formación de imágenes en el cerebro.	29
Figura 4. Reflexión especular.	34
Figura 5. Reflexión compuesta.	35
Figura 6. Reflexión difusa.	35
Figura 7. Reflexión mixta.	36
Figura 8. Transmisión regular.	36
Figura 9. Transmisión difusa.	37
Figura 10. Refracción en el límite de dos medios.	38
Figura 11. Color de cuerpo negro en función de la temperatura.	40
Figura 12. Estéreo radian	43
Figura 13. Representación de candela (Indalux, 2002)	44
Figura 14. Luminancia de una superficie.	46
Figura 15. Ubicación edificio ingeniería eléctrica	51
Figura 16. Ubicación edificio reforzado ingeniería eléctrica	52
Figura 17. Plataforma de luz - “Ligth shelves”	65
Figura 18. Plataforma de luz para diferentes posiciones y condiciones climáticas	67
Figura 19. Plataforma de luz semi-reflectiva inclinada sobre la fachada de una edificación.	69
Figura 20. Vista interior de una Plataforma de luz	69
Figura 21. Rejillas y persianas	70
Figura 22. Páneles prismáticos - “Prismatic panels”	72

Figura 23. Páneles prismáticos disponibles para diferentes ángulos de incidencia	73
Figura 24. Sección transversal de un panel prismático lineal	74
Figura 25. Aplicación páneles prismáticos luz natural difusa.	75
Figura 26. Aplicación páneles prismáticos luz directa	76
Figura 27. Sistema fijo de panel prismático	76
Figura 28. Sistema móvil de panel prismático	77
Figura 29. Páneles cortados por laser	78
Figura 30. Ventana con doble acristalamiento y LCPs	81
Figura 31. Páneles cortados por laser en una ventana articulada (parte superior de la figura)	81
Figura 32. Páneles cortados por laser en disposición de persianas venecianas.	82
Figura 33. Claraboya de ángulo selectivo	83
Figura 34. Claraboya con ángulo selectivo.	85
Figura 35. "Light guiding shade"	86
Figura 36. "Sun directing glass"	89
Figura 37. Sección vertical	90
Figura 38. Sección horizontal	91
Figura 39. "Zenithal light guiding glass".	92
Figura 40. Ejemplo de aplicación de un sistema "zenithal lighth guiding glass".	93
Figura 41. Directional selective shading systems using holographic optical elements	95
Figura 42. Sistema concentrador de luz solar.	97
Figura 43. "Anidolic ceilings"	99
Figura 44. Esquema en dos dimensiones de un sistema anidolico no simétrico	101
Figura 45.. Monitoreo consumo de energía para sistema convencional vs "anidolic ceiling".	104

Figura 46. Anidolic zenithal openings	105
Figura 47. Sector de admisión para un “anidolic zenithal openings”	106
Figura 48. Sección transversal de un “anidolic zenithal openings”	107
Figura 49. Tubo solar	110
Figura 50. Domo o zona de captación	111
Figura 51. Zona de transferencia	111
Figura 52. Sistema domos tubulares integrado	112
Figura 53. Composición espectral luz natural día.	119
Figura 54. Equivalencia sunpipe 300 mm de diámetro y bombillas tradicionales acorde a condiciones climáticas.	126
Figura 55. Detalle Solatube 160DS.	138
Figura 56. Detalle Solatube 290 DS.	138
Figura 57. Herramienta de software para diseños luminotécnicos	142
Figura 58. Esquema de distribución de espacios para último nivel reforma E3T	143

LISTA DE GRÁFICAS

	Pág.
Gráfica 1. Ejemplo de espectro continuo.	25
Gráfica 2. Ejemplo de espectro discontinuo.	26
Gráfica 3. Curva de sensibilidad del ojo a las radiaciones monocromáticas.	30
Gráfica 4. Deslumbramiento en función del ángulo.	32
Gráfica 5. Ubicación geográfica de Colombia.	49
Gráfica 6. Fracción de luz desviada versus elevación de luz incidente de un panel vertical cortado por laser para tres relaciones (D/W).	80

LISTA DE TABLAS

	Pág.
Tabla 1. IRC para diferentes fuentes de luz.	41
Tabla 2. Porcentajes de días soleados y nublados para Bucaramanga.	51
Tabla 3. Matriz de sistemas con apantallamiento	60
Tabla 4. Matriz de sistemas con apantallamiento	61
Tabla 5. Matriz de sistemas con apantallamiento	62
Tabla 6. Matriz de sistema sin apantallamiento	62
Tabla 7. Matriz de sistemas sin apantallamiento	63
Tabla 8. Matriz de sistemas sin apantallamiento incluido.	64
Tabla 9. Matriz de sistemas sin apantallamiento.	65
Tabla 10. "Daylight autonomy" para 3 sistemas de iluminación natural.	109
Tabla 11. Operación sistemas monodraught en diferentes condiciones climáticas	125
Tabla 12. Salida de lúmenes para Solatube 290 DS.	140
Tabla 13. Salida de lúmenes para Solatube 160 DS.	141
Tabla 14. Resumen de resultados condiciones promedio oficina 1.	144
Tabla 15. Resumen de resultados condiciones promedio oficina 2.	144
Tabla 16. Resumen de resultados condiciones promedio oficina 3	145
Tabla 17. Resumen de resultados condiciones promedio oficina 4	146
Tabla 18. Resumen de resultados condiciones promedio oficina 5.	147
Tabla 19. Resumen de resultados condiciones promedio oficina 6.	147
Tabla 20. Resumen de resultados condiciones promedio oficina 7.	148
Tabla 21. Resumen de resultados condiciones promedio oficina 8.	149
Tabla 22. Resumen de resultados condiciones promedio oficina 9.	150
Tabla 23. Resumen de resultados condiciones promedio oficina 10.	150
Tabla 24. Resumen de resultados condiciones promedio oficina 11.	151

Tabla 25. Resumen de resultados condiciones promedio oficina 12.	152
Tabla 26. Resumen de resultados condiciones promedio pasillo 1	153
Tabla 27. Resumen de resultados condiciones promedio pasillo 2	154
Tabla 28. Resumen de resultados condiciones promedio pasillo 4.	155
Tabla 29. Resumen de resultados condiciones promedio pasillo 5.	155
Tabla 30. Resumen luminarias.	156
Tabla 31. Precios por unidad de sistemas Solatube 290 DS.	157
Tabla 32. Precios por unidad del sistema Solatube 290 DS	158
Tabla 33. Presupuesto de inversión a todo costo.	159
Tabla 34. Cuadro de cargas iluminación de respaldo	164

LISTA DE ILUSTRACIONES

	Pág.
Ilustración 1. Aplicación de sistema ABS 350.	121
Ilustración 2. Apariencia exterior del sistema integrado Sola Vent.	122
Ilustración 3. Apariencia interna del sistema Sola Vent.	122
Ilustración 4. Panel solar fotovoltaico sistema Sola Vent.	123
Ilustración 5. Sistema Diamond dome.	124
Ilustración 6. Tecnología "Light Traker" Solatube.	127
Ilustración 7. Tecnología Raybender 3000.	128
Ilustración 8. Sola Máster 330 DS C.	129
Ilustración 9. Sola master DS O.	130
Ilustración 10. Túnel Solar rígido	131
Ilustración 11. Tunel solar flexible.	131

TITULO: DISEÑO DE ILUMINACION BASADO EN TUBOS REFLECTANTES PARA EL ÚLTIMO NIVEL DE LA REFORMA DEL EDIFICIO DE LA E3T *.

AUTOR:

DIEGO ALBERTO LUIS RINCON FLOREZ **

PALABRAS CLAVES:

Sistemas, iluminación natural, diseño, tubos solares, desarrollo, presupuesto, metodología, reforma E3T, calentamiento global, Retilap.

La Universidad Industrial de Santander, como muestra de su compromiso con el cambio hacia un nuevo desarrollo que propicie la sostenibilidad ambiental, avala a través de la Escuela de Ingeniería Eléctrica, Electrónica y Telecomunicaciones proyectos que hagan posible un escenario donde las energías renovables sean protagonistas.

Uno de los componentes que hace posible el desarrollo de nuevas edificaciones sostenibles es el sistema de iluminación. Este proyecto expone los diferentes sistemas de iluminación natural, al igual que las descripciones técnicas al detalle de cada uno de ellos y algunos consejos clave del proceso de toma de decisión para la elección de sistemas de iluminación natural.

El principal propósito de este proyecto es elaborar un diseño basado en tubos solares, además de proporcionar una metodología para el diseño, también se presenta la oferta tecnológica disponible de dicho sistema y el presupuesto asociado al diseño propuesto. La reforma del edificio de ingeniería eléctrica E3T ha marcado el camino para proyectos con este enfoque y se perfila como vitrina en donde la sociedad pueda corroborar los diferentes resultados arrojados por proyectos que proporcionen soluciones alternativas a esa problemática mundial conocida como Calentamiento Global.

En la actualidad no existe reglamentación para los diseños de iluminación natural, de esta manera el diseño elaborado es enmarcado dentro del reglamento de iluminación vigente, RETILAP.

* Proyecto de grado.

** Facultad de Ingenierías Físico-Mecánicas. Escuela de Ingeniería Eléctrica, Electrónica y Telecomunicaciones. Director Ingeniero Manuel José Ortiz Rangel.

TITLE: LIGHTING DESIGN REFLECTIVE TUBES BASED FOR THE LAST LEVEL REFORM BUILDING E3T *.

AUTHOR:

DIEGO ALBERTO LUIS RINCON FLOREZ **

KEYWORDS:

Systems, natural lighting, design, solar tubes, development, budget, methodology, E3T reform, global warming, Retilap.

The Industrial University of Santander, to show their commitment to change towards a new development that promotes environmental sustainability, supports through the School of Electrical Engineering, Electronics and Telecommunications projects that enable a scenario where renewables are protagonists.

One component that makes possible the development of sustainable buildings is the new lighting system. This project exposes the different day lighting systems, as well as technical descriptions in detail of each of them and some key tips from the decision making process for the election of day lighting systems.

The main purpose of this project is to develop a design based on solar tubes and to provide a methodology for the design. It also presents the available technology offered by the system and the budget associated with the proposed design. The reform of the electrical engineering building E3T has paved the way for projects with this approach and is profiled as a showcase in which society can corroborate the results obtained from different projects to provide alternative solutions to this global problem known as global warming.

At present, there is no regulation for natural lighting designs, so the elaborated design is framed within the lighting regulations in force, RETILAP.

*Research Project

** Faculty of Physical-Mechanical Engineering. School of Electrical Engineering, Electronics and Telecommunications. Chief Engineer Jose Manuel Ortiz Rangel.

INTRODUCCIÓN

El presente proyecto constituye un aporte a los sistemas de iluminación de edificaciones, ya que comprende la caracterización y el diseño de un sistema de iluminación basado en la radiación producida por el sol. Los propósitos son consistentes con el esfuerzo de incorporar en el diseño de edificaciones los componentes que propicien el desarrollo sostenible y la responsabilidad social de las empresas. La solución propuesta se basa en tubos reflectantes solares, le permitió al autor incorporar y aplicar el conocimiento disponible de los sistemas de iluminación natural, de acuerdo a los requisitos del reglamento técnico de iluminación y alumbrado público vigente.

El desarrollo sostenible debe trascender de la retórica propia de las grandes cumbres climáticas hacia escenarios donde las aplicaciones y la tecnología existente hagan realidad el compromiso y la búsqueda de aspectos prácticos y cotidianos. En este propósito se han revisado las ofertas tecnológicas disponibles, y de acuerdo a la información técnica suministrada se han ejecutado las etapas del diseño, incluyendo la simulación de diversas alternativas en escenarios basados en la información arquitectónica disponible.

1. FUNDAMENTOS Y CONCEPTOS BÁSICOS

1.1 GENERALIDADES.

En una fuente que irradia energía se puede afirmar que la propagación de la energía se hace por medio de ondas. Ondas que no son más que perturbaciones físicas que se propagan a través de un medio material elástico o en el vacío. Dos claros ejemplos de medios en los cuales se propaguen las ondas son el aire y el vacío, en estos medios se propagan el sonido y la luz respectivamente.

En este estudio se considerará la propagación de las ondas en forma periódica, es decir, que se repite a intervalos regulares de tiempo, además de esto la forma de la onda representa las oscilaciones en las cuales la magnitud física es función periódica de una variable independiente (el tiempo), a este tipo de ondas se les llama funciones sinusoidales y a partir de su estudio se pueden determinar diferentes características de un conjunto muy amplio de fenómenos físicos.

A continuación haremos un breve repaso sobre este tipo de ondas.

Las principales características de este tipo de ondas son:

La longitud de onda (λ): Esta definida como la distancia recorrida por la onda en el intervalo de tiempo transcurrido entre sus dos máximos consecutivos o entre dos puntos cualesquiera que se encuentren en la misma fase. [m]

Periodo (T): Tiempo que tarda la onda en realizar un ciclo.[s]

Frecuencia (f): Es el número de periodos que se repiten en determinado tiempo. Está dado por:

Ecuación 1.Frecuencia onda sinusoidal

$$f = \frac{1}{T} \text{ (s}^{-1}\text{)};$$

T : Periodo (seg).

La velocidad de propagación de este tipo de ondas está determinada por el tiempo que tarda la onda en recorrer una distancia determinada, de acuerdo a los parámetros expuestos la velocidad esta dado por:

Ecuación 2.Velocidad de propagación de ondas sinusoidales

$$v = \frac{\lambda}{T} \left(\frac{\text{m}}{\text{seg}} \right);$$

λ : Longitud de onda (m).

T : Periodo (seg).

La frecuencia de una onda de este tipo está determinada por la velocidad de propagación y por la longitud de onda. En ondas electromagnéticas la frecuencia es fija e independiente del tiempo y constituye una característica muy importante para la clasificación de ondas electromagnéticas.

La velocidad de propagación depende del tipo de onda, de la elasticidad del medio y de su rigidez. El sonido, por ejemplo, se propaga en el aire a una temperatura de 20 °C a 343.5 m/seg, la velocidad de las ondas electromagnéticas en el vacío es de 300 000 km/seg o 3×10^8 m/seg.

Dado que las ondas electromagnéticas son de la misma naturaleza y se propagan en el vacío, todas lo hacen a la misma velocidad, diferenciándose por la longitud de onda característica; como se indica en la ecuación 2, cuando la velocidad es

constante la frecuencia está determinada por la longitud de onda. En consecuencia, las ondas electromagnéticas se clasifican en una amplia variedad de frecuencias tales como: rayos gama, rayos X, radiación ultravioleta, rayos infrarrojos, microondas, ondas de radio, luz, entre otros. El ojo humano es sensible a la franja del espectro de frecuencia comprendido entre 380 nm y 780 nm, lo cual hace imposible observar los demás tipos de ondas electromagnéticas. La figura 1 presenta el esquema de los diferentes tipos de luz.

Figura 1. Clasificación del espectro visible.

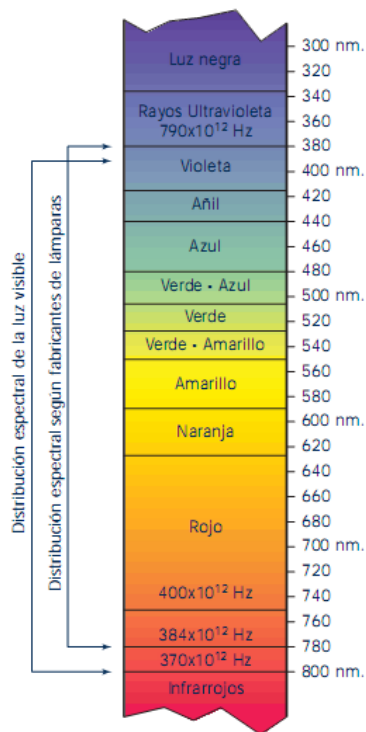


Imagen tomada de: Curso de luminotecnia, Indalux, 2002

Esta clasificación del espectro indica que luz roja corresponde a la longitud de onda más larga y la luz violeta a la longitud de onda más corta, de esta manera se definen conceptos como ondas infrarrojas y rayos ultravioleta.

Los espectros de radiación determinan la distribución de potencia en las diferentes longitudes de onda. Estos espectros de radiación dependen del tipo de fuente, existen espectros continuos y discontinuos. Los espectros continuos provienen de cualquier cuerpo que se encuentre a una temperatura diferente a cero grados Kelvin, a este tipo radiación se le llama incandescencia y corresponde por ejemplo a la luz producida por la combustión de una vela o el filamento de la lámpara de incandescencia (fuente más común de luz artificial). Los espectros discontinuos provienen de energía radiante de una fuente de descarga gaseosa como la de vapor de sodio, vapor de mercurio etc. Estos gases emiten una radiación integrada en pequeños intervalos de longitud de onda que se denominan picos de emisión. Cada gas posee una longitud de onda característica de su radiación, que depende de la composición molecular del gas a través del cual tiene lugar la descarga. Este tipo de descarga es denominada comúnmente como luminiscencia y se caracteriza porque su radiación no depende de la temperatura; un ejemplo de luminiscencia se encuentra en los tubos fluorescentes y los de vapor de mercurio. Las gráficas 1 y 2 muestran ejemplos de distribuciones espectrales continuas y discontinuas.

Gráfica 1. Ejemplo de espectro continuo.

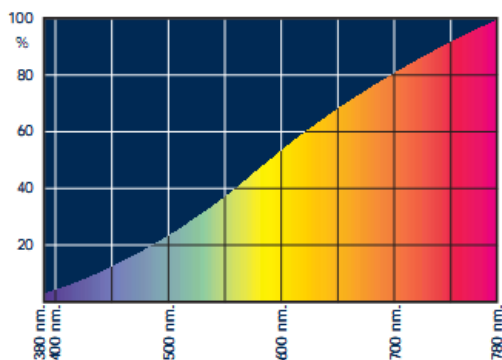


Imagen tomada de: Curso de luminotecnia, Indalux, 2002

Gráfica 2. Ejemplo de espectro discontinuo.

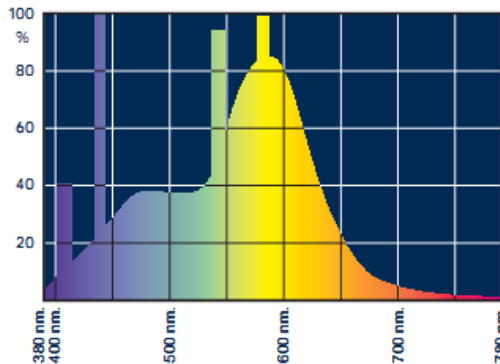


Imagen tomada de: Curso de luminotecnia, Indalux, 2002

El estudio de la luz como fenómeno físico ha sido una gran intriga en la historia de la humanidad, en un principio se pensó que la luz era emitida por el ojo, sin embargo, posteriormente se descubrió que la luz provenía de los objetos visibles, y se empezaron a desarrollar distintas teorías, de las cuales las aceptadas por la comunidad científica son:

- La Teoría Corpuscular
- La Teoría Ondulatoria

Uno de los principales proponentes de la teoría corpuscular fue el científico Isaac Newton quien por medio de esta pudo explicar dos de los fenómenos producidos por la luz (reflexión y refracción). Uno de estos fenómenos lograba explicarlo formulando la hipótesis de que la luz se desplaza más rápido en el agua y en el vidrio que en el aire; tiempo después esta hipótesis fue refutada por el mismo y la teoría dejó de tener validez por un tiempo. Por el contrario, otro científico llamado Christian Huygens logró explicar uno de estos fenómenos formulando una hipótesis diferente a la del científico Isaac Newton, se basó en el postulado que la luz se desplazaba a menor velocidad en el agua y en el vidrio que en el aire. Posteriormente se terminó por aceptar que la luz posee una doble naturaleza

debido a que por un lado la teoría ondulatoria logra explicar la propagación de la luz y por otro la teoría corpuscular la interacción de la luz con la materia.

Para lograr el proceso de iluminación son necesarios tres agentes: el primero tiene relación directa con la fuente de luz, el segundo con el objeto a iluminar que se desea hacer visible y por último el órgano encargado de recibir la información luminosa para transformarla en imágenes que son enviadas al cerebro para su interpretación.

A continuación se presentará una breve descripción de conceptos y algunos comportamientos del sentido de la vista.

1.2. DESCRIPCIÓN ESTRUCTURAL DEL OJO.

La figura 2 presenta las partes que constituyen el ojo humano. Los elementos señalados en la figura poseen funciones indispensables para su correcto funcionamiento, los cuales se describen a continuación:

- a) Humor vítreo: ayuda a mantener la forma del ojo y conseguir una superficie de la retina uniforme, para que la recepción de las imágenes sea nítida. (wikipedia)
- b) Córnea: recibe y transmite las impresiones visuales y constituye el componente óptico refractor fundamental del ojo. (Indalux, 2002)
- c) Iris: es una lámina circular situada frente al cristalino y es muy pigmentada. Puede contraer la pupila controlando la cantidad de luz que llega al cristalino.
- d) Pupila: es un orificio circular controlado por el iris y regula la cantidad de luz que pasa al cristalino.
- e) Cristalino: es una lente biconvexa transparente e incolora situada detrás del iris. Gracias a la membrana elástica que la compone cambia su forma para permitir el enfoque.
- f) Retina: es la película interna posterior del ojo constituido por una membrana nerviosa, que actúa como una expansión del nervio óptico y tiene la función de

recibir y transmitir imágenes o impresiones visuales. Contiene una capa muy delgada de células fotosensibles, conos y bastones, que divergen del nervio óptico y que están en la parte externa próximas a la capa pigmentada. (Indalux, 2002)

- g) Conos: son células fotosensibles de la retina o foto receptores que se encuentran principalmente en la fovea. Son muy sensibles a los colores y casi insensibles a la luz, de ahí que cumplan la función de discriminar los detalles finos y la de percibir los colores. (Indalux, 2002)
- h) Bastones o bastoncillos: son células fotosensibles de la retina o foto receptores que se encuentran sólo fuera de la fovea y más concentrados en la periferia. Son muy sensibles a la luz y al movimiento, y casi insensibles al color, de ahí que la misión de los bastones sea la de percibir la mayor o menor claridad como están iluminados los objetos. (Indalux, 2002)

Figura 2. Constitución del ojo humano.

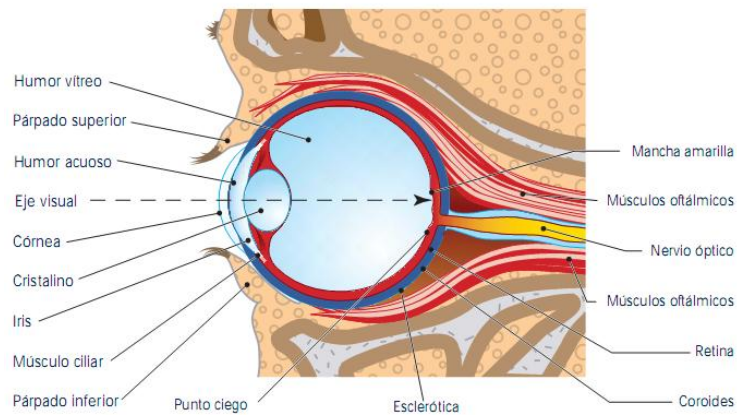


Imagen tomada de: Curso de luminotecnia, Indalux, 2002

La definición y las funciones de los dos últimos organelos mencionados, conos y bastones, están directamente relacionados con dos tipos de visiones percibidas por el ojo, una de ellas es la visión *escotópica*. Este tipo de visión se percibe en ausencia de luz debido a que en dicho momento los únicos organelos que funcionan son los bastones, puesto que, son los más sensibles a la cantidad de

luz y a los objetos en movimiento. Cuando un objeto se expone a la presencia de luz día, los colores y los objetos se ven con precisión debido a que en dicho momento los dos organelos ejecutan sus funciones, sin embargo, los colores, hacen que los objetos se vean con mejor definición, a este tipo de visión se le denomina *visión fotópica*. En conclusión, los bastones son sensibles a la intensidad de la luz y los conos son sensibles a la frecuencia de la luz.

1.2.1. Formación de imágenes: Los rayos luminosos que parten desde los objetos iluminados o con luz propia atraviesan la cornea y el humor acuoso. El iris posee una abertura conocida como pupila, que controla la cantidad de luz que se refracta en el cristalino para incidir finalmente en la retina, en donde el pigmento fotosensible registra las imágenes invertidas y mucho más pequeñas de lo normal. Una vez las imágenes son recibidas y formadas en la retina se envían al cerebro a través del nervio óptico. A manera de analogía se presenta el símil con una cámara fotográfica.

Figura 3. Símil de formación de imágenes en el cerebro.

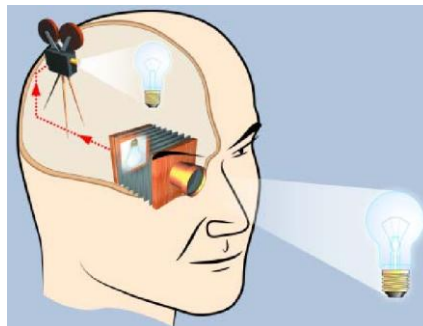


Imagen tomada de: Curso de luminotecnia, Indalux, 2002

1.2.2. Curva de sensibilidad del ojo: La curva de sensibilidad del ojo fue construida con base en experimentos realizados con seres humanos. El experimento consistió en proyectar a los ojos de dichas personas luz de diferentes

longitudes de ondas (espectro visible) con una energía igual a la de la luz blanca en un día soleado. El experimento arrojó la curva de la gráfica 3.

Gráfica 3. Curva de sensibilidad del ojo a las radiaciones monocromáticas.

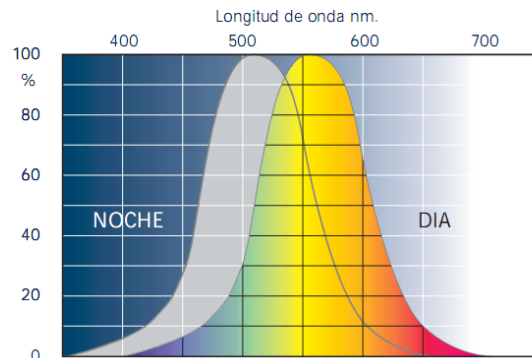


Imagen tomada de: Curso de luminotecnia, Indalux, 2002

La curva de sensibilidad muestra que el ojo durante el día es más sensible a la luz con una longitud de onda de 555 nm (visión fotópica), mientras que en la noche, cuando el ojo cambia a visión escotópica, la curva muestra mayor sensibilidad a los colores azul y violeta. De esta forma en un lugar bien iluminado durante el día se aprecia el realce de los colores naranja y rojo y durante la noche, o en condiciones de baja iluminación, realzan el violeta y el azul.

1.2.3. Acomodación: Este término hace referencia a la capacidad que tiene el cristalino para formar imágenes nítidas en la retina. Como se mencionó anteriormente, el cristalino es una lente biconvexa que puede cambiar su curvatura (músculos ciliares), si los objetos están más cerca del ojo la curvatura es mayor que cuando los objetos se encuentran a mayor distancia. La acomodación o el enfoque se hace mejor con un alto nivel de iluminación, puesto que, cuando esto ocurre la pupila deja pasar menos luz y los objetos pueden ser visualizados a diferentes distancias con un alto grado de nitidez. Lo equivalente a este efecto se llama profundidad de campo en las cámaras fotográficas.

1.2.4. Contraste: Cuando existe una buena iluminación el ojo puede percibir los diferentes colores sin ningún inconveniente, por el contrario ante la presencia de una iluminación escasa la diferencia de luminancias entre el objeto y su superficie más cercana juegan un papel muy importante en la percepción de los objetos, a esta diferencia de luminancias se le llama contraste y está definida por la ecuación 3.

Ecuación 3. Coeficiente de contraste objeto-superficie

$$k = \frac{l_o - l_f}{l_f} ;$$

l_o = luminancia del objeto.

l_f = luminancia de fondo.

Los valores de k entre cero e infinito representan contrastes positivos y los valores negativos de k representan malos contrastes.

Existe un concepto asociado al mínimo contraste de luminancias que puede ser percibido por el ojo humano correspondiente a un valor para $k=0.01$, este concepto es llamado sensibilidad al contraste y es el inverso de k, se denota con la letra G, ahora $G = 1/k$ y su valor para $k = 0.01$ es $G = 100$.

1.2.5. Adaptación: La función principal de la pupila es controlar la cantidad de luz de forma automática en el ojo, así pues, cuando la intensidad de luz es demasiado baja la pupila se dilata aproximadamente hasta 8 mm, de otro modo si existen buenos niveles de iluminación la pupila se contrae hasta aproximadamente 2 mm. Esta apertura o cierre de la pupila tiene diferentes tiempos, es decir, “cuando se pasa de un local con mucha iluminación a otro completamente a oscuras, el ojo se

ve sometido a un proceso de adaptación para cuyo ajuste total necesita aproximadamente 30 minutos, por otro lado, si se pasa de un local a oscuras a otro con mucha iluminancia, dicho periodo es de unos pocos segundos”. (Indalux, 2002)

1.2.6. Deslumbramiento: El deslumbramiento es un fenómeno de la visión que produce molestia o disminución en la capacidad para distinguir objetos, este fenómeno puede ser producido por una inadecuada distribución de luminancias o como consecuencia de contrastes excesivos. Este fenómeno actúa sobre la retina insensibilizándola durante cierto intervalo de tiempo, puesto que se produce una enérgica reacción fotoquímica.

El deslumbramiento puede originarse a través de fuentes luminosas que se encuentren dentro de cierto rango en el campo visual (lámparas, ventanas, luminarias) o puede producirse por la reflexión de la luz sobre superficies especulares (superficies con alta reflectancia como metal pulido o espejos).

El deslumbramiento proviene de fuentes luminosas y depende del ángulo formado entre el plano de trabajo y la línea que une la fuente luminosa con el ojo. La gráfica 4 ilustra el deslumbramiento en función del ángulo descrito anteriormente.

Gráfica 4. Deslumbramiento en función del ángulo.

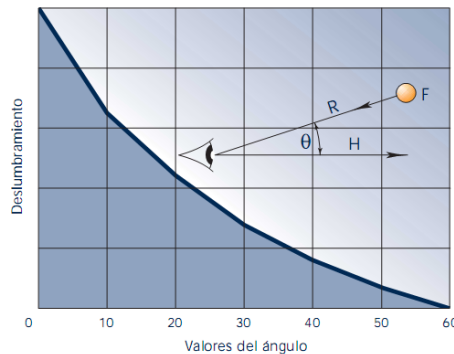


Imagen tomada de: Curso de luminotecnia, Indalux, 2002

El valor mínimo admisible para evitar el deslumbramiento es de 30 grados.

Es aconsejable no colocar cerca al plano de trabajo superficies que no sean completamente mates, pues estas podrían causar deslumbramiento por reflexión incluso si la fuente no posee una alta luminancia.

1.3. PROPIEDADES ÓPTICAS DE LA MATERIA.

Cuando un rayo de luz se propaga por un medio y alcanza el límite que lo separa de un segundo medio puede suceder: que parte de la luz retorne al primer medio (reflexión), que lo atraviese o que ingrese al segundo, donde parte de su energía cambie (absorción) o que parte de su energía no cambie (trasmisión). (Indalux, 2002)

Los fenómenos descritos anteriormente pueden ocurrir de forma simultánea de manera que la energía incidente corresponde a la suma de la energía reflejada, la energía absorbida y la energía transmitida.

La aplicación de la luz en su forma más conveniente exige un control y una distribución, que se consigue modificando sus características a merced de los fenómenos de reflexión, absorción y trasmisión de la luz, sin olvidarse de un cuarto fenómeno conocido como refracción.

1.3.1. Reflexión: Cuando una onda incide sobre una barrera plana como en el caso de un espejo, se generan nuevas ondas que se mueven alejándose de la frontera. Este fenómeno es conocido como reflexión.

Cuando la luz es reflejada por una superficie, parte de ella es absorbida por la superficie y el resto es reflejada, la relación entre la luz reflejada y la luz incidente es conocida como reflectancia de la superficie.

La luz puede ser reflejada de distintas maneras dependiendo del tipo de superficie, las distintas clases de reflexión que se pueden obtener son mostradas a continuación.

1.3.1.1. Reflexión especular: Se produce cuando la superficie es completamente lisa. La principal característica de este tipo de reflexión es que los rayos incidentes y los rayos reflejados pertenecen al mismo plano; el rayo incidente y los rayos reflejados forman el mismo ángulo con la superficie. La siguiente figura muestra este tipo de reflexión.

Figura 4. Reflexión especular.

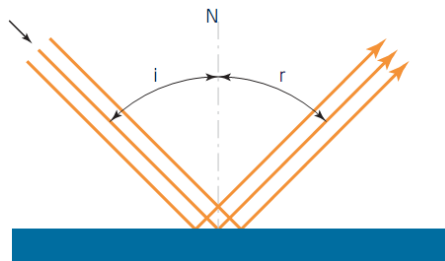


Imagen tomada de: Curso de luminotecnia, Indalux, 2002

1.3.1.2. Reflexión compuesta: En este tipo de reflexión el rayo reflejado de mayor intensidad posee el mismo ángulo del rayo incidente

Figura 5. Reflexión compuesta.

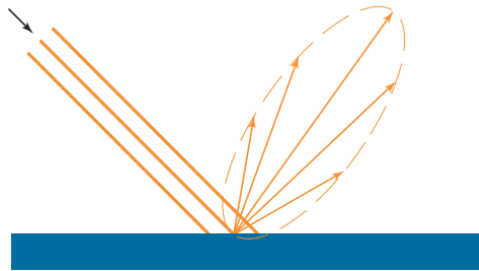


Imagen tomada de : Curso de luminotecnia, Indalux , 2002

1.3.1.3. Reflexión difusa: se produce cuando la luz que incide sobre una superficie es reflejada en toda las direcciones, siendo el rayo normal a la superficie el de mayor intensidad. Este tipo de reflexiones se da en papel blanco mate y paredes.

Figura 6. Reflexión difusa.



Imagen tomada de : Curso de luminotecnia, Indalux , 2002

1.3.1.4. Reflexión mixta: Es un tipo de reflexión intermedia entre la especular y la difusa, debido a que, parte de los rayos se reflejan y parte se difunden. Las superficies que presentan este tipo de reflexiones pueden ser, por ejemplo, metales no pulidos, papel brillante y superficies barnizadas.

Figura 7. Reflexión mixta.

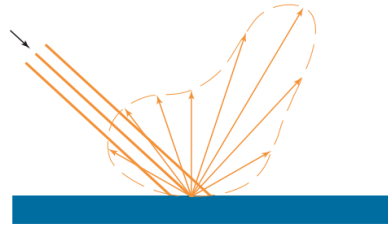


Imagen tomada de: Curso de luminotecnia, Indalux , 2002

1.3.2. Trasmisión: Es un paso de la radiación a través de un medio sin cambio de frecuencia en las radiaciones monocromáticas que la componen. Este tipo de fenómeno es característico de ciertos tipos de vidrios, cristales, agua, el aire y otros líquidos.

Cuando la luz atraviesa el material parte de esta se refleja, otra parte es absorbida y el resto de la luz es transmitida a través del material. La relación entre la luz incidente y la luz transmitida es conocida como transmitancia del material.

Existen tres tipos de transmisión conocida:

1.3.2.1. Transmisión regular: En este tipo de transmisión el haz incidente sobre un medio pasa a través de él y sale como tal. Los medios que cumplen con esta propiedad son conocidos como cuerpos transparentes y permiten ver los objetos colocados detrás de ellos.

Figura 8. Transmisión regular.

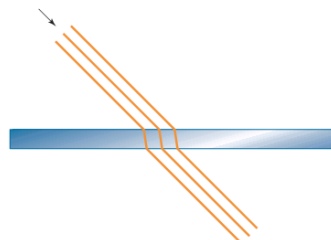


Imagen tomada de: Curso de luminotecnia, Indalux , 2002

1.3.2.2. Transmisión difusa: En esta transmisión el haz incidente se difunde por el medio, saliendo de él en múltiples direcciones. A este tipo de medios se les denominan traslúcidos y los objetos colocados detrás de ellos no pueden observarse con precisión. (Indalux, 2002)

Figura 9. Transmisión difusa.

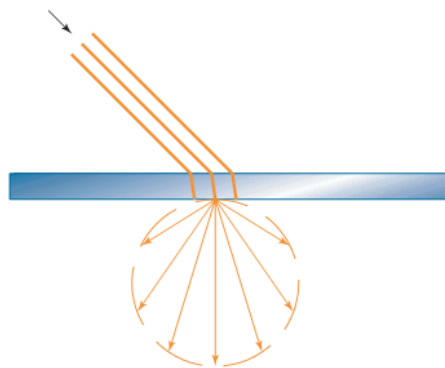


Imagen tomada de: Curso de luminotecnia, Indalux , 2002

1.3.2.3. Trasmisión mixta: Es una forma de transición de la transmisión. Aunque la difusión del haz no es completa, los objetos no se pueden observar claramente detrás del mismo aunque sí su posición.

1.3.3. Absorción: Se denomina absorción a la transformación de la energía radiante en otra forma de energía, generalmente en forma de calor. Este fenómeno es una característica de todas las superficies que no son completamente reflectoras y de los materiales que no son completamente transparentes. La relación entre la luz absorbida y la luz incidente es denominada como *absortancia*.

Dicha ley se resume en la ecuación 4.

Ecuación 4. Ley de Snell

$$n_1 \times \text{sen}\alpha_1 = n_2 \times \text{sen}\alpha_2 ;$$

N1: índice de refracción del primer medio.

N2: Índice de refracción del segundo medio.

α_1 : Angulo de incidencia.

α_2 : Angulo de refracción.

La distancia D mostrada en la figura 10 depende del ángulo de incidencia del rayo y del índice de refracción y es conocida como desplazamiento.

1.4. EL COLOR.

El color es una interpretación subjetiva, esta frase tiene su fundamento a medida que el estudio de la luz y las propiedades ópticas de la materia logran aumentar el conocimiento en dicho campo, puesto que, en realidad los objetos ni producen ni poseen colores; lo que en realidad sucede es que dependiendo de las propiedades ópticas y de la composición espectral de luz con la que se ilumine un objeto, este puede reflejar, absorber o transmitir los colores de la luz que recibe.

1.4.1. Temperatura de color: La temperatura de color es una expresión que se utiliza para comparar el color de una fuente de luz con el color que emite el cuerpo negro en función de la temperatura. El cuerpo negro al igual que las fuentes de luz incandescentes cambia de color a medida que aumenta su temperatura, de esta manera el color del cuerpo negro cambia entre el rojo y el violeta a medida que aumenta su temperatura. Es importante aclarar que la temperatura de color no es

una medida de temperatura, define sólo su color y se aplica a fuentes de luz que tengan una gran semejanza de color con el cuerpo negro”. (Indalux, 2002)

La figura 11 muestra la curva que representa el color que emite el cuerpo negro en función de la temperatura.

Figura 11. Color de cuerpo negro en función de la temperatura.

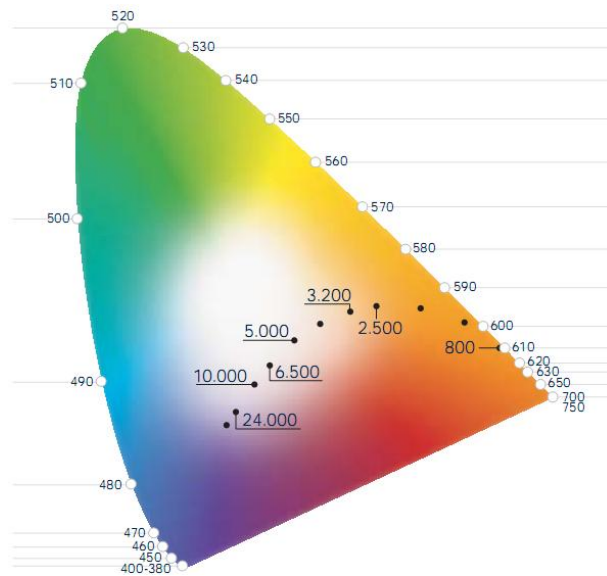


Imagen tomada de: Curso de luminotecnía, Indalux, 2002

Si dos fuentes de luz tienen apariencia muy similar no significa que su composición espectral también lo sea. Debido a esto se define el índice de rendimiento de color (IRC).

1.4.2 Índice de rendimiento de color (IRC): La composición espectral de la luz es útil para la reproducción de los colores, así dos fuentes de luz con apariencia similar pueden generar propiedades de reproducción cromática diferentes. Por esto se define el IRC como el índice que indica la capacidad de reproducción de los colores en comparación con la reproducción proporcionada por una luz o patrón de referencia.

La tabla 1 muestra algunos índices de reproducción cromática asociados a diferentes fuentes de luz.

Tabla 1. IRC para diferentes fuentes de luz.

Fuentes Luminosas	Tc (°K)	IRC
Cielo azul	10.000 a 30.000	85 a 100 (grupo 1)
Cielo nublado	7.000	85 a 100 (grupo 1)
Luz solar día	6.000	85 a 100 (grupo 1)
Lámparas descarga (excepto Na)		
Luz día (halogenuros)	6.000	96 a 100 (grupo 1)
Blanco neutral	3.000 a 5.000	70 a 84 (grupo 2)
Blanco cálido	Menos de 3.000	40 a 69 (grupo 3)
Lámpara descarga (Na)	2.900	Menos de 40
Lámpara incandescente	2.100 a 3.200	85 a 100 (grupo 1)
Lámpara fotográfica	3.400	85 a 100 (grupo 1)
Llama de vela o de bujía	1.800	40 a 69 (grupo 3)

Imagen tomada de: Curso de luminotecnia, Indalux, 2002

1.4.3. Efectos psíquicos de los colores y su armonía: Está comprobado que la iluminación puede producir en el observador diferentes tipos de reacciones psicológicas. Por ello emplear colores de forma adecuada es un tema de mucho interés para diferentes áreas (psicología, luminotecnia, decoración, entre otros). Existen diversos tipos de sensaciones que han sido comprobadas cuando un individuo es expuesto a diferentes colores, una de estas sensaciones es la de calor y frío, de aquí que se hable de colores fríos y cálidos. Los colores cálidos están clasificados dentro del espectro visible como los colores que van desde el rojo hasta el amarillo verdoso, este tipo de colores son colores dinámicos, excitantes y generan sensación de proximidad. Por otro lado, los colores fríos van desde el verde hasta el azul, estos colores calman, descansan y generan

sensación de lejanía. Dependiendo de la tendencia del color este será más cálido o mas frio si se acerca al rojo o al azul. Por otro lado la claridad de los colores también tiene sus efectos, por ejemplo, los colores claros animan y dan sensación de ligereza, mientras que, los colores oscuros deprimen y producen sensación de pesadez.

Se dice que dos colores armonizan cuando la combinación estos es agradable y placentera para el observador.

De todo lo mencionado anteriormente se concluye que tener el conocimiento de la distribución espectral de la fuente de luz es indispensable para conseguir los efectos cromáticos deseados y así poder generar espacios que estén acorde a las actividades que se realicen dentro de estos.

1.5. MAGNITUDES LUMINOSAS.

En esta sección se presentan las diferentes magnitudes utilizadas en las diferentes técnicas de iluminación.

1.5.1. Flujo luminoso: En las fuentes artificiales de luz, la gran mayoría de la energía utilizada para la producción de esta es disipada en forma de calor por los dispositivos, es decir, solo una parte de la energía es utilizada para producir la radiación que es percibida por el ojo.

El flujo luminoso es la cantidad de energía radiada o emitida por una fuente de luz en un segundo en todas las direcciones. De manera más precisa se llama flujo luminoso de una fuente a la energía radiada que recibe el ojo medio humano y que se transforma en luz durante un segundo según la curva de sensibilidad.

El flujo luminoso es denotado con la letra Φ y su unidad es el lumen. “El lumen es el flujo luminoso de la radiación monocromática que se caracteriza por una frecuencia de valor 540×10^{12} Hz. y por un flujo de energía radiante de $1/683$ W. Un watio de energía radiante de longitud de onda de 555 nm en el aire equivale a 683 lm aproximadamente”. (Indalux, 2002)

El rendimiento luminoso de una fuente de luz indica la cantidad de potencia requerida para producir determinado flujo luminoso, sus unidades son lm/W .

1.5.2. Intensidad luminosa: Esta cantidad hace referencia a una dirección y está contenida en un ángulo sólido w . Para poder definir el concepto de intensidad luminosa hay que definir lo que se conoce como estéreo radian. Al igual que a una magnitud de superficie le corresponde un ángulo plano que se mide en radianes, a una magnitud de volumen le corresponde un ángulo sólido que se mide en estéreo radianes. Un estéreo radian es un ángulo sólido que corresponde a un casquete esférico cuya superficie es igual al cuadrado del radio de la esfera. La figura 12 mostrada a continuación nos representa mejor el concepto de estéreo radian.

Figura 12. Estéreo radian

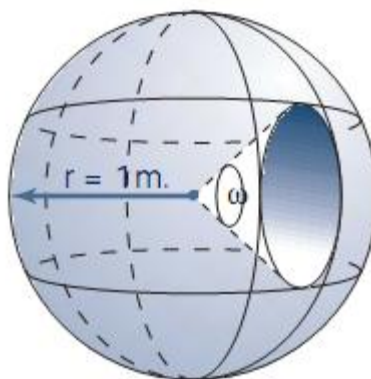


Imagen tomada de: Curso de luminotecnia, Indalux, 2002

Ahora el ángulo sólido total es igual a 4π estéreos radianes.

La intensidad luminosa de una fuente de luz es igual a la cantidad de flujo luminoso emitido en una dirección por unidad de ángulo sólido en esa dirección.

Su símbolo es I y su unidad la candela, por tanto, una candela es un lumen por estéreo radian y su fórmula está dada por:

Ecuación 5. Intensidad luminosa

$$I = \frac{\Phi}{\omega} \left(\frac{\text{lm}}{\text{sr}} \right)$$

Para una mayor comprensión la figura 13 nos ilustra mejor el concepto de candela.

Figura 13. Representación de candela (Indalux, 2002)

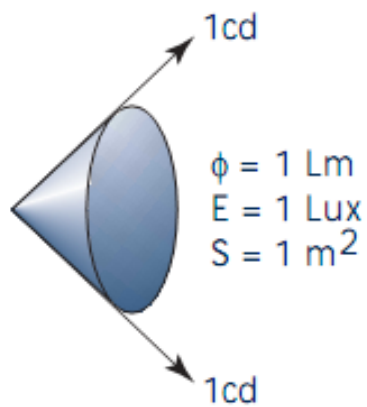


Imagen tomada de: Curso de luminotecnia, Indalux, 2002

1.5.3. Iluminancia: La iluminancia es la relación entre el flujo luminoso y la superficie iluminada. Su unidad asociada es el lux y está definido como la iluminancia de una superficie que recibe un flujo luminoso de 1 lm repartido sobre una superficie de un metro cuadrado. La ecuación 6 expresa la luminancia dada por:

Ecuación 6. Iluminancia

$$E = \frac{\Phi}{S} \left(\frac{\text{lm}}{\text{m}^2} \right);$$

Φ : Flujo luminoso.

S : Superficie iluminada.

La medida del nivel de iluminancia se realiza por medio de un luxómetro, este es un dispositivo que posee una célula que genera una corriente eléctrica dependiendo de la cantidad de luz incidente sobre la superficie de este.

1.5.4. Luminancia: La luminancia es el efecto de la luminosidad que produce una superficie sobre la retina del ojo, Este tipo de efecto puede provenir de una fuente directa de luz, una fuente secundaria o superficie que refleje luz.

La luminancia proporciona una medida del brillo de fuentes luminosas primarias y de fuentes que constituyen los objetos iluminados. Cabe mencionar que el ojo no ve colores, en realidad lo que percibe es la diferencia de luminancias y no de iluminación, es decir, a igual iluminación los objetos son percibidos por el ojo de diferente forma debido a que poseen diferentes niveles de reflexión.

La luminancia de una superficie está definida como el cociente entre la intensidad luminosa de una fuente de luz en una dirección y la superficie proyectada según dicha dirección. Este concepto queda mejor ilustrado por medio de la figura 14.

Figura 14. Luminancia de una superficie.

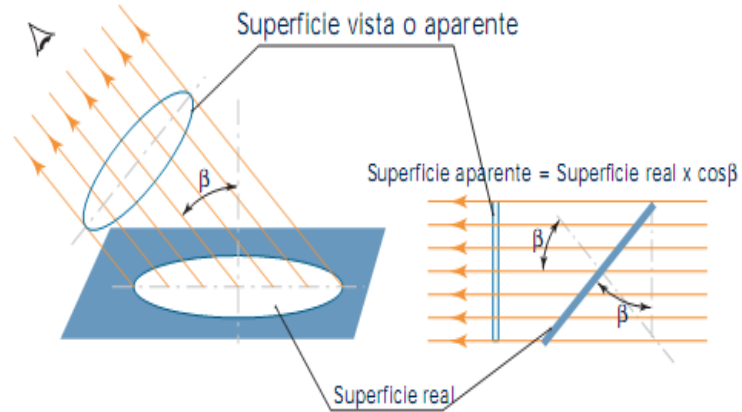


Figura 5. Luminancia de una superficie.

Imagen tomada de: Curso de luminotecnia, Indalux, 2002

El área proyectada es la vista por el observador en dirección de observación. Se calcula multiplicando la superficie iluminada por el coseno del ángulo que forma su normal con la dirección de la intensidad luminosa.

La iluminancia se representa por medio de la letra L, siendo su unidad la cd/m^2 y su fórmula se expresa de la siguiente manera:

Ecuación 7. Luminancia de una superficie.

$$L = \frac{I}{S \times \cos \beta} \left(\frac{cd}{m^2} \right);$$

$S \times \cos \beta$: Superficie vista o aparente.

Todos los conceptos anteriormente explicados son necesarios para poder tener una buena base de conocimiento y poder desarrollar un buen proyecto de iluminación.

1.6. MARCO REGLAMENTARIO PARA ILUMINACIÓN DE INTERIORES.

En Colombia la reglamentación correspondiente a iluminación y alumbrado público es RETILAP (reglamento técnico de iluminación y alumbrado público), dicho reglamento tiene consignados los requisitos que deben cumplir los sistemas de iluminación nuevos. Es importante aclarar que la normativa concerniente a sistemas de iluminación natural no está desarrollada de igual forma que los sistemas de iluminación que funcionan con energía eléctrica, sin embargo, este proyecto será enmarcado dentro del reglamento existente.

El capítulo 4 de RETILAP edición actualizada 30 de marzo de 2010 denominado "DISEÑO Y CÁLCULOS DE ILUMINACIÓN INTERIOR", sección 410, donde se abordan los requisitos generales del diseño de alumbrado interior como:

- ✓ Conocer las actividades asociadas con cada espacio.
- ✓ Las exigencias visuales de cada puesto de trabajo y su localización.
- ✓ Las condiciones de reflexión de las superficies.
- ✓ Los niveles de iluminancia e uniformidad requeridas.
- ✓ La disponibilidad de la iluminación natural.
- ✓ El control de deslumbramiento.
- ✓ Los requerimientos especiales en las propiedades de las luminarias, por el tipo de aplicación.
- ✓ Propiedades de las fuentes y luminarias, tales como :

- ❖ El índice de reproducción del color, lo natural que aparece el objeto bajo la luz.
- ❖ La temperatura del color, la apariencia de calidez o frialdad de la luz.
- ❖ El tamaño y la forma de fuente luminosa y de la luminaria.

La mayor parte de los ítems mencionados anteriormente debido a su naturaleza son desarrollados en capítulos posteriores de este proyecto.

1.6.1. Niveles de iluminación: La norma exige el cumplimiento de los niveles de iluminancia en lugares de trabajo de acuerdo a la tabla 410.1. El objetivo principal de este proyecto es elaborar un diseño para oficinas basado en tubos reflectantes, de acuerdo a esto y a la norma los niveles de iluminancia para el diseño es de 500 lux en promedio y con un máximo de 750 lux y un mínimo de 300 lux que no pueden ser superiores e inferiores a dichos valores.

Otro de los valores exigidos por la norma es el índice de deslumbramiento, que para el caso de oficinas de tipo general, mecanografía y computación es de 19.

1. CONTEXTUALIZACIÓN DEL PROYECTO.

2.1. UBICACIÓN GEOGRÁFICA DE COLOMBIA.

El territorio continental de la república de Colombia se encuentra situado en la parte noroccidental de América del sur, más exactamente, por el norte Colombia llega hasta los $12^{\circ}26'46''$, por el sur hasta $4^{\circ}12'30''$, por el extremo oriental se localiza a los $60^{\circ}50'54''$ de longitud oeste de Greenwich y por el occidente llega hasta los $79^{\circ}02'33''$ de longitud oeste de Greenwich. La ubicación geográfica se presenta en la gráfica 5.

Gráfica 5. Ubicación geográfica de Colombia.



Colombia se encuentra ubicada sobre la línea ecuatorial y cuenta con una gran variedad de climas y ecosistemas. A lo largo del año la incidencia de los rayos sobre este punto de la tierra varía muy poco, lo que conlleva a que este punto de

la tierra no sea afectado por las estaciones y a que los días y las noches sean de igual duración.

2.2. BUCARAMANGA.



Se encuentra en el nororiente de Colombia (7°08'N 73°08'W). Se asienta sobre la cordillera oriental del sistema andino colombiano. Tiene una temperatura media de 23°C (30°C Max y 15°C Min), presenta dos épocas lluviosas durante el año, entre marzo y mayo (130 mm/mes) y entre septiembre y noviembre (120 mm/mes). Los meses secos del año son diciembre y enero con una precipitación media de 58 mm/mes. Bucaramanga se encuentra a una altura de 960 msnm.

Para el caso de este proyecto es muy importante conocer un poco más a profundidad como es la incidencia del sol sobre el área de Bucaramanga.

2.2.1. Soleamiento: Los datos aquí presentados en la tabla 2 fueron obtenidos del sistema de información Atlas de Radiación Solar de la Unidad de Planeación Minero Energética. En esta publicación se presentan mapas sobre brillo y radiación solar que son de interés para este proyecto.

La información contenida en los 12 mapas de brillo solar (1 mapa para cada mes) arroja datos sobre el número de horas de sol en un promedio multianual para cada mes. De estos mapas y con información obtenida de otra fuente (Horas promedio de luz durante cada mes <http://espanol.weather.com/climate/sunRiseSunSet-Bucaramanga-COXX0005?month=1>) se elabora una sinapsis sobre la cantidad de días soleados y días nublados, al igual que la cantidad de radiación directa y difusa en cada uno de los meses del año.}

Tabla 2. Porcentajes de días soleados y nublados para Bucaramanga.

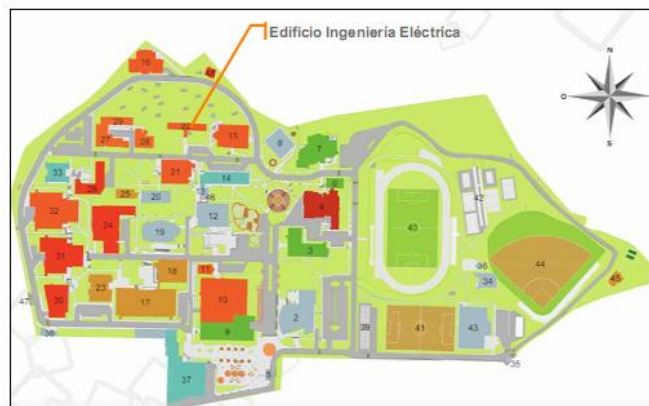
	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic
	68 %	50 %	41 %	40 %	40 %	40 %	48 %	40 %	41 %	42 %	42 %	60 %
	31 %	50 %	59 %	60 %	60 %	60 %	52 %	60 %	59 %	58 %	58 %	40 %

Como se puede apreciar en la tabla 2 y en los mapas de soleamiento, Bucaramanga es una de las regiones centrales de Colombia que cuenta con buenos niveles de soleamiento durante la mayor parte del año.

2.3. UBICACIÓN DEL PROYECTO.

El actual edificio de ingeniería eléctrica de la universidad industrial de Santander se encuentra ubicado como se puede apreciar en la figura 15..

Figura 15. Ubicación edificio ingeniería eléctrica



Dicha edificación se encuentra en proceso de repotenciación para brindar a estudiantes, profesores y funcionarios administrativos de la escuela el espacio necesario para desarrollar sus actividades (docencia, aprendizaje o administrativa) y para mostrar el compromiso que la escuela de ingeniería eléctrica tiene con el desarrollo de edificaciones sostenibles, incorporando de esta manera conceptos como uso racional de la energía, diseños bioclimáticos, fuentes de energía renovables y domótica.

Dicho proyecto está dividido en dos fases, la fase 1 comprende la repotenciación del edificio actual y la fase 2 está planeada como una construcción nueva. En la figura 16 se puede apreciar la ubicación de cada una de las fases.

Figura 16. Ubicación edificio reforzado ingeniería eléctrica



Por su ubicación, como se puede apreciar en la figura 16, la fase 1 en la parte posterior de la edificación cuenta con zonas verdes, en medio de dichas zonas se encuentran una gran variedad de árboles con alturas comprendidas entre los 10 y 15 metros que van a ser respetados por las nuevas edificaciones. La altura correspondiente al último nivel de la reforma será muy superior a la altura promedio de los árboles aledaños a la edificación, lo que garantiza que el sistema

de iluminación natural que se pretende instalar no tenga obstrucciones de este tipo. Por otro lado, las otras posibles obstrucciones estarían relacionadas con los edificios marcados con los números 28, 15 y 21 quienes por su ubicación y su altura no generan obstáculos sobre el último nivel de la reforma.

Otro de los puntos importantes que se debe tener en cuenta para el diseño de un sistema de este tipo, es la orientación de la edificación, es decir, si el recorrido del sol durante el año posibilita de manera favorable la cantidad de radiación directa incidente sobre la superficie del último nivel de la reforma, En la figura 16 se puede apreciar que la edificación cuenta con una fachada norte-sur y que el recorrido del sol coincide con la orientación del edificio, beneficiándose de esta manera durante todo el año con su radiación.

3. SISTEMAS DE ILUMINACIÓN NATURAL.

3.1. INTRODUCCIÓN.

La información contenida en este capítulo fue obtenida en su totalidad del libro desarrollado por la agencia internacional de energía (IEA) llamado “Daylight in buidings”, en el cual se encuentra en detalle la descripción de los sistemas de iluminación natural existentes en la actualidad. Aquí se describen las características de los sistemas de iluminación natural avanzados con el fin de ayudar a los profesionales a seleccionar un sistema, además, resume los elementos clave del proceso de toma de decisión para sistemas de iluminación natural.

Esta sección consiste en una matriz detallada de sistemas de iluminación natural, clasificados en dos grandes grupos: los sistemas con apantallamiento y los sistemas sin apantallamiento. Las descripciones técnicas ofrecen los detalles del diseño, la aplicación de cada sistema, los principios físicos en los cuales están basados, la información sobre el control, el mantenimiento, los costos y ahorros de energía, ejemplos de uso y simulación o resultados de las mediciones del desempeño asociado con cada uno de los sistemas.

Los sistemas presentados en este capítulo representan un amplio rango de sistemas de iluminación natural avanzados disponibles comercialmente, sin embargo, algunos de estos sistemas se encuentran en desarrollo o en estado de prototipo y algunos sistemas son considerados más conceptos arquitectónicos que productos.

Todos los sistemas tienen diferentes características relacionadas con los parámetros de mejor desempeño discutidos posteriormente. Debido a que estos parámetros pueden tener mayor o menor importancia en los casos de diseño de la vida real, es imposible desarrollar una escala o definir un método de selección

apropiado para buscar el mejor de los sistemas de iluminación en una situación dada.

Sin embargo, hay algunas estrategias generales para tomar decisiones acerca del diseño de iluminación natural. Primero el diseñador debe enfocarse sobre las siguientes preguntas:

- ¿Es útil aplicar sistemas de iluminación natural para determinado caso en particular?
- ¿Qué tipo de problema se puede solucionar con sistemas de iluminación natural?
- ¿Qué beneficios se pueden obtener con los sistemas de iluminación natural?

Si el uso de los sistemas de iluminación natural parece ser una opción prometedora, la pregunta siguiente es:

- ¿Qué sistema escoger?

Este capítulo presenta la más completa y actualizada información disponible, incluyendo datos de desempeño y análisis de expertos que ayudan a los diseñadores a responder las preguntas. Los parámetros claves para considerar en la búsqueda de un sistema son:

- Condiciones de iluminación natural, latitud, nubosidad y obstrucciones.
- Objetivos de la iluminación.
- Estrategias de iluminación relacionadas con el diseño arquitectónico.
- Esquema de ventanas y sus funciones.
- Objetivo de ahorro.
- Restricciones operativas, fijas o controladas

- Consideraciones de mantenimiento
- Restricciones económicas

Es también importante enfocarse en los principales objetivos para aplicación de los sistemas de iluminación natural:

- Redireccionamiento de la iluminación natural hacia las zonas de poca incidencia de luz.
- Iluminación suplementaria para diferentes zonas de trabajo.
- Mejoramiento del confort visual, control para deslumbramiento.
- Ejecutar los sistemas de protección solar y el control térmico.

Para comparar las ventajas de los diferentes sistemas es necesario entender en contexto los contenidos del presente capítulo, algunos resultados vienen de experimentos de modelos a escala bajo condiciones simuladas de luz, mientras otros provienen de pruebas reales en diferentes localizaciones alrededor del mundo. Debido a que las instalaciones de prueba experimentales y las condiciones reales difieren significativamente de un sitio a otro, no es conveniente comparar los resultados numéricos de los diferentes sitios. Las conclusiones generales muestran que cada sistema es válido para condiciones específicas, tales que la magnitud de los niveles de iluminación absolutas no puedan ser comparadas entre los sistemas probados en diferentes sitios.

3.2. MATRIZ DE SISTEMAS.

La matriz que se expone a continuación cubre dos grupos de sistemas de iluminación natural: con apantallamiento y sin apantallamiento.

3.2.1. Sistemas de iluminación natural con apantallamiento: Se analizarán dos tipos de sistemas de iluminación con apantallamiento: el primero corresponde a los sistemas que cuenta primariamente con luz día difusa y rechazan la luz día directa, y el segundo corresponde a los sistemas que usan primariamente la luz día directa para dirigirla a los espacios interiores.

Los sistemas con apantallamiento son diseñados para apantallar la luz solar, así como para iluminar; ellos también pueden manejar otros aspectos de la iluminación tales como protección contra deslumbramiento y el redireccionamiento de la luz directa o difusa.

El uso de los sistemas con apantallamiento solar convencionales, como las persianas, reducen significativamente el ingreso de luz natural en una habitación. Para incrementar la luz natural mientras se provee apantallamiento se han desarrollado sistemas avanzados que protegen las zonas junto a la ventana de la luz solar directa como el interior de la habitación, por otro lado, envían luz solar directa y/o difusa al interior de ella.

3.2.2. Sistema de iluminación natural sin apantallamiento: Los sistemas de iluminación natural son diseñados principalmente para redireccionar la luz hacia áreas alejadas de las ventanas o tragaluces. Pueden producir a voluntad el bloqueo de la luz directa del sol. Estos sistemas pueden clasificarse en 4 categorías:

3.2.2.1. Sistemas guía para luz difusa: Estos re-direccionan la luz día de áreas de la bóveda celeste al interior de la habitación, bajo condiciones del cielo nublado el área alrededor del cenit es mucho más brillante que el área sobre el horizonte. Para sitios con obstrucciones externas altas (típicas en ambientes urbanos densos) la porción superior del cielo puede ser la única fuente de luz día.

Entonces los sistemas guía de luz pueden mejorar la utilización de luz en estas situaciones

3.2.2.2. Sistemas guía de luz directa: Estos envían luz directa al interior de la habitación sin los efectos secundarios del deslumbramiento y sobrecalentamiento

3.2.2.3. Difusores de luz o sistemas difusores: Son usados en aperturas cenitales para producir la distribución de luz, si estos sistemas son usados en aberturas de ventanas verticales se presentarán serios deslumbramientos.

3.2.2.4. Sistemas transportadores de luz: Recogen y transportan la luz del sol a grandes distancias a través de un núcleo (fibra óptica o tuberías de luz).

3.2.3. Para tener en cuenta en la matriz de sistemas: Algunos sistemas incluidos en la matriz pueden cumplir múltiples funciones, de esta manera aparecen clasificados en más de una categoría, p.e, Los estantes de luz (“light shelves”), reorientan luz difusa como rayos de luz directa.

Los encabezamientos de las columnas seleccionadas de la matriz que no se explican por sí mismo son descritos en detalle abajo.

Bajo el título “protección contra deslumbramiento” se considera la siguiente pregunta: ¿previene el sistema el deslumbramiento de luz día?

Al evaluar “vista exterior” la matriz considera la siguiente pregunta: ¿Permite el sistema una vista transparente y sin distorsión cuando es usada en su posición de diseño primario?

Por ejemplo los sistemas conocidos como aberturas cenitales anidolicas no permiten una clara vista al exterior (ellos típicamente se usan arriba de una ventana transparente, lo cual permite una vista sin obstrucciones).

Para la columna titulada “Guía de luz en profundidad de la habitación” la matriz contesta la pregunta: ¿el sistema lleva a cabo redirección de luz a profundidades que son mayores que los sistemas de ventanas convencionales?

En la columna “iluminación homogénea”, la matriz responde la pregunta: ¿El sistema lleva a cabo una distribución uniforme de la luz día a través del espacio (paredes y techo)?

En la valoración potencial de ahorros (luz artificial), la matriz responde a la pregunta: ¿sustituye efectivamente el sistema el uso de la iluminación artificial en comparación con los sistemas convencionales?

En la columna titulada “necesidad de seguimiento”, la matriz responde a la pregunta: ¿Son los sistemas mecánicos o de ajuste pasivo necesarios para seguir los movimientos diurnos o estacionales del sol a lo largo del día o año y de esta forma mantener un desempeño eficiente del sistema?

En la columna titulada como disponibilidad, indica si la tecnología está disponible en el mercado (DS) o si se encuentra en fase de prueba (P). Algunos sistemas que se etiquetan como disponibles deberán ser diseñados y construidos como una parte integral de la envolvente del edificio. Por ejemplo las estanterías de luz (“light shelves”).

La matriz de sistemas se muestra en las páginas siguientes.

Tabla 3. Matriz de sistemas con apantallamiento

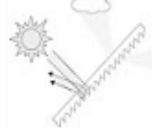
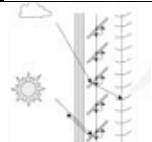
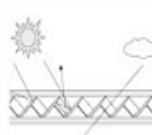

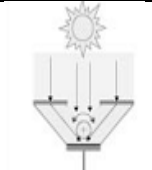
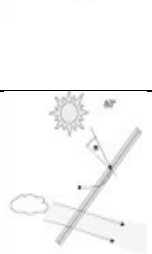
1. Sistemas de iluminación natural con apantallamiento											
Categoría	Tipo	Dibujo	Clima	Localización	Criterio para selección elementos						
					Protección contra deslumbramiento	Vista Exterior	Guía de luz en profundidad de la habitación	Iluminación homogénea	Potencial de ahorro	Necesidad de seguimiento	Disponibilidad
	Páneles prismáticos		Todos los climas	Ventanas verticales, tragaluces	D	N	D	D	D	D	DS
	Rejillas y persianas venecianas		Climas templados	Ventanas verticales	S	D	S	S	S	S	DS
			Climas templados	Tragaluces, techo acristalado	D	N	N	S	N	N	DS
	Aberturas anidolicas zenitales		Climas templados	Tragaluces	S	N	N	S	S	N	P
	Sistema de apantallamiento selectivo direccional con concentración de elementos ópticos holográficos (HOE)		Climas templados	Ventanas verticales, tragaluces y techos de cristal	D	S	N	D	S	S	P
	Sistema de apantallamiento transparente con HOE basado en reflexión total		Clima templados	Ventanas verticales, tragaluces, techos de cristal	D	S	N	S	S	S	DS

Tabla tomada de Daylight in buildings, IEA

S: Si, N: No, D: Depende, DS: Disponible, P: Prueba

Tabla 4. Matriz de sistemas con apantallamiento




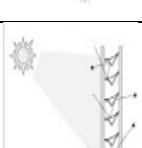
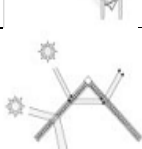
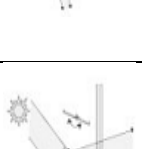
1. Sistemas de iluminación natural con apantallamiento											
Categoría	Tipo	Dibujo	Clima	Localización	Criterio para selección elementos						
					Protección contra deslumbramiento	Vista Exterior	Guía de luz en profundidad de la habitación	Iluminación homogénea	Potencial de ahorro	Necesidad de seguimiento	Disponibilidad
			Climas calientes, cielos nublados	Ventanas verticales por encima de la altura de visión	S	S	D	D	D	N	P
	Celosías y persianas		Todos los climas	Ventanas verticales	S	D	S	S	S	S	DS
	Estante de luz para redirección de luz solar		Todos los climas	Ventanas verticales	D	S	S	S	S	N	DS
	Acristalamiento con perfiles reflectivos (Okasolar)		Clima templado	Ventanas verticales, tragaluces	D	D	D	D	D	N	DS
	Claraboya con paneles cortados por laser (LCPs)		Clima caliente, cielo soleado, bajas latitudes	Claraboyas	D	-	S	S	S	N	P
	Laminas giratorias		Climas templado	Ventanas verticales, tragaluces	S/D	D	D	D	D	S	DS

Tabla tomada de Daylight in buildings, IEA

S: Si, N: No, D: Depende, DS: Disponible, P: Prueba

Tabla 5. Matriz de sistemas con apantallamiento


1. Sistemas de iluminación natural con apantallamiento											
Categoría	Tipo	Dibujo	Clima	Localización	Criterio para selección elementos						
					Protección contra deslumbramiento	Vista Exterior	Guía de luz en profundidad de la habitación	Iluminación homogénea	Potencial de ahorro	Necesidad de seguimiento	Disponibilidad
	Persianas solares anidolicas		Todos los climas	Ventanas verticales	S	D	S	S	D	N	P

Tabla tomada de Daylight in buildings, IEA

S: Si, **N:** No, **D:** Depende, **DS:** Disponible, **P:** Prueba

Tabla 6. Matriz de sistema sin apantallamiento



2. Sistemas de iluminación natural sin apantallamiento											
Categoría	Tipo	Dibujo	Clima	Localización	Criterio para selección elementos						
					Protección contra deslumbramiento	Vista Exterior	Guía de luz en profundidad de la habitación	Iluminación homogénea	Potencial de ahorro	Necesidad de seguimiento	Disponibilidad
	Estante de luz		Clima templado, cielo nublado	Ventanas verticales	D	S	D	D	D	N	DS
	Sistema integrado anidolico		Clima templado	Ventanas verticales	N	S	S	S	S	N	DS

Tabla tomada de Daylight in buildings, IEA

Tabla 7. Matriz de sistemas sin apantallamiento




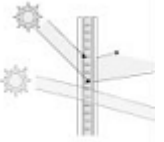
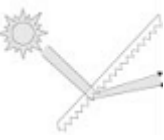
2. Sistemas de iluminación natural sin apantallamiento											
Categoría	Tipo	Dibujo	Clima	Localización	Criterio para selección elementos						
					Protección contra deslumbramiento	Vista Exterior	Guía de luz en profundidad de la habitación	Iluminación homogénea	Potencial de ahorro	Necesidad de seguimiento	Disponibilidad
	Techo anidolico		Clima templado, Cielo nublado	Fachada vertical por encima de ventana	-	S	S	S	S	N	P
	Sistema pescado		Clima templado	Ventana vertical	S	D	S	S	S	N	DS
	Elementos guía para luz cenital con HOEs		Clima templado, Cielo nublado	Ventanas verticales (Orientada hacia patio), claraboyas	-	S	S	S	S	N	DS
	Páneles cortados por laser		Todos los climas	Ventanas verticales, tragaluces	N	S	S	S	S	N	P
	Páneles prismáticos		Todos los climas	Ventanas verticales, tragaluces	D	D	D	D	D	S/N	DS

Tabla tomada de Daylight in buildings, IEA

S: Si, N: No, D: Depende, DS: Disponible, P: Prueba

Tabla 8. Matriz de sistemas sin apantallamiento incluido.


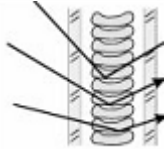
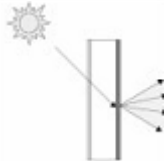



1. Sistemas de iluminación natural sin apantallamiento											
Categoría	Tipo	Dibujo	Clima	Localización	Criterio para selección elementos						
					Protección contra deslumbramiento	Vista Exterior	Guía de luz en profundidad de la habitación	Iluminación homogénea	Potencial de ahorro	Necesidad de seguimiento	Disponibilidad
	HOEs en claraboyas		Clima templado	Claraboyas	D	S	S	S	S	N	DS
	Acrilamiento para redireccionar los rayos del sol		Todos los climas	Ventanas verticales, claraboyas	D	N	S	S	S	N	DS
	-		Todos los climas	Ventanas verticales, claraboyas	N	N	S	S	D	N	DS
	Heliostatos		Todos los climas, cielo soleado	-	-	-	S	-	S	S	DS
	Tubo de luz		Todos los climas, cielo soleado	-	-	-	S	-	S	S	DS
	Tubo solar		Todos los climas, cielo soleado	Techo	-	-	S	D	S	N	DS

Tabla tomada de Daylight in buildings, IEA

S: Si, N: No, D: Depende, DS: Disponible, P: Prueba

Tabla 9. Matriz de sistemas sin apantallamiento.


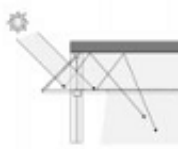
1. Sistemas de iluminación natural sin apantallamiento											
Categoría	Tipo	Dibujo	Clima	Localización	Criterio para selección elementos						
					Protección contra deslumbramiento	Vista Exterior	Guía de luz en profundidad de la habitación	Iluminación homogénea	Potencial de ahorro	Necesidad de seguimiento	Disponibilidad
	Fibras		Todos los climas, cielo soleado	-	-	-	S	-	S	S	DS
	Guía de luz para techo		Clima templado, cielo soleado	-	-	-	S	S	S	N	P

Tabla tomada de Daylight in buildings, IEA

S: Si, **N:** No, **D:** Depende, **DS:** Disponible, **P:** Prueba

3.3. LIGTH SHELVES.

Figura 17. Plataforma de luz - “Ligth shelves”

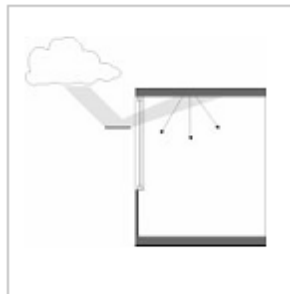


Imagen tomada de Daylight in buildings, IEA

3.3.1. Descripción técnica: Este sistema consiste generalmente en un baffle horizontal colocado en la parte exterior o interior de una ventana de fachada.

Este sistema normalmente es posicionado por encima del nivel de visión. En algunas ocasiones es utilizado como sistema óptico avanzado para redireccionar luz a zonas profundas de edificaciones. Los estantes de luz son típicamente posicionados para prevenir el deslumbramiento y mantener la vista hacia el exterior; su localización depende de la configuración de la habitación, la altura de los ojos de una persona ubicada en dicho recinto. Generalmente, entre menor sea la altura de la plataforma, mayor será el deslumbramiento y la cantidad de luz reflejada hacia el techo.

3.3.2. Principios de funcionamiento: La orientación, posición en la fachada (interna, externa o combinada), profundidad de la plataforma reflectante de luz tienen una estrecha relación con la cantidad de luz y los requerimientos de apantallamiento de diseño.

Una plataforma de luz interna, la cual redirecciona y refleja luz, reduciría la cantidad de luz recibida en el interior. Si ésta se mueve hacia el exterior se crea un movimiento paralelo del área sombreada hacia la ventana, la cual reduce los niveles de luz natural en las proximidades de la ventana y mejora la uniformidad de la iluminación interior. El ancho recomendado para la plataforma de luz debe ser aproximadamente igual a la altura sobre el plano de trabajo. El diseño de las plataformas de luz debe ser seleccionado con base en las características específicas de la latitud y el clima.

El techo es una parte secundaria importante en el diseño de las plataformas de luz, debido a que, los rayos de luz son reflejados por la plataforma hacia éste y luego hacia la habitación. Las características más importantes de los techos son el acabado de la superficie y la pendiente. Aunque el techo con una superficie

espejo reflejará más luz dentro del cuarto, podría llegar a causar deslumbramiento, para evitarlo en el acabado del techo se deben utilizar pinturas de bajo brillo.

La penetración de luz en la profundidad de la habitación depende de la pendiente del techo, es decir, una habitación en donde la pendiente va hacia arriba (desde la ventana hacia el centro de la habitación) incrementaría la profundidad a la cual la luz penetra en el edificio, por el contrario, en un techo plano la luz de la plataforma refleja la mayor parte de ésta hacia un espacio cercano a la ventana.

3.3.3. Aplicaciones: Las plataformas de luz afectan el diseño estructural y arquitectónico de un edificio y deben considerarse desde la fase de diseño, debido a que requieren techos relativamente altos, con el fin de funcionar efectivamente. Las plataformas se deben diseñar de manera individual para cada ventana dependiendo de su orientación, configuración de la habitación y latitud. Se aplican en climas soleados y no son muy eficientes en climas con mucha nubosidad.

Figura 18. Plataforma de luz para diferentes posiciones y condiciones climáticas

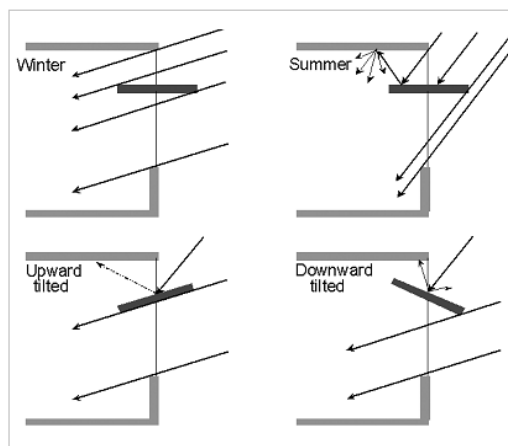


Tabla tomada de Daylight in buildings, IEA

* La sección posterior de la figura muestra el recorrido de los rayos sobre una plataforma de luz con superficie especular, durante invierno y verano. La sección inferior de la figura muestra como la inclinación de la plataforma puede generar sombra o reflexión de luz natural.

3.3.4. Control: En general las plataformas móviles de luz son más costosas (especialmente si son motorizadas) que las fijas, sin embargo los sistemas móviles son más flexibles en control y aplicaciones. Las plataformas con inclinación descendente (Vistas desde adentro) proporcionan sombra en las zonas perimetrales de la ventana y reducen la cantidad de luz reflejada al techo. Las plataformas con inclinación ascendente mejoran la penetración de la luz reflejada pero reducen el efecto de sombra sobre el perímetro de la ventana. Las plataformas montadas en el exterior reducen las cargas térmicas, suministrando mayor sombreado al interior de los edificios. Con plataformas montadas al interior existe un incremento de la radiación solar directa sobre la porción de la ventana que se encuentra por debajo del nivel de la plataforma.

3.3.5. Mantenimiento: Las plataformas de luz requieren una limpieza periódica. La superficie interna recoge polvo, la externa generalmente puede estar sucia, recoger nieve y proveer lugares de anidamiento para pájaros e insectos. Una superficie especular requiere un buen mantenimiento para mantener sus propiedades reflectivas, no requieren rutinas especiales de mantenimiento más que limpieza del vidrio en su interior y exterior.

3.3.6. Costos y ahorros de energía: bajos niveles de iluminación en las cercanías de la ventana puede conducir al incremento de alumbrado artificial, es por esto que, un incremento de uniformidad en iluminación puede causar que la habitación sea percibida como mejor iluminada, lo que reduciría la posibilidad de encender luz artificial por los ocupantes del recinto. La cantidad total de iluminación natural puede ser mejorada usando una plataforma externa cuya

calidad dependa de su geometría y del acabado de su superficie. Sin embargo, las plataformas más convencionales no producen altos niveles de iluminación al interior de edificios, por tanto, los ahorros de energía son modestos.

Figura 19. Plataforma de luz semi-reflectiva inclinada sobre la fachada de una edificación.



Imagen tomada de Daylight in buildings, IEA

Figura 20. Vista interior de una Plataforma de luz



Imagen tomada de Daylight in buildings, IEA

* Plataforma de luz semitransparente en una habitación en prueba en un día bajo

Condición de cielo nublado.

3.4. REJILLAS Y PERSIANAS - “LOUVERS AND BLINDS SYSTEMS”

Figura 21. Rejillas y persianas

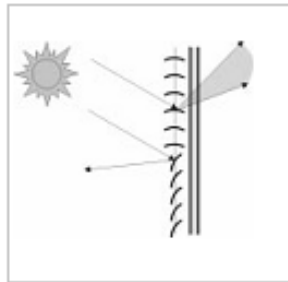


Imagen tomada de Daylight in buildings, IEA

Son sistemas clásicos de iluminación natural que se utilizan para protección solar y protección contra deslumbramiento.

3.4.1. Descripción técnica: Las rejillas y persianas se componen por múltiples lamelas horizontales o verticales que usualmente están hechas de acero galvanizado, aluminio anodizado o PVC de alta durabilidad y bajo mantenimiento. Pueden ser interiores o exteriores y las lamelas pueden ser planas o curvas y normalmente están colocadas de tal manera que el ancho de una lama se traslapa con la otra cuando esté totalmente cerrada.

3.4.2. Principio de funcionamiento: Las rejillas y persianas pueden obstruir, absorber y transmitir la luz solar (difusa y directa) al interior del edificio, sus efectos dependen de la posición del sol, de su localización interior o exterior, del ángulo de las lamelas y de las características reflectivas del material .

Las propiedades térmicas y ópticas de una ventana con rejillas o persianas son muy variables. Cuando las lamas se encuentran en posición horizontal pueden recibir luz del cielo y de la tierra. Si las lamas tienen inclinación ascendente principalmente transmiten luz del sol y del cielo, las lamas inclinadas en forma descendente principalmente transmiten luz de la superficie de la tierra.

Ambas incrementan la penetración de la luz del sol en el interior de la habitación. Cuando el cielo está nublado las rejillas y persianas promueven o mejoran la distribución de la luz.

3.4.3. Aplicaciones: Las rejillas y persianas son utilizadas en todas las orientaciones y latitudes. Las exteriores afectan el diseño estructural y arquitectónico del edificio y las interiores tienen menos impacto. En la práctica las persianas y rejillas se usan en todos los lados del edificio.

3.4.4. Control: Las rejillas y persianas pueden tener operación manual o automática. Las persianas controladas automáticamente pueden incrementar la eficiencia energética si reducen la ganancia solar y mejoran la admisión de luz. Sin embargo, estos sistemas pueden producir molestias en los ocupantes debido a no poseer control sobre el sistema. Las operadas manualmente por lo general no son tan eficientes, debido a que, los ocupantes pueden o no operarlas óptimamente.

3.4.5. Mantenimiento: El mantenimiento de las rejillas y las persianas puede ser difícil especialmente cuando tienen lamas reflectivas. Las persianas interiores recogen polvo, las exteriores pueden acumular sucio y nieve, por tanto, su mantenimiento está asociado con la limpieza cuidadosa de las lamas para que estas no se doblen y no se vea afectada la lubricación de sus mecanismos de rotación.

3.4.6. Costos y ahorros de energía: En condiciones soleadas estos sistemas pueden incrementar la penetración de luz natural, reducir las cargas térmicas y producir una mejor uniformidad de iluminación entre las áreas más próximas y distantes a las ventanas. Sus costos y ahorros de energía provienen del uso eficiente de luz sin generar ganancias de calor o cargas de enfriamiento. Para condiciones nubosas estas pueden ser eficientes energéticamente si son operadas de forma apropiada.

3.5. PÁNELES PRISMÁTICOS - “PRISMATIC PANELS”

Figura 22. Páneles prismáticos - “Prismatic panels”

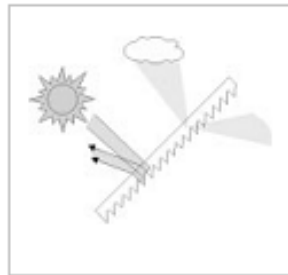


Imagen tomada de Daylight in buildings, IEA

Los páneles prismáticos son dispositivos planos, delgados, en forma de diente de sierra, hechos de un acrílico claro que es usado en climas templados para redirigir o refractar la luz natural. Cuando es usado como un sistema de apantallamiento, refractan luz directa pero transmiten luz difusa. Pueden ser aplicados de diferentes maneras, en sistemas fijos o seguidores móviles de luz solar en fachadas y tragaluces.

3.5.1. Descripciones técnicas: Un panel prismático lineal consiste en una formación de primas acrílicas, en donde una de las superficies de cada prisma forman una superficie plana conocida como espalda del prisma. Muy a menudo los

sistemas de prismas se colocan o se insertan en una unidad con doble acristalamiento para evitar mantenimiento.

Normalmente los paneles prismáticos se producen mediante dos procesos diferentes: moldeo por inyección y grabado especializado. En el moldeo por inyección los paneles prismáticos son producidos en polímeros acrílicos para 4 configuraciones diferentes (Diferentes ángulos de refracción). Algunos paneles son parcialmente recubiertos con una película de aluminio que posee superficie especular con alta reflectancia.

Figura 23. Paneles prismáticos disponibles para diferentes ángulos de incidencia

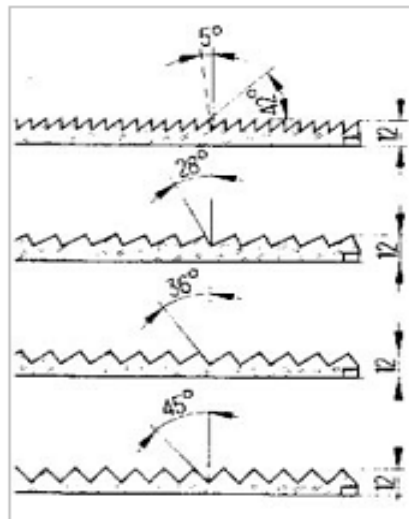


Imagen tomada de Daylight in buildings, IEA

Grabado especializado; este proceso de grabado produce prismas que están separados menos de un milímetro, la película acrílica resultante es liviana y aun así tiene buenas propiedades ópticas. Esta película se puede colocar en una unidad de doble acristalamiento.

3.5.2. Principios de funcionamiento: La función principal de un panel prismático es llevar a cabo una penetración profunda de luz natural. Estos paneles usan la reflexión y la refracción para controlar el uso de la iluminación natural en edificios. Los sistemas pueden ser diseñados para reflejar luz incidente en cierto rango de ángulos mientras que transmiten luz que incide en otros ángulos. La refracción y la reflexión interna total (basado en el ángulo crítico del material) puede ser usada para cambiar la dirección de la luz transmitida. Los porcentajes de luz reflejada y refractada dependen de los ángulos de incidencia, los índices de refracción y el estado de polarización de la luz incidente. Para una penetración profunda de los rayos directos del sol, el panel prismático debe acomodarse a diferentes altitudes solares. La luz refractada deberá salir en un ángulo menor que 15 grados por encima de la horizontal y así obtener máxima penetración sin crear rayos descendentes de luz que produzcan deslumbramiento.

Figura 24. Sección transversal de un panel prismático lineal

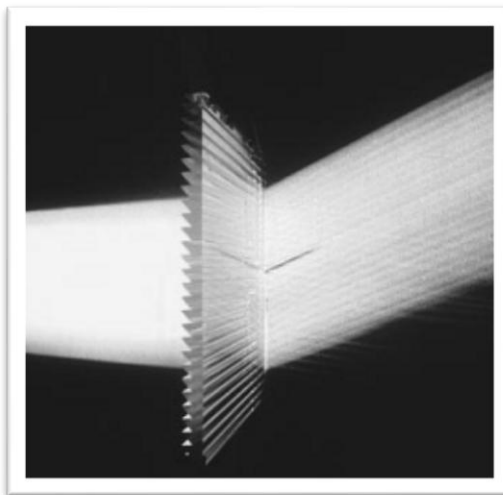


Imagen tomada de Daylight in buildings, IEA

* Visualización de la redirección de la luz lograda por el panel.

El desempeño de los paneles esta por tanto determinado por la configuración de los ángulos de refracción. Una configuración específica de perfiles prismáticos se requiere para diferentes geometrías y ubicaciones geográficas.

Además un buen acabado de superficie con una alta reflectancia es necesario para el techo, especialmente en la áreas cerca a las ventanas y para aproximadamente un tercio de la profundidad del techo.

3.5.3. Aplicaciones: Como un sistema de direccionamiento de luz, los paneles prismáticos pueden ser usados para guiar la luz natural difusa y luz directa.

Luz natural difusa

Figura 25. Aplicación paneles prismáticos luz natural difusa.

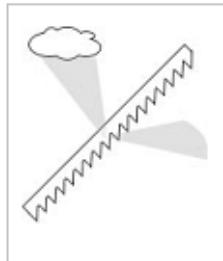


Imagen tomada de Daylight in buildings, IEA

Los paneles prismáticos son normalmente usados en fachadas verticales para redirigir la luz proveniente de la bóveda celeste hacia la mitad superior de una habitación, usualmente el techo. Simultáneamente los paneles reducen el brillo sobre la ventana. En este tipo de aplicación los paneles operan como un sistema anti-deslumbramiento con una función de redirección de luz simultanea. Sin embargo para fachadas soleadas es necesario un sistema de apantallamiento solar frente a los paneles.

Luz directa

Figura 26. Aplicación páneles prismáticos luz directa

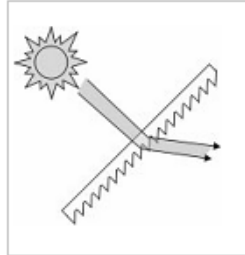


Imagen tomada de Daylight in buildings, IEA

Los páneles prismáticos se pueden usar también para direccionar la luz directa dentro de un cuarto. Para prevenir el deslumbramiento y la dispersión del color es esencial seleccionar el perfil correcto y su inclinación, dependiendo de la estación.

Sistemas fijos con apantallamiento de luz directa

Figura 27. Sistema fijo de panel prismático

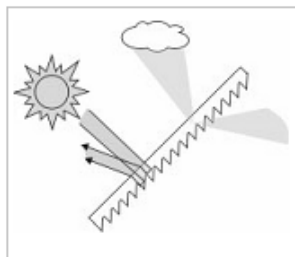


Imagen tomada de Daylight in buildings, IEA

Esta aplicación se encuentra usualmente en los techos con vidrio. La estructura prismática es diseñada de acuerdo con el movimiento del sol. Los paneles son integrados en una unidad con doble acristalamiento.

Sistemas móviles con apantallamiento de luz directa

Figura 28. Sistema móvil de panel prismático

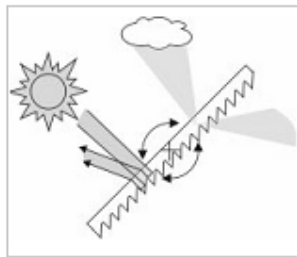


Imagen tomada de Daylight in buildings, IEA

Para esta aplicación los paneles prismáticos se usan en forma de persianas. Se colocan en frente o detrás del doble cristal en un arreglo vertical u horizontal (una unidad de doble acristalamiento no deja de ser necesaria). Esta aplicación controla el deslumbramiento de la luz directa pero no de la luz difusa, en otras palabras actúa solamente como un dispositivo de apantallamiento de luz directa.

3.5.4. Control: Cuando los paneles prismáticos se aplican como sistemas móviles de apantallamiento de luz directa, se requiere un eje automático de seguimiento para los paneles controlado por el movimiento del sol. Para muchas aplicaciones de re direccionamiento de la luz solamente se necesitan ajustes de acuerdo con la estación.

3.5.5. Mantenimiento: Los paneles prismáticos que van dentro de una unidad de doble acristalamiento requieren únicamente el lavado normal de las superficies

exterior e interior del vidrio. Si los paneles están expuestos se deben limpiar cuidadosamente de tal manera que no se dañen las superficies ópticas.

3.5.6. Costos y ahorros de energía: el costo de un panel está alrededor de los 200 euros para altos volúmenes de producción y 400 euros para bajos volúmenes de producción (metro cuadrado). El costo de la película prismática está entre 40 a 80 euros por metro cuadrado. Los ahorros de energía deben ser calculados para cada caso en particular.

3.6. PÁNELES CORTADOS POR LASER – “LASER CUT PANELS”

Figura 29. Paneles cortados por laser

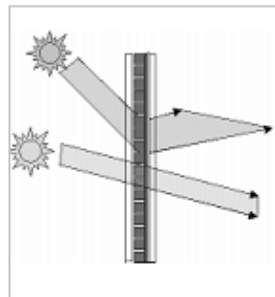


Imagen tomada de Daylight in buildings, IEA

Es un sistema de re direccionamiento de luz natural producido mediante cortes por laser en un panel delgado hecho de un material acrílico.

3.6.1. Descripción técnica: Un panel cortado por laser es un panel delgado que ha sido dividido por los cortes de un laser en un conjunto de elementos rectangulares. La superficie de cada elemento cortado por laser se convierte en un pequeño espejo interno que desvía los rayos de luz que pasan a través del panel. Las principales características de un panel cortado por laser son:

- Un muy alto porcentaje de luz es desviada en un gran ángulo (mayor de 120 grados).
- La vista exterior a través del panel.
- Procesos de producción son flexibles, disponibles para grandes y pequeñas cantidades.

La luz es desviada en cada elemento del panel por refracción, luego hay una reflexión interna total de luz y nuevamente una refracción. Debido a que todas las desviaciones ocurren en la misma dirección el desvío es altamente eficiente. Los paneles son usualmente fijos dentro de unidades de vidrio. Normalmente los paneles se cortan en ángulos perpendiculares a la superficie, sin embargo es posible hacer cortes a diferentes ángulos para añadir control sobre la dirección de la luz desviada.

3.6.2. Principios de funcionamiento:

- ✚ **Sistemas fijos de direccionamiento de luz:** Un panel cortado por laser con relación D sobre W (espaciamiento de corte a ancho de corte) igual a 0.7, fijado verticalmente en una ventana, desviará casi toda la luz incidente por encima de 45 grados y transmitirá la mayoría de luz incidente por debajo de los 20 grados. En consecuencia, una fracción de luz es desviada por el panel hacia el techo que a su vez actúa como una fuente que refleja luz difusa de manera similar a un sistema plataforma de luz o “light shelf”.
- ✚ **Sistemas direccionadores de luz en ventanas:** Un panel cortado por laser vertical desvía fuertemente la luz incidente para elevaciones grandes, mayores de 30 grados, mientras trasmite luz con incidencias cercanas a la normal con pequeñas distorsiones. La gráfica 6 muestra la fracción de luz desviada versus el ángulo de elevación de la luz incidente sobre el panel vertical cortado por laser. El panel provoca muy poco deslumbramiento

debido a que la luz desviada es dirigida fuertemente hacia arriba mientras que la fracción de luz no desviada continúa en la misma dirección descendente. La luz que se dispersa es baja debido a que no se producen superficies redondeadas en el proceso de fabricación. Sin embargo es conveniente usar este tipo de sistema en la parte superior de las ventanas.

Gráfica 6. Fracción de luz desviada versus elevación de luz incidente de un panel vertical cortado por laser para tres relaciones (D/W).

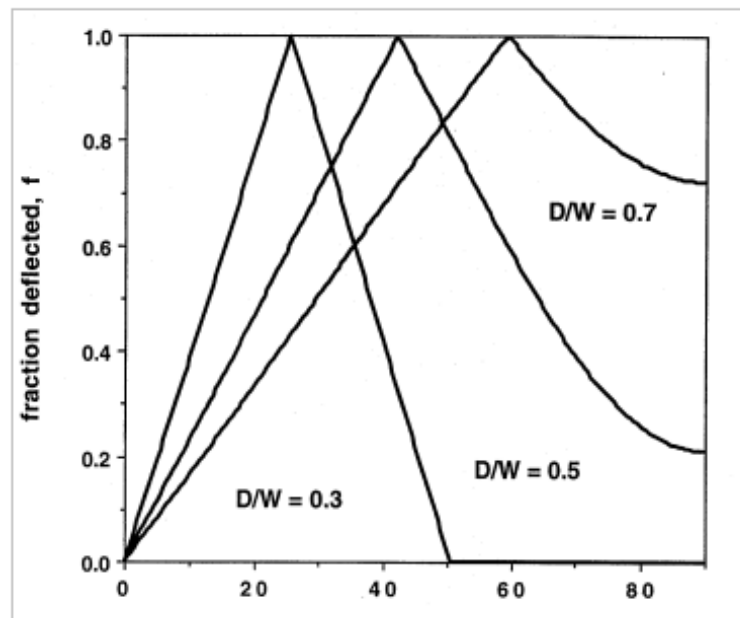


Imagen tomada de Daylight in buildings, IEA

3.6.3. Aplicaciones: Los paneles cortados por laser son utilizados como:

- Sistemas de apantallamiento de luz directa para ventanas.

Figura 30. Ventana con doble acristalamiento y LCPs



Imagen tomada de Daylight in buildings, IEA

* En la figura se puede apreciar que paneles cortados por laser de 20mm de ancho pueden ser instalados al estilo veneciano entre dos láminas de vidrio, formando de esta manera una ventana con doble acristalamiento. Este tipo de ventana de ángulo selectivo rechaza una alta porción de luz incidente mientras mantiene buenas características de visualización.

- Sistemas fijos de apantallamiento de luz directa para ventanas (fijos o móviles).

Figura 31. Paneles cortados por laser en una ventana articulada (parte superior de la figura)



Imagen tomada de Daylight in buildings, IEA

- Sistemas de re dirección y apantallamiento de luz directa para ventanas (en lamas o en forma de persiana veneciana).

Figura 32. Páneles cortados por laser en disposición de persianas venecianas.

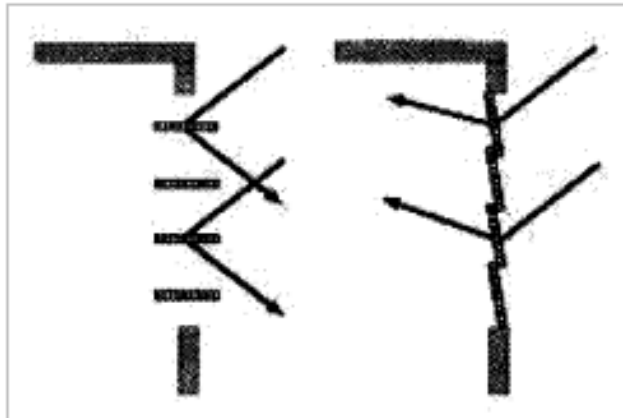


Imagen tomada de Daylight in buildings, IEA

* Páneles cortados por laser funcionando en disposición de persianas venecianas pueden ser ajustados a la apertura durante el verano para rechazar luz, o al cierre durante el invierno para admitir luz.

3.6.4. Control: Los páneles cortados por laser son usualmente instalados como un segundo cristal interno en ventanas o tragaluces. Cuando estos páneles son instalados como un cristal interno en ventanas tipo marquesina, los ángulos de elevación de la ventana definen la profundidad de la luz al interior de la habitación, es decir, a mayores ángulos de elevación se consiguen mayores profundidades de penetración de luz y viceversa. Estos ángulos pueden ser ajustados continuamente para obtener una óptima penetración de luz.

3.6.5. Mantenimiento: Como los páneles están fijos dentro de una unidad de doble acristalamiento no requieren un mantenimiento diferente a la limpieza de los vidrios que componen el sistema.

3.6.6. Costos y ahorro de energía: El costo de los paneles es de aproximadamente 130 euros por metro cuadrado para áreas pequeñas (menores de 20 metros cuadrados), para áreas grandes el costo se aproxima a 100 euros el metro cuadrado. Los ahorros de energía dependen de la aplicación. Por ejemplo paneles cortados por laser fijados o instalados en la mitad superior de una ventana puede incrementar la luz natural del 10 al 30 por ciento dependiendo de las condiciones exteriores. Si los paneles pueden ser proyectados hacia el exterior de la ventana, el agrupamiento de luz y la penetración de esta puede incrementar drásticamente el ahorro.

3.7. CLARABOYA DE ÁNGULO SELECTIVO - “ANGULAR SELECTIVE SKYLIGHT”

Figura 33. Claraboya de ángulo selectivo

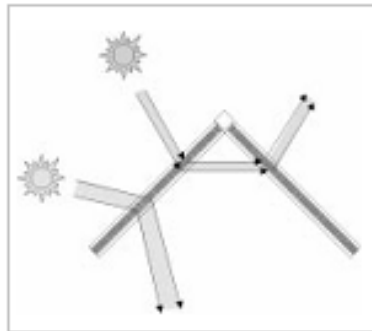


Imagen tomada de Daylight in buildings, IEA

La claraboya de ángulo selectivo incorpora dentro de una claraboya, con forma de pirámide o en configuración de triángulo, paneles cortados por laser, que reciben parcialmente los rayos que inciden sobre la claraboya dependiendo del ángulo de incidencia.

3.7.1. Descripción Técnica: Las claraboyas de ángulo selectivo son un tipo convencional de claraboya con forma piramidal o triangular. Los paneles cortados por laser que desvían los rayos son incorporados dentro de la cubierta externa transparente formando doble acristalamiento. Este sistema trasmite más rayos para bajas elevaciones del sol y menos rayos para altas elevaciones del sol.

Los paneles de corte por laser se producen al efectuar cortes finos sobre un delgado panel de acrílico. Cuatro paneles, constituyen una forma triangular en el interior de una claraboya con forma piramidal. Usualmente los paneles son cortados a partir de 6mm de espesor con un espaciamiento de 4mm entre cortes. Los ángulos útiles de inclinación de paneles en relación al lucernario están en un rango de 45 y 55 grados para trópicos y subtropicos donde es primordial el rechazo de los rayos provenientes de altas elevaciones del sol sobre el cielo. Para latitudes altas en donde es más importante la admisión de los rayos para bajas elevaciones del sol es recomendable una inclinación para los paneles en un rango de 25 a 35 grados.

3.7.2. Principio de funcionamiento: Las claraboyas o tragaluces convencionales permiten una fuerte penetración de luz para altas elevaciones del sol y una baja penetración de luz para bajas elevaciones del sol. La configuración piramidal por el contrario desvía los rayos provenientes del sol cuando se encuentra en bajas elevaciones sobre el cielo. Generalmente cuando la configuración piramidal supera los 45°, los rayos provenientes de altas elevaciones se reflejan de un panel a otro sin penetrar en la habitación (A), por otro lado, cuando los rayos provienen de otros angulos al pasar por el panel son re direccionados al interior de la habitación (B).

Figura 34. Claraboya con ángulo selectivo.

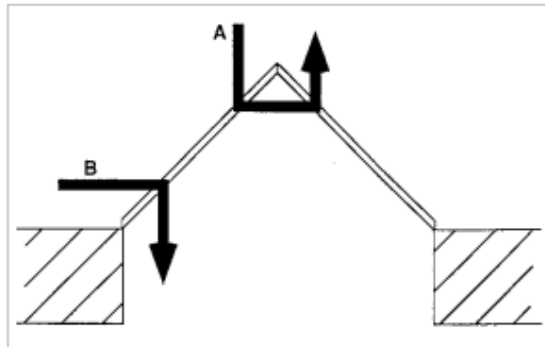


Imagen tomada de Daylight in buildings, IEA

* En esta claraboya los rayos solares provenientes del cenit (A) son rechazados, mientras, que los rayos del sol provenientes del horizonte (B) son desviados hacia el interior.

El funcionamiento detallado de claraboyas de ángulo selectivo depende del espaciamiento de los cortes, el ángulo de inclinación de la pirámide, la profundidad de la claraboya, la hora del día, la estación y las condiciones del cielo.

3.7.3. Aplicaciones: Las claraboyas de ángulo selectivo son especialmente adecuadas para edificios con buena ventilación, aire acondicionado, amplia superficie en el techo y con un ángulo de inclinación bajo, como por ejemplo supermercados y escuelas.

3.7.4. Control: Claraboyas de ángulo selectivo son siempre usadas como sistemas fijos; su transmitancia, que depende del ángulo, genera un control dependiente del tiempo de irradiancia al interior del edificio.

3.7.5. Mantenimiento: No requiere mantenimiento más allá del mantenimiento de la claraboya.

3.7.6. Costos y ahorros de energía: Una claraboya de ángulo selectivo es esencialmente una claraboya convencional de doble acristalamiento con adición de panel cortado por laser en medio. El costo en adicional se puede calcular sobre la base de 100 euros por metro cuadrado para el panel cortado por laser. Normalmente el costo de instalación de una claraboya piramidal convencional oscila alrededor de los 500 euros, mientras que el costo de instalación de una claraboya de ángulo selectivo oscila alrededor de 600 euros.

Los ahorros de energía pueden ser significativos debido a que este tipo de tecnología previene el sobrecalentamiento de la edificación. Iluminación eléctrica también puede ser reducida con respecto a los edificios sin claraboyas.

3.8. “LIGHT- GUIDING SHADES”

Figura 35. “Light guiding shade”

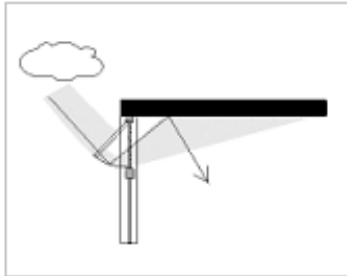


Imagen tomada de Daylight in buildings, IEA

Un “*light guiding shade*” es un sistema externo de apantallamiento que redirecciona la luz natural directa y difusa sobre el techo de una edificación.

3.8.1. Descripción técnica: Un “*light guiding shade*” está conformado por un vidrio difusor en la abertura y dos reflectores que son diseñados para direccionar

la luz difusa desde la abertura al interior del edificio dentro de un rango angular especificado. Usualmente el rango angular para la distribución de luz al interior del edificio se extiende desde la horizontal hasta un ángulo de elevación cercano a 60°. “El *light guiding shade*” se fija en una ventana al igual que un sistema de apantallamiento externo; protegiendo de esta forma la ventana de los rayos directos del sol.

La producción de un “*light guiding shade*” es más complicada, debe ser definida de forma más precisa que las contraventanas que producen sombra. Materiales altamente reflectantes como aluminio de acabado brillante se debe utilizar para las superficies interiores de este sistema.

3.8.2. Principios de funcionamiento: este tipo de sistema fue diseñado para mejorar la iluminación natural al interior de habitaciones en edificios subtropicales, estos sistemas también son adaptados en el exterior de edificios para reducir la ganancia de calor radiante a través de la ventana. Por tanto, su rendimiento en iluminación natural debe ser medido en relación a una ventana con sombra y no a una ventana sin ningún tipo de sistema adaptado.

La luz que ingresa al sistema proviene de una gran variedad de direcciones. Sin embargo, la abertura a la entrada del sistema es para luz difusa, lo cual hace que sea eliminada la dependencia de los rayos de luz a la entrada del sistema. Debido a que la luz que entra en la abertura es difusa es posible utilizar los principios de “*non-imaging optics*” para diseñar los reflectores guía de luz y así lograr que los ángulos de salida estén exactamente definidos dentro de un rango. Este rango puede ser tan amplio o tan estrecho como se necesite. Una salida angular en un rango estrecho requiere una guía de luz reflectiva larga y una pequeña proporción de aberturas de entrada y salida. Por consiguiente para un rango de salida estrecho, el sistema es capaz de recopilar sólo una pequeña fracción de luz incidente sobre la sombra producida por el sistema; el resultado es un potencial de

ahorro pequeño en iluminación natural. El mayor compromiso debe estar hecho entre la precisión de los rayos dirigidos al interior de la habitación y la cantidad de luz que quiera ser dirigida.

3.8.3. Control: El control de dirección de la luz está fijo en una posición. El control de dirección de luz se consigue mediante principios de óptica.

3.8.4. Mantenimiento: Comprende la limpieza ocasional de los cristales a la entrada del sistema.

3.8.5. Costos y ahorros de energía: El costo para este tipo de sistema debe ser comparado con el costo de un sistema equivalente de sombreado. Los costos de fabricación son más elevados que los costos de sombreado convencional debido a la forma precisa y de alta reflectancia de las superficies requeridas. Sin embargo, la instalación y los costos de mantenimiento son similares, y el rendimiento de la iluminación natural es muy superior a los sistemas de sombreado convencionales.

Existe un beneficio considerable energético para este tipo de sistema. Los sistemas convencionales externos de sombreado reducen significativamente la entrada de luz natural y son diseñados para rechazar toda la luz solar directa. Típicamente el promedio de luz natural en un cuarto con una ventana de fuerte sombreado es menor a 50 lux. Bajo condiciones de cielo despejado, un "*light guiding shade*" puede producir una iluminancia en un plano de trabajo de más de 1000 lux a una profundidad de 5 metros en una habitación. Bajo condiciones de cielo nublado el promedio de iluminancia obtenida puede ser de 250 lux. Este ejemplo ilustra las posibles ganancias para este sistema. En la práctica las ganancias dependen de la forma, el tamaño de la ventana, la pendiente, la reflectancia del techo, las paredes, el suelo, el tipo de vidrio que lleva la ventana y las condiciones ambientales.

3.9. “SUN DIRECTING GLASS”

Figura 36. “Sun directing glass”

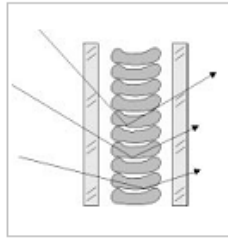


Imagen tomada de Daylight in buildings, IEA

Son elementos cóncavos de acrílico apilados verticalmente dentro de una unidad de doble acristalamiento, que redirigen la luz solar directa desde todos los ángulos de incidencia hacia el techo.

3.9.1. Descripción técnica: El principal componente para este sistema es una unidad sellada de doble acristalamiento que contiene los elementos de acrílico. Esta unidad sellada se sitúa principalmente por encima de las ventanas que proporcionan una visualización exterior. Un patrón sinusoidal sobre la superficie interior de la ventana puede ser utilizado para difundir luz a la salida, dentro de un estrecho ángulo horizontal, acimutal. Una película holográfica en el cristal exterior también se puede utilizar para dirigir la luz natural hacia un ángulo horizontal estrecho.

Una parte importante de este sistema es el techo dado que recibe la luz y la refleja hacia las zonas donde se realizan tareas. Elementos reflectivos inclinados pueden ser usados para concentrar los rayos reflejados hacia áreas específicas de trabajo. Un techo con color blanco mate funciona bien para redirigir la luz, sin embargo la iluminación resultante será difusa.

Los elementos cóncavos de acrílico se producen por extrusión. Estos se apilan y se colocan uno tras otro en una unidad de doble acristalamiento.

3.9.2. Principios de funcionamiento: este sistema desvía la luz en el plano horizontal y en el plano vertical. Así, la luz puede llegar a la profundidad de un espacio para todas las posiciones del sol sin la necesidad de partes móviles en la fachada del edificio. La desviación vertical es lograda a través de elementos acrílicos. La desviación horizontal es lograda por medio de elementos holográficos o por una superficie acristalada sinusoidal.

- ✚ **Desviación vertical:** La luz que ingresa es focalizada por la primera superficie de elementos acrílicos y redireccionada por reflexión total a la superficie inferior del perfil. Estos son propagados ligeramente hacia el techo cuando salen de los elementos.

Figura 37. Sección vertical

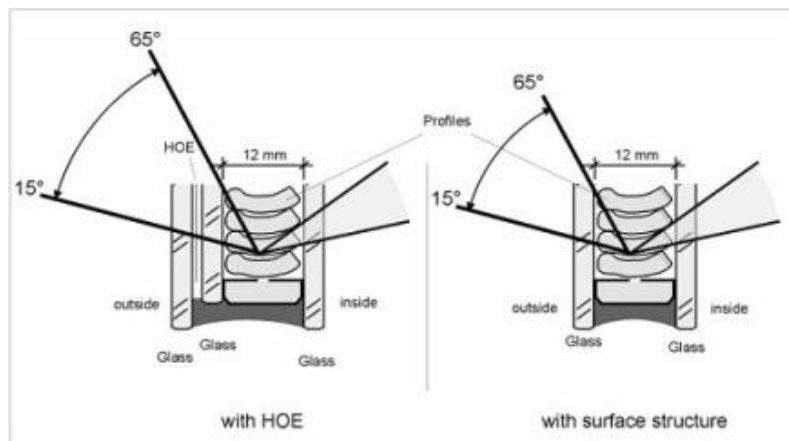


Imagen tomada de Daylight in buildings, IEA

- ✚ **Desviación horizontal:** Si se necesita esparcir la luz de manera más amplia a largo de la habitación se utilizan elementos ópticos holográficos o una cierta superficie sinusoidal en el interior del cristal puede ser usada

para desviar la luz de manera horizontal al interior de la habitación.

Figura 38. Sección horizontal

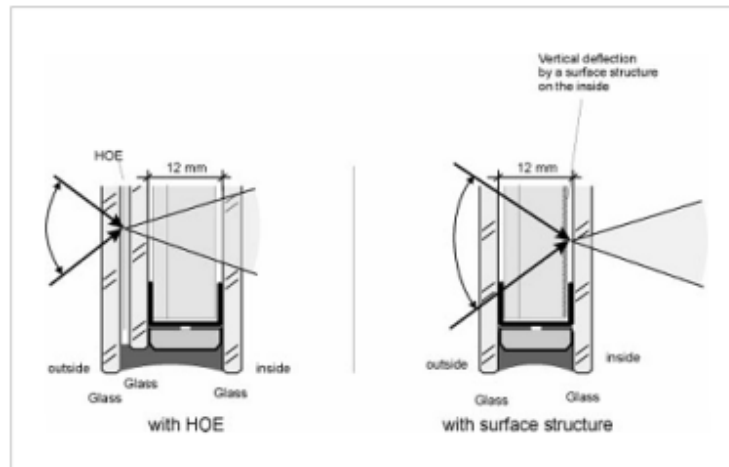


Imagen tomada de Daylight in buildings, IEA

3.9.3. Aplicaciones: El sistema es diseñado para uso con luz de sol directa. Dependiendo de la orientación de una fachada se puede sacar mayor o menor provecho de luz solar directa proveniente de los rayos del sol. El sistema también desvía luz difusa, sin embargo, el nivel de iluminancia es mucho menor que con luz solar directa. Los perfiles de elementos acrílicos son diseñados para latitudes específicas. La inclinación óptima del sol para el mejor funcionamiento de este sistema se encuentra entre los 15 y 65 grados respecto del panel como lo muestra en la figura 37. En regiones tropicales donde el sol alcanza inclinaciones elevadas en el cielo el sistema debe ser instalado con un ángulo vertical inclinado para un mejor re direccionamiento de luz. En este caso la geometría de los elementos debe ser cambiada para prevenir el deslumbramiento.

3.9.4. Control: Este sistema no incluye partes móviles o articuladas, por tanto no es necesario hacer ningún control sobre el sistema.

3.9.5. Mantenimiento: Este tipo de sistema es instalado dentro de dos paneles de vidrio, es por eso que solo la limpieza de las superficies de vidrio es el único mantenimiento que necesita este tipo de sistema.

3.9.6. Costos y ahorros de energía: La diferencia de precios entre un “sun directing glass” y un sistema estándar de doble acristalamiento oscila cerca de los 200 euros por metro cuadrado (para el elemento que direcciona los rayos del sol).

3.10. UNIDAD DE DOBLE ACRISTALAMIENTO CON ELEMENTOS ÓPTICOS HOLOGRÁFICOS PARA GUÍA DE LUZ CENITAL

Figura 39. “Zenithal light guiding glass”.

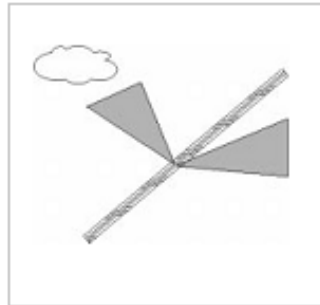


Imagen tomada de Daylight in buildings, IEA

Este sistema re direcciona la luz difusa al interior de una habitación.

3.10.1. Descripción técnica: El componente principal del sistema es una película polimérica que posee una red de difracción holográfica laminada entre dos paneles de vidrio. El elemento holográfico re direcciona luz difusa al interior del edificio desde la región cenital del cielo. Este sistema solo puede ser usado en fachadas que no estén expuestas a los rayos directos del sol, debido a que el sistema puede causar dispersión del color cuando sobre él se proyectan este tipo de rayos.

Este sistema es logrado cuando una película holográfica es expuesta a un patrón de interferencia de dos rayos laser. Posteriormente este patrón se fija en la película como una variación periódica del índice de refracción. Esta película es fijada dentro de dos páneles de vidrio para una estabilidad mecánica y protección contra humedad.

3.10.2. Principio de funcionamiento: El nivel de iluminancia de la región cenital del un cielo nublado es normalmente mucho mayor que el nivel de iluminancia de la región horizontal del cielo, este sistema es una muy buena estrategia para climas predominantemente nublados, donde la luz proveniente de la región cenital es re direccionada al interior de un cuarto. Una inclinación de 45° del elemento sobre la fachada incrementa la exposición de este al cielo, causando así una mayor cantidad de luz re direccionada al interior de la habitación (ver figura 40). Es por esto que este tipo de sistema es especialmente apropiado para edificios con obstrucciones externas.

Figura 40. Ejemplo de aplicación de un sistema "zenithal ligth guiding glass".

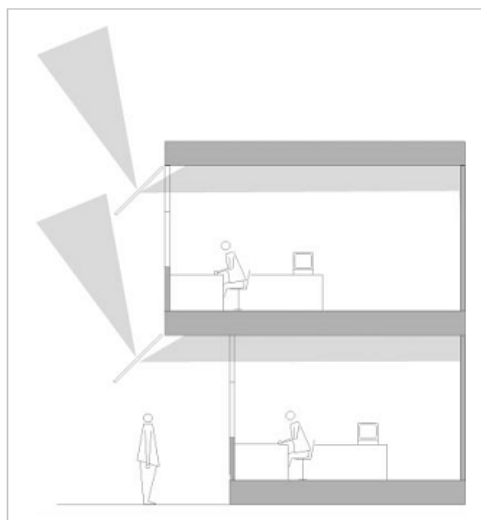


Imagen tomada de Daylight in buildings, IEA

La luz que incide desde un área específica del cielo es difractada por la red con el índice de refracción de la película holográfica y guiada de esta forma al interior de la habitación.

3.10.3. Aplicaciones: Este tipo de sistema debe ser integrado en la envolvente del edificio, lo cual implica que debe estar concebido desde el diseño arquitectónico del edificio. Tiene sus principales aplicaciones en edificios donde la visión del cielo está muy obstruida y en climas donde el cielo posea altas luminancias.

3.10.4. Control: Este es un sistema fijo por lo que no requiere de ningún tipo de control.

3.10.5. Mantenimiento: No necesita un mantenimiento diferente a la limpieza.

3.10.6. Costos y ahorro de energía: Este tipo de sistema fue instalado por primera vez en julio de 1996. El costo para los elementos fue cercano a 900 euros por metro cuadrado.

3.11. SISTEMA DE APANTALLAMIENTO SELECTIVO DIRECCIONAL USANDO ELEMENTOS ÓPTICOS HOLOGRÁFICOS (HOEs)

Figura 41. Directional selective shading systems using holographic optical elements

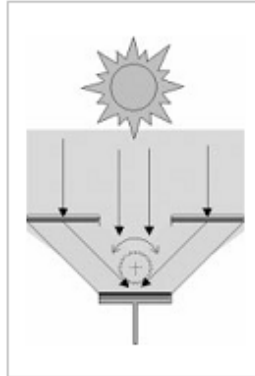


Imagen tomada de Daylight in buildings, IEA

Este sistema rechaza la luz incidente de una pequeña área angular de la bóveda celeste. De esta manera el sistema puede re direccionar o rechazar rayos provenientes del sol mientras trasmite luz difusa hacia otras direcciones. Este apantallamiento selectivo proporciona luz natural al interior de edificios sin alterar la vista exterior de las ventanas.

3.11.1. Descripción Técnica: Una red de difracción holográfica incrustada en una lámina de vidrio puede ser usada de dos formas diferentes y proporcionar un control de apantallamiento para grandes superficies acristaladas.

En sistemas *de apantallamiento transparentes* el elemento óptico holográfico es diseñado para reflejar la luz solar directa incidente dentro de un rango angular relativamente pequeño, normal a la superficie. Si el vidrio que incorpora estos elementos se hace girar para seguir el sol, el espacio interior sería eficazmente protegido de este tipo de rayos, mientras, que los rayos incidentes desde otros ángulos penetrarían al interior del sistema.

En los *sistemas concentradores de luz solar* los elementos holográficos son diseñados para re direccionar y concentrar luz directa del sol en líneas opacas sobre un segundo conjunto de elementos de vidrio. En estos elementos la luz del sol es recibida y absorbida para su posterior conversión en electricidad o energía térmica.

Este diseño permite la construcción de un sistema de apantallamiento que bloquea luz directa del sol, mientras, que se hace transparente a la luz difusa. Este tipo de sistema permite una vista exterior al observador.

En ambos diseños el conjunto de elementos de apantallamiento tienen que seguir la trayectoria del sol para lograr un apantallamiento óptimo, es así, como un sistema de seguimiento de un solo eje es necesario.

Los elementos críticos para este tipo de sistema son las películas holográficas. Estas películas holográficas son expuestas a un patrón de interferencia de dos rayos laser. Posteriormente este patrón se fija en la película como una variación periódica del índice de refracción. Esta película es fijada dentro de dos paneles de vidrio para lograr una estabilidad mecánica y protección contra humedad.

3.11.2. Principios de funcionamiento:

- ✚ **Sistemas de apantallamiento transparentes:** Los rayos de luz incidente dentro del rango angular activo son re direccionados por el HOE en un ángulo muy oblicuo hacia la parte trasera de la capa de vidrio laminado, luego, el rayo rebota en la superficie trasera del vidrio por medio de la reflexión total interna, la capa holográfica vuelve a redirigir el rayo hacia la superficie frontal. El elemento holográfico es inactivo para todos los otros ángulos de incidencia, la luz difusa puede penetrar el HOE al interior del sistema ubicado en medio de las láminas de vidrio. La vista al exterior del

edificio no es significativamente alterada por el elemento holográfico. Para que el sistema funcione con la máxima eficacia, el panel de vidrio debe realizar un seguimiento del sol a lo largo del día.

- ✚ **Sistemas concentradores de luz del sol:** En este sistema el elemento óptico holográfico re direcciona la luz directa del sol incidente normal sobre una superficie inferior de vidrio u otro material. La figura 42 ilustra este sistema para una mejor comprensión.

Figura 42. Sistema concentrador de luz solar.

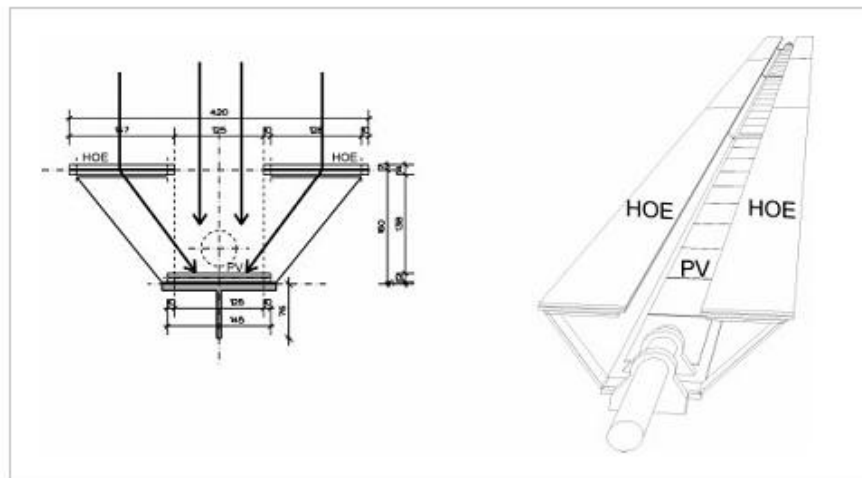


Imagen tomada de Daylight in buildings, IEA

De esta forma la radiación solar directa es bloqueada, sin embargo, y como se menciona anteriormente el elemento holográfico es inactivo o transparente para otros ángulos de incidencia, por otro lado, luz difusa puede penetrar al interior del edificio y así iluminar los espacios interiores. La vista exterior en este caso se reduce en las franjas opacas del sistema (entre el 30 % y el 50 % del área del vidrio).

3.11.3. Aplicaciones: Los elementos ópticos holográficos están diseñados para ser usados como un sistema de apantallamiento transparente, que permita la penetración de luz difusa para propósitos de iluminación y una buena vista exterior mientras bloquea los intensos rayos directos del sol. Estos elementos son aplicables en grandes zonas acristaladas, pero son más convenientes en zonas donde el deslumbramiento o el sobrecalentamiento provocado por los directos rayos del sol son un inconveniente. Mientras muchos sistemas de apantallamiento operables opacos están comercialmente disponibles, estos sistemas de apantallamiento transparentes tienen la ventaja potencial de mantener un alto grado de transparencia en la estructura general del edificio y un buen control solar. Estos pueden ser instalados para rotar sobre un eje vertical u horizontal, ya sea sobre una fachada vertical o sobre un techo de vidrio. Efectos de color pueden ser causados por la dispersión de los rayos en el elemento óptico holográfico.

Sistemas concentradores de luz utilizan elementos opacos para bloquear la luz solar directa. Los elementos opacos pueden reflejar directamente la luz o puede ser absorbida para posibles conversiones térmicas o eléctricas (en el caso de paneles solares).

3.11.4. Control: En los sistemas que utilizan elementos ópticos holográficos que se mencionan anteriormente es necesario seguimiento del sol para su correcto funcionamiento. El seguimiento normalmente se realiza por un sistema automático controlado por computadoras similares a los sistemas que operan normalmente en persianas motorizadas.

3.11.5. Mantenimiento: En el mantenimiento de los elementos de vidrio solo es necesaria la limpieza frecuente, la experiencia pasada ha demostrado que el mantenimiento electromecánico de sistemas que involucran el movimiento de un gran número de paneles de vidrio es a menudo tedioso.

3.11.6. Costos y ahorro de energía: El costo de los sistemas sombreado de dirección selectiva es alto, debido a que los elementos holográficos todavía no son producidos en altos volúmenes y los sistemas de seguimiento son complejos y costosos. El costo de los primeros sistemas instalados se encuentran alrededor de 1,500 euros por metro cuadrado de sistema completo, incluyendo el costo del montaje y de los sistemas de seguimiento. Cifras confiables de los ahorros de energía aun no están disponibles.

3.12. “ANIDOLIC CEILINGS”

Figura 43. “Anidolic ceilings”

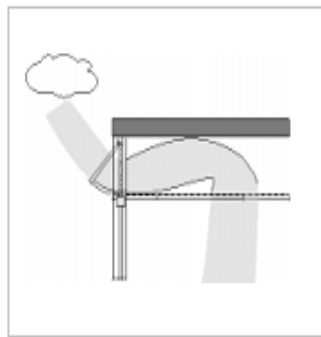


Imagen tomada de Daylight in buildings, IEA

Este sistema utiliza las propiedades ópticas de los concentradores parabólicos para recoger luz natural difusa del cielo. El concentrador es conectado a un ducto con superficie especular situado por encima del plano del techo, trasportando de esta manera luz hacia la parte interior de la habitación. El principal objetivo es adecuar con luz natural habitaciones que se encuentren bajo cielos en condición predominantemente nublados.

3.12.1. Descripción técnica: Este tipo de sistema consiste en un colector de luz natural óptico acoplado a un ducto de luz suspendido en la parte interior del techo. El sistema está diseñado para iluminación lateral de edificios no residenciales.

Elementos ópticos anidolíticos son colocados en ambos extremos del ducto de luz. Sobre la parte exterior de un edificio un concentrador óptico anidolítico captura y concentra luz difusa proveniente de la zona superior de la bóveda del cielo (suele ser el área más brillante del cielo). Al terminar el ducto un reflector parabólico distribuye la luz hacia la parte interior de la habitación. La luz natural es transportada a determinada profundidad por medio de reflectores especulares que están dentro del ducto de luz, ocupando la mayor parte del área sobre el techo. Para los días soleados la penetración de los rayos del sol puede ser controlada por un mecanismo que puede ser situado en puntos estratégicos del sistema.

3.12.2. Principios de funcionamiento: Los principios de óptica de “non imaging” ha establecido una metodología fiable, eficiente para el diseño de concentradores solares, que casi ha alcanzado el límite teórico de concentración solar (46 000 dictado por la ley de la termodinámica). Principios ópticos similares pueden ser usados para desarrollar sistemas que maximicen el uso de la luz solar difusa proveniente de la bóveda celeste. Las características de tales sistemas incluyen:

El paquete de rayos de luz que está delimitado por θ y θ' (dado por los parámetros de diseño) que son totalmente transmitidos a la abertura exterior.

El número de reflexiones se puede minimizar con un diseño adecuado. (Lo que explica la alta eficiencia óptica lograda por el sistema).

Una selección exacta de los rayos que penetran a la entrada del sistema, así como el control exacto de los rayos emergentes en la abertura de salida podrían ser seleccionados.

Figura 44. Esquema en dos dimensiones de un sistema anidolico no simétrico

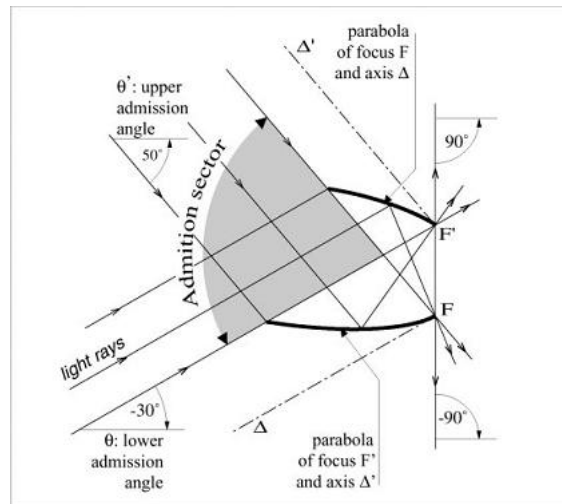


Imagen tomada de Daylight in buildings, IEA

Debido a que el sistema se basa en la reflexión de una superficie altamente reflectante, no se introduce ninguna dispersión óptica, incluso con luz solar directa. El sistema fue desarrollado basado en los siguientes principios:

Un colector de luz natural anidolico fue diseñado y localizado en frente a la guía de luz para recolectar y concentrar la luz natural a la entrada del ducto.

Otros dispositivos anidolicos son instalados al finalizar el ducto y tienen por objeto distribuir el flujo de luz natural al interior de la habitación, con el fin de evitar molestias visuales.

Cuando el cielo es la fuente de luz, la concentración de luz es esencial para el rendimiento del sistema. El factor de concentración bajo cielo nublado es 2 y 3 veces menor, sin embargo es adecuado para buenos niveles de iluminación natural de interiores. En el extremo final del ducto, la luz es difundida por un

dispositivo anidolico secundario que dirige el flujo de luz hacia los planos de trabajo.

3.12.3. Aplicaciones: El sistema es usado sobre fachadas verticales en edificios que se encuentran localizados en condiciones predominantemente nubladas y que tienen acceso limitado a luz solar directa, o en donde una gran parte de la fachada presenta obstrucciones. Requisitos de diseño incluyen:

La disponibilidad de luz natural debe ser eficientemente colectada desde la bóveda celeste y guiada al interior del ducto, incluso durante las peores condiciones de cielo nublado.

El riesgo por deslumbramiento se puede reducir mediante la canalización de luz día, desde la fachada al interior de la habitación, para posteriormente ser distribuida de forma convencional (como luz eléctrica).

Las dimensiones del ducto deben ser compatibles con el espacio del edificio.

La canalización en un ducto por encima del techo reduce la posibilidad de deslumbramiento no deseado. Cuando la luz solar directa es la principal fuente de luz natural, un factor de concentración alto es viable, permitiendo instalar sistemas con ductos más cortos que ocuparían menos espacio en el cielo raso. Debido a que el principal objetivo de la aplicación actual es proporcionar luz bajo condiciones de cielo nublado y con el cielo como fuente de luz difusa, se tiene que con dichas condiciones la concentración de luz es limitada en un factor de 2 o 3, requiriendo ductos de largo alcance. El presente diseño se ha optimizado bajo estas bases.

El sistema puede ser utilizado en zonas densamente urbanizadas o en áreas rurales. Este efecto relativo es más importante en el medio urbano, puesto que

obstrucciones cercanas al edificio incrementan la importancia de coleccionar luz difusa de la bóveda celeste. Este sistema puede ser utilizado tanto en cielos despejados como en cielos nublados, siempre y cuando tengan un control adecuado sobre la luz del sol.

Estos sistemas pueden ser usados en industria, comercio o edificios institucionales. Soluciones de diseño específico dependen del clima y de la latitud. La aplicación de estos sistemas a edificios en reestructuración es posible siempre y cuando la aplicación de este sistema no interfiera con otros sistemas del edificio.

3.12.4. Control: Si una persiana exterior es usada para el control directo del sol y el excesivo deslumbramiento, controles manuales o automáticos son requeridos. El sistema por sí solo no requiere ningún tipo de control.

3.12.5. Mantenimiento: El sistema básico no necesita mantenimiento. En condiciones atmosféricas normales y con una calidad del aire típica en un entorno urbano, la lluvia es suficiente para limpiar el cristal a la entrada del sistema y mantener los niveles normales de rendimiento.

El funcionamiento de un sistema como este durante tres años no ha reportado pérdidas significativas en el rendimiento.

3.12.6. Costos y ahorros de energía: Este sistema requiere costos primarios adicionales en comparación a ventanas convencionales, costos que están asociados con la creación del sistema óptico colector sobre la fachada, el espacio reflectivo de transmisión de luz y el elemento óptico emisor al final del sistema. La energía eléctrica consumida de dos oficinas de 6.6 metros de profundidad fue monitoreada y equipada con un controlador de luz regulable y suspendido en dispositivos de iluminación (dos filas de dos tubos fluorescentes de 36 watts). En una habitación se instaló un 'anidolic ceiling' (habitación de prueba) y la otra con

un sistema de fachada convencional de doble acristalamiento (habitación de referencia). Ambas fachadas no poseían sombra y estaban orientadas hacia el norte durante el periodo de seguimiento. Las dos habitaciones usaron cristales transparentes. La iluminación de espacios de trabajo (300 lux \pm 15 %) a 5 metros de la ventana fue equilibrada en las dos habitaciones por un controlador continuo de iluminación. La figura 45 mostrada a continuación indica los resultados del control de consumo de energía gastada en iluminación.

Figura 45.. Monitoreo consumo de energía para sistema convencional vs “anidolic ceiling”.

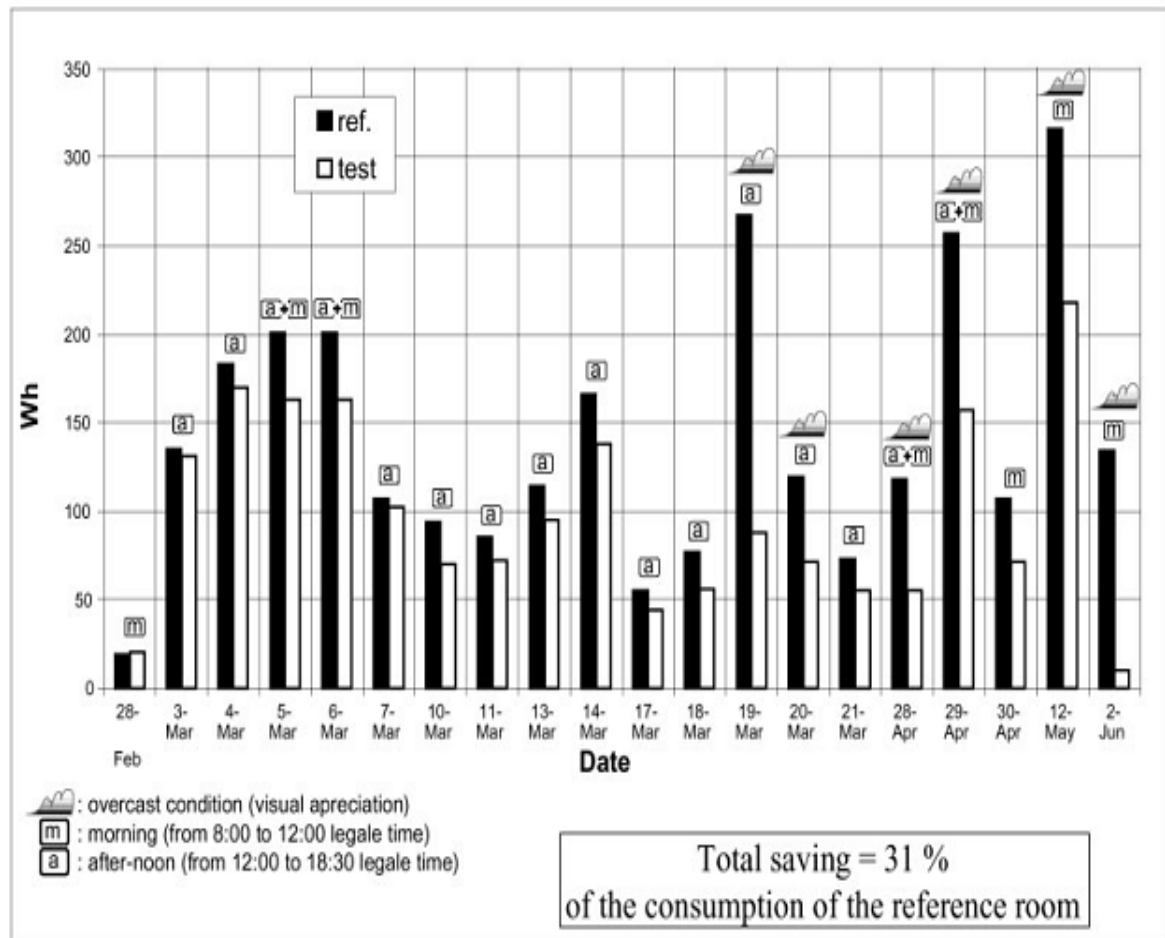


Imagen tomada de Daylight in buildings, IEA

En las pruebas efectuadas con el sistema ‘anidolic ceiling’ se logro una reducción del 31 % con respecto a la oficina de referencia convencional. Incluso un ahorro más grande podría ser esperado en una habitación más profunda.

3.13. ANIDOLIC ZENITHAL OPENINGS (ABERTURAS CENITALES ANIDOLICAS)

Figura 46. Anidolic zenithal openings

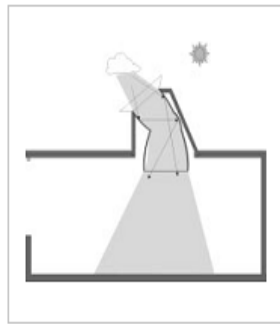


Imagen tomada de Daylight in buildings, IEA

Este sistema es un sistema basado en óptica (non imaging optics). Este dispositivo anidolico de alta selectividad angular es usado para recoger luz natural difusa de una gran parte de la bóveda del cielo sin permitir la penetración directa del sol. Esta forma de sistema de “skylighting” es mejor utilizada para proporcionar luz natural a edificios de una sola planta o en el último piso de un edificio de varias plantas.

3.13.1. Descripción técnica: Este tipo de sistemas está compuesto de un elemento concentrador óptico y un ‘desconcentrador’ o elemento emisor. El colector está basado en un concentrador parabólico cuyo eje mayor está orientado de este a oeste. La apertura es inclinada hacia el norte para ubicaciones en el hemisferio norte y diseñada para que el sector donde se admite la luz incluya todo

el cielo entre el horizonte norte y la posición más alta del sol en el cielo sur durante el año. Como se muestra en la figura 47.

Figura 47. Sector de admisión para un “anidolic zenithal openings”

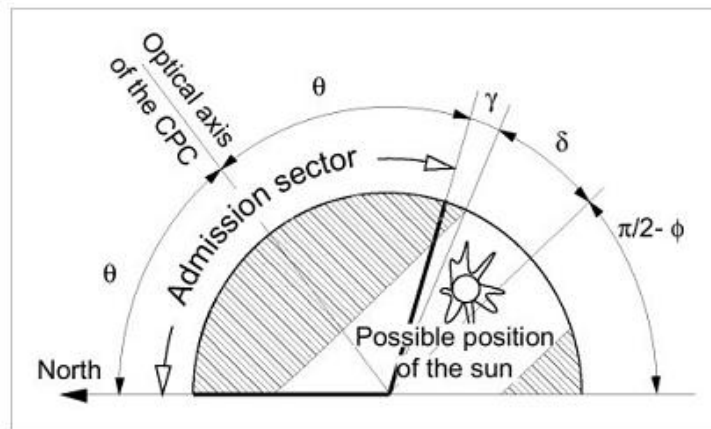


Imagen tomada de Daylight in buildings, IEA

El sol nunca llega dentro del sector de admisión, excepto al principio y al final del día, entre el equinoccio de primavera y el equinoccio de otoño. La protección solar es completada con una serie de listones verticales uniformemente colocados sobre la abertura y espaciados a 0.5 m.

EL ángulo de admisión es igual a 50, y el ángulo de inclinación, α , desde la horizontal es igual a 40. Estos ángulos de inclinación pueden ser calculados con una simple ecuación que figura en Courret [1999] y dependenn de la latitud del lugar. (47° N en este caso).

Un desconcentrador parabólico compuesto, similar al concentrador parabólico situado a le entrada del sistema pero invertido es colocado en el extremo emisor, cuya función es guiar el flujo de luz hacia el espacio interior de la habitación. La conexión entre el elemento colector (“concentrating element”) y el elemento emisor (“deconcentrating element”) se hace con una sección cilíndrica reflectiva. El

dispositivo en conjunto puede ser observado en la figura 48. La salida del ángulo del dispositivo θ_d es igual a 40° y es truncado a 45° para reducir su longitud. La abertura cenital anidolica no constituye una fuente de deslumbramiento para los usuarios del edificio bajo circunstancias normales. Con el fin de evitar que los reflectores acumulen polvo el dispositivo está encerrado entre dos capas de vidrio.

Figura 48. Sección transversal de un "anidolic zenithal openings"

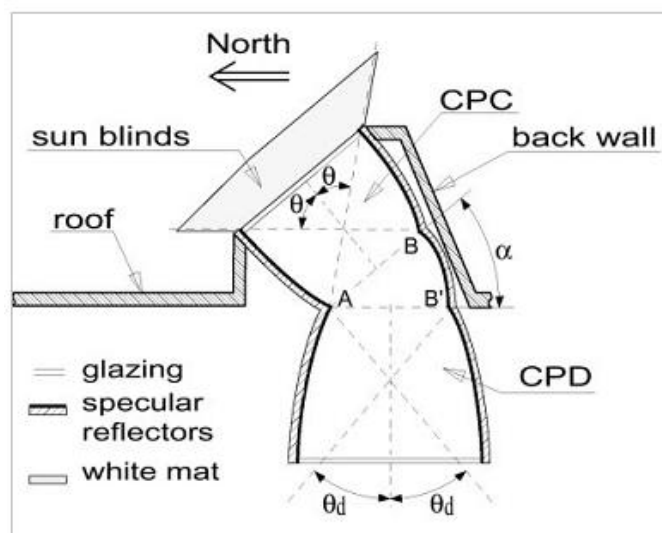


Imagen tomada de Daylight in buildings, IEA

Las superficies reflectoras son laminas de aluminio anodizado (reflectancia especular de 0.9) que se colocan en forma de marcos de madera u otros materiales estructurales.

3.13.2. Principio de funcionamiento: El diseño del sistema es basado en óptica ("non imáging optics") y es similar al diseño de cualquier sistema de iluminación natural anidolico. Una descripción más detallada de los principios ópticos subyacentes se presenta en el sistema anteriormente mencionado.

3.13.3. Aplicaciones: Este tipo de sistema está diseñado para aplicaciones en el techo de una edificación, al igual que cualquier otra abertura en el techo orientada hacia el norte (en el hemisferio norte), este dispositivo tiene la ventaja de proporcionar luz natural que es débilmente dependiente a cambios en la distribución de luminancia del cielo como resultado de movimiento de las nubes o el sol. Debido que la luminancia de salida no varía tanto como las de los sistemas de admisión de luz solar directa, la apertura cenital anidolica proporciona menos brillo y mayor confort visual. Por tanto, debe hallar gracia donde no estén claros los espacios interiores y el confort visual sea esencial (por ejemplo pabellones deportivos, museos y mercados entre otros).

3.13.4. Control: Este tipo de sistema proporciona una protección eficaz contra la radiación solar directa sin utilizar piezas móviles. Esta protección se ha demostrado en pruebas de modelos a escala.

3.13.5. Mantenimiento: Debido a que este sistema no cuenta con partes móviles y a que la transmisión de imágenes no es problema, no tiene problemas de mantenimiento en particular. Bajo condiciones atmosféricas normales las precipitaciones son suficientes para limpiar los cristales a la entrada del sistema.

3.13. 6. Costos y ahorro de energía: En climas templados las condiciones de cielo nublado se producen con frecuencia sobre todo en invierno, primavera y otoño. En estas condiciones un factor de luz natural adecuado es necesario para conseguir ahorros de energía en iluminación. La eficiencia y la optimización de la transmisión de luz no deben tener prioridad sobre el confort visual y térmico. Este tipo de sistemas es comparado usando simulaciones computacionales con dos tipos de sistemas convencionales de “skylights” : vidrios difusores horizontales y techos con acristalamiento en diente de sierra. “daylighting autonomy” (autonomía iluminación natural) fue calculada para diferentes radios de apertura y para diferentes puntos de set (iluminación horizontal promedio) en cada uno de los tres

sistemas. “Daylighting autonomy” es denominado el porcentaje de tiempo donde el cielo nublado es lo suficientemente brillante para que la iluminación eléctrica pueda ser sustituida por iluminación natural durante las horas de trabajo (8:00 a 18:00). Si se multiplica el parámetro anteriormente descrito por la frecuencia de tiempo en las condiciones de cielo nublado y el consumo de energía en iluminación, se obtiene una estimación del consumo anual de energía en iluminación. Los resultados se pueden observar en la tabla 10 que se muestra seguidamente. Para lograr una iluminación de 500 lux con una autonomía de 50 %, un radio de apertura del 30 % del área del techo es requerido con el sistema denominado en la tabla “shed with blind” mientras que con el sistema “anidolic openings” solo es necesario el 15 % del área total del techo.

Tabla 10. “Daylighth autonomy” para 3 sistemas de iluminación natural.

opening ratio (%)	10			15			20			25			30			35			40		
Shed with blinds	10	0	0	45	5	0	60	25	0	65	40	5	75	50	20	80	60	35	82	65	45
Shed without blinds	30	0	0	60	25	0	70	45	10	80	60	30	82	65	45	84	72	55	85	75	60
Anidolic systems	55	20	0	74	52	25	82	65	45	85	75	65	87	80	65	88	82	72	89	84	75




lighting need:  300 Lux  500 Lux  750 Lux

Tabla tomada de Daylight in buildings, IEA

3.14. TUBOS SOLARES - “SOLAR TUBE”

Figura 49. Tubo solar



Imagen tomada de Daylight in buildings, IEA

Como se puede apreciar en la ilustración el principio fundamental que rige este sistema es la reflexión especular, lo cual hace posible la transmisión de radiación (luz) a espacios interiores. Propiedades ópticas del domo ubicado a la entrada del sistema aumenta la captación de rayos al interior de este, proporcionando cantidades apreciables de lúmenes que pueden ser utilizadas para el desarrollo de distintas actividades. Este tipo de sistemas funciona preferiblemente en edificios de una sola planta o en el último nivel de un edificio de varias plantas.

3.14.1. Descripción Técnica: Este tipo de sistema está compuesto por 3 zonas claramente diferenciadas que son:

- Zona de captura de luz
- Transmisión de luz
- Zona de difusión de luz

La zona de captación está formada por un domo o burbuja elaborados en base a materiales con propiedades que faciliten la captación o redirección de los rayos provenientes de la bóveda celeste. El material más utilizado para la fabricación de estos domos es el acrílico dada su buena resistencia al impacto y a las condiciones de intemperie. La zona de transmisión está conformada por un cilindro fabricado con materiales altamente reflectivos y que presenta en su superficie interior acabados especulares en superficies reflectivas expuestas. La salida del sistema está conformada por difusores que presentan propiedades óptimas para la difusión de luz.

A continuación se muestra una representación visual de cada zona del sistema.

Figura 50. Domo o zona de captación

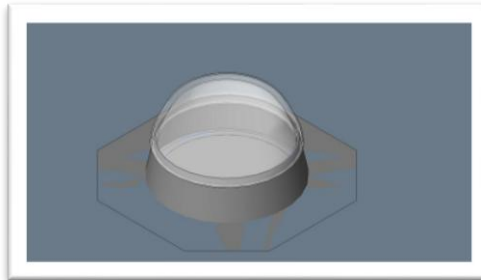


Figura 51. Zona de transferencia



Figura 52. Sistema domos tubulares integrado



3.14.2. Principio de funcionamiento: Esta sección será abordada con la definición para tubos de luz.

Un tubo de luz es un dispositivo diseñado para transportar luz desde una fuente de luz a algún punto o a una distancia con pérdidas mínimas, la luz es transmitida a través de una guía por medio de reflexión interna total. Los tubos de luz son usualmente hechos de materiales altamente reflectivos tales como: resinas acrílicas, policarbonatos, vidrio entre otros. Una guía de luz puede ser usada para transmitir luz natural desde el exterior hasta el interior de una edificación.

El domo, principal componente del sistema también conocido como zona de captura, como su nombre lo indica la principal función de este componente es captar rayos luminosos provenientes de la bóveda celeste (luz directa o difusa). En algunos casos la forma para este componente varía, es decir, existen sistemas

que utilizan domos en esta zona, mientras, que en otros la zona de captación consta de una superficie plana. Cabe mencionar que cuando se utiliza domo pueden ampliarse las posibilidades para esta zona, pues modificaciones en la superficie del domo podría aumentar la captura de rayos.

Dada la ubicación que tienen este tipo de sistemas sobre las edificaciones es necesario que los materiales que constituyen la zona de captura posean propiedades como: resistencia al impacto, translucidez, resistencia a la intemperie entre otros. En la actualidad los principales materiales utilizados en este tipo de zonas son derivados de polímeros tales como: policarbonato y acrílico.

Como se menciono anteriormente sobre la superficie del domo se pueden incorporar otros tipos de tecnologías que añadan beneficios a la zona de captura, por ejemplo, filtros para rayos UV disminuyen las cargas térmicas en las edificaciones, sistemas para redirección de rayos en bajas elevaciones del sol hacen el sistema más eficiente, entre otros.

La zona de transferencia, tiene función principal el transporte de rayos lumínicos con mínimas pérdidas. La importancia de la zona de transferencia radica en que las superficies especulares posean índices de reflexión elevados.

Para una mejor comprensión del concepto anteriormente citado a continuación se realiza una breve explicación.

- ✚ **Reflexión especular:** Se define cuando el ángulo de incidencia es igual al ángulo de reflexión $\theta_i = \theta_r$. En este tipo de reflexión los rayos son reflejados sin pérdidas. En el capítulo 1 se abordó este ítem.

Otro aspecto a destacar en el diseño de la zona de transferencia es la predicción sobre la trayectoria seguida por los rayos al interior de dicha zona. La técnica más comúnmente usada para obtener este tipo de predicción es conocida como trazado de rayos, explicada como sigue.

- ✚ **Trazado de rayos:** Es una técnica usada para predecir la trayectoria de los rayos de luz, dentro, a través y/o fuera de la guía de luz. Los principios de la ley de Snell, pérdidas de Fresnell y reflexión especular se aplican a la interface de la superficie guía con el aire para determinar la dirección de los rayos de luz. El trazo de los rayos es usado en esta breve aplicación para evaluar el desempeño de los diseños de las guías de luz.

La zona de difusión, esta zona es la encargada de difundir luz proveniente de la zona de transmisión. El diseño de este componente debe estar orientado hacia la obtención una buena iluminación homogénea. Los principales materiales para su fabricación son: vidrio, derivados de polimeros como acrilicos, entre otros.

Los principios físicos utilizados para esta componente del sistema son: transmisión difusa y óptica para luz difusa (non imaging optics). Transmisión difusa fue abordada en el capítulo 1 “propiedades ópticas de la materia”, los principios ópticos que son utilizados en difusores para luz difusa están fuera del alcance de este proyecto.

3.14.3. Aplicaciones: Este tipo de sistema está diseñado para edificaciones de una sola planta o para últimos niveles de edificaciones con varios pisos, sin embargo, este sistema también puede ser instalado en plantas bajas de una edificación con guías de luz lo suficientemente prolongadas. Este sistema ha sido diseñado para funcionar bajo diferentes condiciones climáticas.

3.14.4. Control: La forma de control más común para este tipo de sistemas es conocida como “Dimmer”, dicho dispositivo está conformado por una válvula de

control de luz operada electromecánicamente, movida por un motor adaptado a un switch que regula el paso de luz natural.

3.14.5. Mantenimiento: El único mantenimiento requerido para este sistema es la limpieza periódica de sus domos, debido a que no cuenta con partes móviles.

3.14.6. Costos y ahorros de energía: Los costos para este tipo de sistemas oscilan entre 400 y 800 dólares dependiendo del diámetro de la base del domo. El ahorro de energía es bastante significativo puesto que este tipo de sistema logra muy buenas condiciones de iluminación durante el día.

4. DISEÑO.

4.1. REQUISITOS GENERALES PARA EL DISEÑO DE ILUMINACIÓN.

Dentro de lo establecido en el marco legal para diseños de iluminación en Colombia se encuentra un capítulo denominado como "DISEÑO Y CALCULOS DE ILUMINACION INTERIOR ", en dicho capítulo se fijan requisitos que el diseñador necesita investigar a la hora de elaborar el diseño. Los ítems desarrollados a continuación reflejan el cumplimiento de dichos requisitos.

- ✚ El tipo de actividad asociadas a cada espacio: las actividades que van a desarrollar en el último nivel (piso 5) de la reforma del edificio son todas las actividades administrativas de la escuela de ingeniería eléctrica. Esta área estará integrada por oficinas donde se llevarán a cabo trabajos de mecanografía y computación, actividades de escritura, lectura y dibujo. Adicional a esto áreas para aseo personal, zona de recepción y su respectivo café.

- ✚ Las condiciones de reflexión de las superficies : las condiciones de reflexión de las superficies dependen de los acabados que se llevarán a cabo al interior de las oficinas, por ejemplo, el tipo de superficie para el piso, el color de las paredes, color y textura del mobiliario, color y textura para la superficie del techo. Para este diseño se escogieron condiciones de reflexión estándar :
 - ✓ Techo estándar : índice de reflexión 80 %
 - ✓ Paredes estándar : índice de reflexión 50 %
 - ✓ Piso estándar : índice de reflexión 20 %

El mobiliario se considero de acuerdo a las opciones disponibles en la herramienta de simulación, puesto que, en esta fase el diseño del edificio aun no se había definido completamente.

- ✚ Los niveles de iluminancia e uniformidad requerida: De acuerdo al marco reglamentario abordado con anterioridad los niveles de iluminancia para este tipo de oficinas no podrá ser inferior a 300 lux y no podrá ser superior a 700 lux en los planos de trabajo de las oficinas.
- ✚ El aprovechamiento de luz natural: este ítem es de vital importancia para este diseño, ya que la única fuente de luz que utilizara durante el día para iluminar será el sol. El diseño para la iluminación de las oficinas estará basado en un sistema para iluminación natural conocido como tubos solares, con dichos sistemas el aprovechamiento de la luz natural será del 100 % al interior de las oficinas durante el día. Cabe mencionar que los criterios de utilización consignados en el marco reglamentario sobre la utilización del recurso "luz natural" son tenidos en cuenta en el sistema que se utilizara para el diseño.

Otro de los componentes importantes en el aprovechamiento de luz natural son ubicación, forma y dimensión de las ventanas del área administrativa, para este caso se conoce solo la ubicación y la orientación de las ventanas, puesto que, el diseño de la edificación para este punto aún no cuenta con esos datos.

Dentro del marco reglamentario para iluminación (RETILAP, actualización 30 de marzo 2010) se cita el coeficiente llamado "coeficiente de luz diurna" (CLD), calculado por medio de la siguiente ecuación: .

Ecuación 8. Coeficiente de luz diurna

$$CLD \% = \frac{E_{int}}{E_{ext}} * 100$$

El requisito fijado por RETILAP para el coeficiente de luz diurna en oficinas es de 2 % clasificado según Retilap para áreas donde se desarrollen tareas con dificultad mediana. El diseño que se va a realizar tiene en promedio un coeficiente de luz diurna aproximado entre el 90% y el 100%, cumpliendo satisfactoriamente este requisito.

- ✚ El control del deslumbramiento : el deslumbramiento puede ser producido por diferente causas , entre el más común se encuentra el producido por fuentes de luz cuya luminancia es excesiva en relación con la luminancia general en el interior del local o el deslumbramiento provocado por superficies pulidas que reflejan luz provenientes de fuentes de luz directa. El sistema de iluminación natural utilizado para el diseño cuenta con difusores a la salida del sistema, estos difusores poseen tecnologías (lente de fresnel, difusores prismáticos) que logran una difusión superior de la luz sin reflejos logrando disminuir este incomodo efecto provocado por la incidencia directa de los rayos del sol sobre los planos de trabajo.

El contraste de luminancias al interior del último nivel será demasiado suave debido a que el aporte de luz natural que penetra los espacios a través de las ventanas proviene de la misma fuente utilizada por el sistema de iluminación propuesto (el sol).

- ✚ El color en la luz: Cuando se habla del color en la luz se hace referencia a las propiedades ópticas de la materia y a la composición espectral de la luz con la

que se iluminen. La fuente de luz que va a utilizar para este diseño es sol y su composición espectral se puede apreciar en la siguiente figura.

Figura 53. Composición espectral luz natural día.

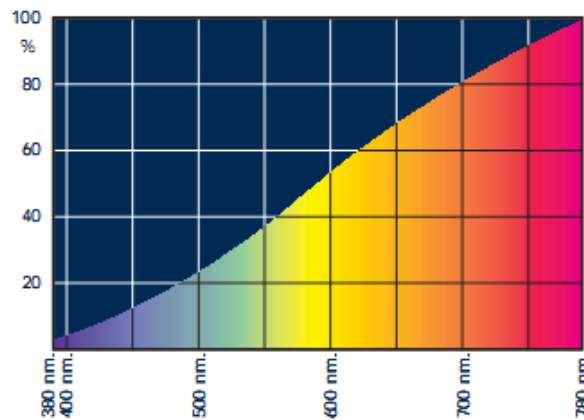


Imagen tomada de Curso de luminotecnia, Indalux, 2002.

Como se puede apreciar en el espectro esta fuente puede reflejar colores con longitudes de onda que van desde los 380 nm hasta los 780 nm convirtiéndose así en una fuente de luz con un índice de reproducción cromática situado en el grupo 1 de la clasificación (IRC) comprendido entre 85 y 100, la interpretación para dichos valores sería que la fuente de luz puede reproducir entre el 85% y el 100% de los colores que el ojo humano puede percibir.

Los factores desarrollados anteriormente arrojan características importantes sobre el funcionamiento del sistema de iluminación, en adelante se presentaran los componentes fundamentales de diseño como: tipo de luminaria, definición topológica, memorias de cálculo y presupuesto de inversión.

Antes de empezar con los componentes de diseño mencionados es pertinente aclarar cómo se llevo a cabo el proceso de selección de luminarias dentro de la oferta tecnológica disponible en el mercado.

A continuación se presentara un resumen de las empresas que ofrecen domos tubulares a nivel mundial.

4.2. OFERTA TECNOLÓGICA DOMOS TUBULARES.

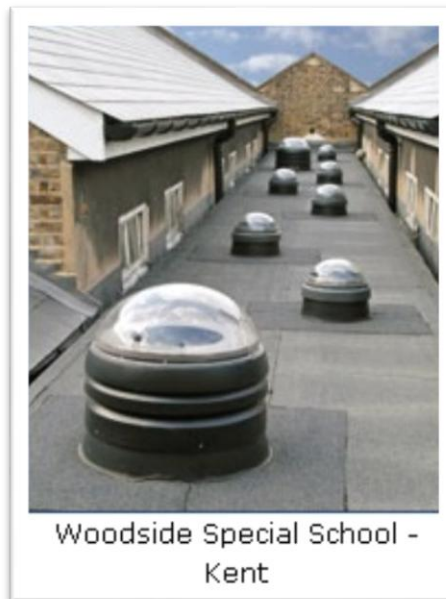
4.2.1. Monodraught : Compañía inglesa, en sus inicios empezó desarrollando sistemas de ventilación natural y sistemas para edificios con enfoque orientado hacia el bajo consumo de energía. En 1995 hicieron el lanzamiento de su nueva línea en iluminación natural llamada “sunpipe”, en la cual la iluminación y la ventilación natural fueron acoplados en un sólo sistema. A continuación se presentara una descripción de los productos que ofrecen, así como sus principales características técnicas más importantes.

4.2.1.1. Monovent suncatcher: Este sistema incorpora ventilación e iluminación natural en un compacto sistema de aporte energético, está diseñado para proporcionar luz y ventilación natural en baños, cocinas y espacios pequeños similares. El sistema está disponible en 3 tamaños:

- ABS 350 con un diámetro de 230 mm.
- ABS sunpipe 550 con diámetro de 300 mm o de 450 mm.

A continuación se presenta un sistema monovent suncatcher de 300 mm de diámetro instalado en un colegio ubicado en Londres - Inglaterra

Ilustración 1. Aplicación de sistema ABS 350.



Nombre página web: Monodraught, Sunpipe Technical, <http://www.monodraught.com/technical/index.php>

4.2.1.2. “Sola Vent”: Es un tipo de sistema más completo, además de proporcionar iluminación natural al interior de un espacio, proporciona ventilación. Solavent tiene dos tamaños disponibles:

- Sola 230 mm: un sistema completamente integrado para espacios pequeños como baños cuenta con ventilación y dos fluorescentes adaptables.
- Sola 300 mm: Diseñado para áreas más grandes como cocinas y áreas de servicios públicos, el tamaño del tubo de luz de este sistema proporciona aproximadamente el doble de luz natural a los espacios interiores.

El sistema integrado puede apreciarse a continuación.

Ilustración 2. Apariencia exterior del sistema integrado Sola Vent.



Nombre página web: Monodraught, Sunpipe Technical, <http://www.monodraught.com/technical/index.php>

La apariencia del sistema a la salida del espacio interior es la siguiente.

Ilustración 3. Apariencia interna del sistema Sola Vent.



Nombre página web: Monodraught, Sunpipe Technical, <http://www.monodraught.com/technical/index.php>

En la ilustración 3 se puede observar el panel solar fotovoltaico que hace parte del sistema integrado.

Información detallada sobre el panel fotovoltaico incorporado en el sistema se encuentra disponible en la página de Monodraught.

Ilustración 4. Panel solar fotovoltaico sistema Sola Vent.



Nombre página web: Monodraught , Sunpipe Technical, <http://www.monodraught.com/technical/index.php>

4.2.1.3. Diamond dome sunpipes: Este tipo de sistema solo proporciona iluminación natural y está disponibles en 3 tamaños:

- Diamond dome 230 mm: Adecuado para cuartos de baño, duchas, corredores y pequeños espacios donde no puede penetrar la luz natural. Pueden iluminar típicamente un área de 6 metros cuadrados, proporcionan luz natural a una equivalencia de hasta 200 wat de iluminación eléctrica.
- Diamond dome 300 mm: Tamaño más popular para propiedades residenciales, ideal para cocinas, salones y zonas de desembarque. Puede iluminar una superficie de 14 metros cuadrados.
- Diamond dome 400 mm: ideal para salas de juego o pasillos de galería. Puede iluminar una superficie de 22 metros cuadrados aproximadamente.
- Diamond dome 530 mm: para oficinas, salones de clase y propiedades comerciales similares.

En la figura 56 se presenta una descripción más detallada de los parámetros técnicos de un sistema Diamond dome de 230 mm.

En la siguiente fotografía se puede apreciar un sistema Diamond dome instalado.

Ilustración 5. Sistema Diamond dome.



Nombre página web: Monodraught, Sunpipe Technical, <http://www.monodraught.com/technical/index.php>

Otra especificación técnica importante es la cantidad de luz que pueden aportar este tipo de sistemas ; si bien es cierto que no se puede arrojar un valor fijo para cada uno de los sistemas, puesto que, la intensidad de luz solar es muy variable dependiendo de las condiciones del cielo, obstrucciones(arboles u otras edificaciones), época del año(lugares del planeta que poseen estaciones), ubicación de la edificación etc, Monodraught brinda una tabla como orientación para cada uno de los diámetros de los domos bajo ciertas condiciones del cielo en Inglaterra y para una longitud del diámetro de domo de 60 cm. Los datos mostrados en la tabla son el producto de mediciones hechas a una distancia de 1.5 m por debajo del difusor. Cabe mencionar que la tabla 11 tiene tres series de valores. En el primer cuadro denominado con el nombre “full summer sun” (75 klux)

es el máximo valor de iluminancia esperada en el reino unido al medio día en condiciones de verano. El segundo cuadro es el más típico, condiciones de verano y bajo un cielo nublado (50 klux), es probablemente el más típico para un periodo de tiempo comprendido entre marzo y octubre. El tercer cuadro representa el cielo de invierno con una iluminancia de 25 klux externos bajo condiciones de cielo nublado.

La tabla 11 presenta los valores de iluminancia esperados para diferentes condiciones estacionales y diferentes diámetros de sistemas Monodraught.

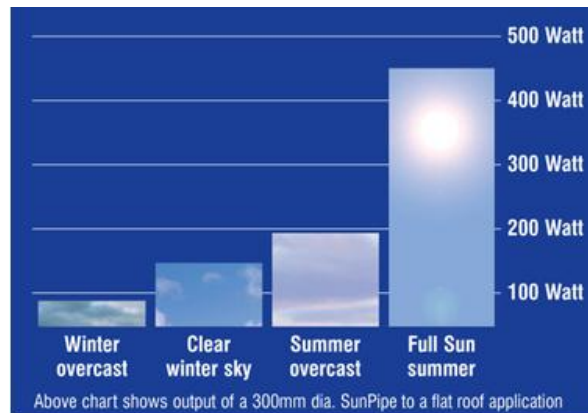
Tabla 11. Operación sistemas monodraught en diferentes condiciones climáticas

Diameter (mm)	Full Summer Sun 75klux	Overcast Summer 50klux	Overcast Winter 25klux	Area Lit (to a normal daylight level)
	Lux Value	Lux Value	Lux Value	
230	337	225	112	7.5 sq.m (approx 80sq.ft)
300	607	404	202	14 sq.m (approx 150sq.ft)
450	1452	968	484	22 sq.m (approx 230sq.ft)
530	2052	1386	684	30 sq.m (approx 430sq.ft)
750	4238	2825	1413	50 sq.m (approx 530sq.ft)
1000	7675	5117	2558	60 sq.m (approx 650sq.ft)

Nombre página web: Monodraught, Sunpipe Technical, <http://www.monodraught.com/technical/>

Otra información que puede ofrecer una idea acerca de la cantidad de luz arrojada por un sunpipe y elaborada por la universidad de Nottingham es una tabla de equivalencia entre un sunpipe de 300 mm de diámetro (funcionando en diferentes condiciones estacionales) y bombillas eléctricas tradicionales, en la figura 57 se puede apreciar los resultados del estudio.

Figura 54. Equivalencia sunpipe 300 mm de diámetro y bombillas tradicionales acorde a condiciones climáticas.



Nombre página web: Monodraught, Sunpipe Technical, <http://www.monodraught.com/technical/index.php>

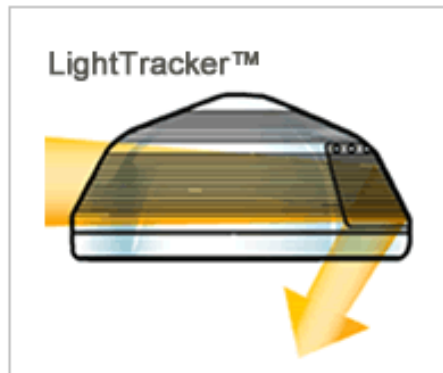
Otra especificación técnica a tener en cuenta en el momento de elaborar el diseño, es la máxima longitud de los tubos en la zona de transmisión. La recomendación hecha por Monodraught es que para diámetros pequeños la extensión máxima del tubo total sería de 8 metros, mientras que, para diámetros grandes podría ser hasta de 20 metros. Cabe mencionar que la longitud y cambios de dirección en los tubos conllevan pérdidas, es decir, por cada metro de tubo las pérdidas por transmisión están cerca al 6 %, mientras que por cada cambio de dirección del tubo (45 %) hay una reducción del 12 %.

4.2.2. Solatube: Empresa pionera de tubos solares a nivel mundial, el concepto manejado hoy día ha sido el resultado de diferentes versiones de tubos de luz. El primer sistema solatube fue vendido en 1991 y posteriormente se han posesionado a nivel mundial como los principales distribuidores de este tipo de sistema de iluminación natural.

En la actualidad ofrecen dos tipos de sistemas que dependen de las necesidades del espacio a iluminar, Serie brighten up y serie solamaster. Cada uno de los productos de esta serie es abordado a continuación.

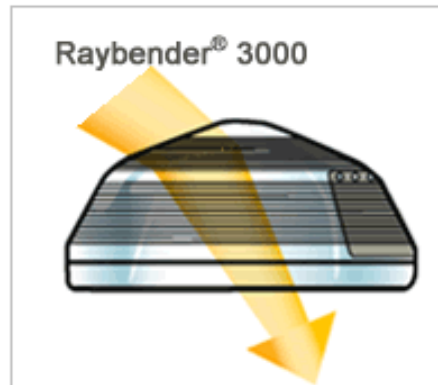
4.2.2.1. Serie Brighten up: Dentro de esta serie existen dos tipos de sistemas llamados solatube 160DS y solatube 290DS, diseñados para áreas pequeñas de trabajo y aplicaciones residenciales, tales como: cocinas, baños, pasillos, escaleras, zonas de star o espacios de trabajo abiertos. Estos sistemas poseen una tecnología muy eficiente ubicada en la superficie del domo, encargada de la captura de luz natural (Raybender ® 3000, lighth tracker). El principal objetivo de esta tecnología en la zona de captura de rayos es redirigir la luz difusa y los rayos provenientes de posiciones del sol cercanas al horizonte (como en los atardeceres o en los amaneceres), además de esto crear una pantalla contra una parte de la radiaciones contenidas rayos del sol, generadoras de calor en espacios interiores.

Ilustración 6. Tecnología “Light Traker” Solatube.



* Tecnología patentada por Solatube, su principal función es re-direccionar los rayos para bajas elevaciones del sol.

Ilustración 7. Tecnología Raybender 3000.



* Tecnología patentada por Solatube que funciona como filtro de rayos UV que generan ganancias de calor al interior de las edificaciones.

La diferencia entre los dos sistemas radica básicamente en el diámetro del tubo de luz y en la longitud potencial del tubo. Para el sistema solatube 160 DS el diámetro del tubo es de 250 mm y tiene una longitud máxima recomendada de 6m + (es posible adicionar mas metros de tubo). Solatube 290 DS tiene un diámetro del tubo de 350 mm y tiene una longitud máxima recomendada de 9 m +.

Estos dos sistemas poseen diferentes accesorios, tales como: difusores con diferentes tonalidades de luz, kit para iluminación artificial de respaldo, kit de ventilación natural y regulador de luz natural. Cabe señalar que los tubos poseen una flexibilidad de 0 a 90°.

El rango del área de cobertura para iluminación de los sistemas 160 DS y 290 DS son 14–19 m^2 y 23–28 m^2 respectivamente.

4.2.2.2. Serie sola master: Este sistema ofrece luz día para espacios más amplios, como por ejemplo en el sector educativo, el sector de la salud y el sector comercial. Dentro de este tipo de serie existen dos productos que son:

- Sola master 330 DS C : Este sistema se puede instalar en falsos techos y paneles de yeso, puesto que, cuenta con una caja de transición que convierte el tubo redondo solatube (530 mm) en un difusor cuadrado de 600 m. Este difusor encaja perfectamente en techos suspendidos en centros comerciales o en cielos rasos de yeso. Una aplicación de este tipo de sistema es mostrada en la ilustración 10.

Ilustración 8. Sola Máster 330 DS C.

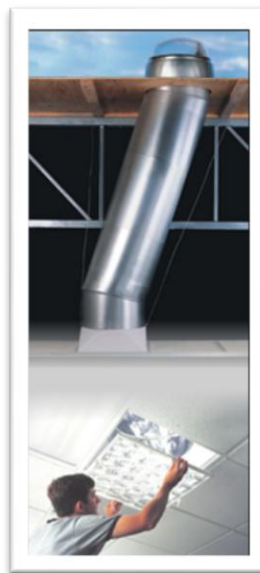


Imagen tomada de: Solatube, Brochure, Page: <http://www.solatube.co.uk/>

- Sola master DS O: Está diseñado para techos abiertos, este sistema aporta un alto rendimiento de luz natural en zonas de almacenes, fábricas e instalaciones deportivas.

Ilustración 9. Sola master DS O.



Imagen tomada de: Solatube, Brochure, Page: <http://www.solatube.co.uk/>

La serie Sola Master 330 DS con un diámetro de 530 mm puede iluminar un área de hasta 33 metros cuadrados aproximadamente.

4.2.3. Velux: Velux es una compañía fundada originalmente en Dinamarca y posteriormente expandida por el mundo principalmente por Europa y ahora haciendo su incursión en mercados latinoamericanos, su principal distribuidor se encuentra en Chile.

Dicha compañía se dedica a iluminación natural como tal y son distribuidores de varios sistemas existentes. Uno de los sistemas que distribuyen son los túneles solares. A diferencia de otros fabricantes el diseño de Velux está alineado con el plano de la cubierta del techo sin sobresalir, siguiendo la estética de todos sus productos en iluminación natural. Las principales características de los dos sistemas de túneles solares son:

- *Túnel solar rígido:* es un sistema básico que viene para ser instalado desde 1.45 hasta 1.85 metros. El diámetro del túnel es de 350 mm. Está disponible para techos con teja ondulada. Adicional a esto al sistema se le pueden

adicionar extensiones llamadas ZTR 014 que permiten llevar el túnel hasta profundidades de hasta 6 metros.

Ilustración 10. Túnel Solar rígido



Imagen tomada de: Velux, Productos, http://www.velux.es/particulares/productos/tubo_solar/tubo_solar_rigido_cubierta_inclinada

- *Túnel solar flexible:* Este tipo de túnel entrega luz en aquellos lugares donde es imposible instalar una ventana. Es ideal para distancia de 0.4 m hasta 2 m de longitud. El diámetro del túnel es del 350 mm. Está disponible para techos con teja lisa u ondulada.

Ilustración 11. Tunel solar flexible.



http://www.velux.es/particulares/productos/tubo_solar/tubo_solar_rigido_cubierta_inclinada

Cuando se dio inicio al proceso de selección del sistema se contactaron diferentes proveedores vía internet, se realizó una solicitud a cada uno de ellos donde se solicitaba información técnica detallada de sus respectivos productos incluyendo las características fotométricas (Fotometría para Colombia), la respuesta enviada por Velux y Monodraught hacía referencia a que sus compañías no tenían representante en Colombia y que la fotometría o herramientas para diseño estaban en proceso de desarrollo. La respuesta enviada por Solatube contenía información de su representante en Colombia conocido como Caja de Colores ubicado en la ciudad de Medellín-Colombia, Posterior a esta información recibida se programó una reunión con dicha compañía en donde se suministró información fotométrica y parámetros técnicos para domos tubulares Solatube.

De esta forma la compañía seleccionada para las posibles luminarias utilizadas en el diseño fue Solatube.

4.3. TIPO DE LUMINARIA.

Para este diseño de iluminación se escogieron dos tipos de luminaria acorde a diferentes áreas encontradas en el último nivel de la reforma del edificio E3T (baños, café, oficinas, áreas de circulación). Las luminarias escogidas serán detalladas a continuación:

- ✓ Solatube 160 DS y 290 DS: los componentes principales de los sistemas domo tubulares 160 y 290 DS son básicamente los mismos a diferencia de las dimensiones de cada una de las partes que los componen.

4.3.1. Domo o Burbuja: las especificaciones del domo o burbuja son las siguientes:

- Fabricado con acrílico de alto impacto en moldeo por inyección clasificado como material CC2 con características protectoras contra rayos UV.
- Grosor mínimo aceptable de 0.125" (3.175 mm) con una transmisión optimizada de luz visible de un 92 %.
- Tecnología Raybender 3000 (serie de líneas reflectantes grabadas concéntricamente a por lo menos 2" de alto para incrementar la cantidad de luz dirigida al interior del tubo cuando el sol está bajo el horizonte).
- Reflector light traker TM, tecnología que aumenta la captación de bajos rayos de luz, incrementando la cantidad de luz captada.
- Capacidad de carga mínima aceptada de 100 libras por pie cuadrado.

4.3.2. "Dome Ring": Las especificaciones para el dome ring son las siguientes:

- Plástico ABS (Acrilonitrilo – Butadien – Estireno) de alto impacto en moldeo por inyección con un grosor nominal de 0.090" (2.3 mm).
- Canal de condensación diseñado para canalizar al exterior la humedad condensada y prevenir la transmisión de calor entre el Flashing/base y tubos de aluminio.

4.3.3. "Flashing o Base": las especificaciones para la base son las siguientes:

- De acero prensado de una sola pieza sin uniones ni costuras a prueba de filtraciones, con polvo protector que combate al material corrosivo.
- Relleno de mica 30 % para mayor durabilidad y resistencia.

- Altura de 4 a 6 pulgadas.
- Grosor mínimo aceptado de 0.028 pulgadas.

4.3.4. Tubos de Extensión Reflexivos: Las especificaciones para los tubos de extensión son las siguientes:

- Fabricados de hoja de aluminio de 0.015" a 0.02" de grosor, cubriendo las características del ASTM B 209 y la aleación requerida por el fabricante para cumplir con las operaciones y requisitos de acabado. Estas extensiones permiten realizar quiebres de hasta noventa grados.
- Acabado interior – acabado especular en superficies reflexivas expuestas, espectro visible total mayor a 99 %, espectro solar total menor a 93 %.
- Tubos de extensión con ángulo de 90 con 0.018 " de grosor.

4.3.5. "Ceiling Ring": Las especificaciones para este componente del sistema son las siguientes:

- Plástico ABS (Acrilonitrilo – Butadien – Estireno) de alto impacto en moldeo por inyección con un grosor nominal de 0.085" para prevenir transmisión de calor entre Flashing/Base y tubos de aluminio.

4.3.6. Ensamblado de Difusor: las especificaciones técnicas para este componente son las siguientes:

- Difusor Superior: Plástico acrílico clasificado como CC2.
- Anillo de ajuste de difusor:

- Blanco – Acrílico resistente moldeado por inyección, grosor mínimo de 0.10”.
 - Tono inoxidable – Acrílico color inoxidable resistente moldeado por inyección.
 - Tono escarchado – Acrílico resistente moldeado por inyección con un anillo ensamblado en forma de cono como accesorio, también moldeado por inyección.
- Lentes Difusores:
- Difusor Optiview – Policarbonato moldeado clasificado como CC1, con grosor mínimo aceptado de 0.024 ” y diseño Optiview para maximizar la emisión de luz natural así como el ángulo de difusión.
 - Difusor Vusion TM – acrílico resistente moldeado por inyección clasificado como CC2, con grosor mínimo de 0.03” (0.07 mm) con diseño cóncavo prismático para maximizar la difusión de luz al adaptarse al interior de un techo o plafón.
 - Transmisión de luz visible mayor a 90 %.
- Efectos de lentes: existen tres opciones para lograr efectos cálidos y suaves en el color de la luz.
- Lente con efecto cálido
 - Lente para suavizar la luz
 - Lente para que la luz sea más cálida y suave

4.3.7. Accesorios: Las especificaciones técnicas para los diferentes accesorios son las siguientes:

✚ **Unidad de luz eléctrica:** Las especificaciones para la unidad de luz eléctrica son:

- Componente eléctrico sencillo de 110 voltios con adaptador de cerámica para lograr un mejor acople en el interior del tubo.
- Foco de 23 watts tecnología LED..

✚ **Abanico de Extracción:** Las especificaciones para el abanico son:

- Motor de lubricación permanente con capacidad de 110 pies cúbicos por minuto.
- Parrilla de extracción debe adaptarse al difusor del domo tubular siendo estos dos un solo componente.

✚ **Dimmer Regulador de Luz Natural:** Las especificaciones para el “dimmer” son:

- Válvula de control de luz operada electromecánicamente.
- Acepta voltajes universales de 90 a 277 volts y frecuencias de 50 o 60 Hz.
- Switch DC DP7DT.
- Capacidad de regulación de paso de luz natural de 2 a 100 %.

En la imagen mostrada a continuación se puede apreciar una de las luminarias escogida para el diseño de iluminación.

Ilustración 12. Solatube 290 DS.



Imagen tomada de: Solatube, Brochure, Page: <http://www.solatube.co.uk/>

La apariencia del difusor seleccionado se puede apreciar en la ilustración 13.

Ilustración 13. Difusor “Optiview”.



Imagen tomada de: Solatube, Brochure, Page: <http://www.solatube.co.uk/>

Los diámetros de los sistemas 160 DS y 290 DS son 250 mm y 350 mm respectivamente. Una descripción técnica detallada de los sistemas domo tubulares escogidos será visualizada en las siguientes figuras.

Figura 55. Detalle Solatube 160DS.

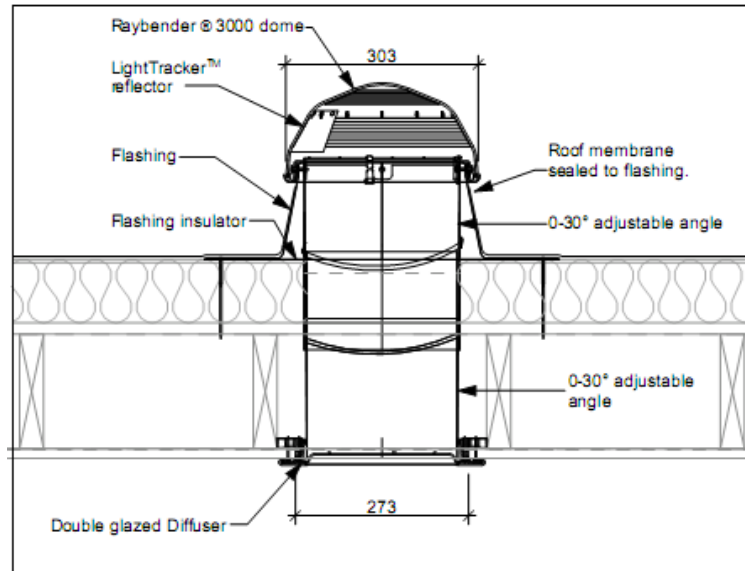


Imagen tomada de: Solatube, Brochure, Page: <http://www.solatube.co.uk/>

Figura 56. Detalle Solatube 290 DS.

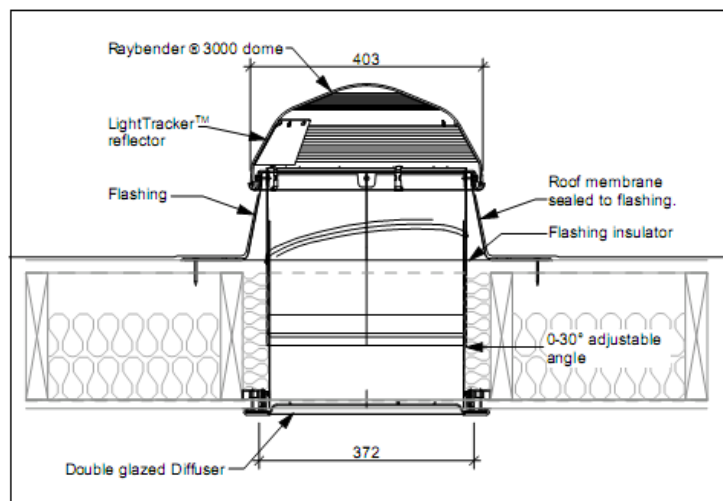


Imagen tomada de: Solatube, Brochure, Page: <http://www.solatube.co.uk/>

Información técnica más detallada (especificaciones arquitectónicas, dibujos técnicos) es presentada en el Anexo A de este proyecto.

4.4. FOTOMETRÍA Y SOFTWARE PARA DISEÑO.

La fotometría utilizada para el diseño fue proporcionada por una empresa Colombiana llamada Caja de Colores con sede en Medellín y que actualmente tiene la representación para los domos tubulares Solatube.

Dentro de la información suministrada por dicha empresa se encuentran archivos con formato IES para cada una de las luminarias disponibles en Colombia.

- 21 inch Solatube40.ies
- 14 inch Solatube40.ies
- 10 inch Solatube40.ies

Los archivos anteriormente mencionados contienen información fotométrica necesaria para cálculos de iluminación y diseño. En la actualidad este tipo de archivos son proporcionados por fabricantes de luminarias, debido a que, los actuales diseños de iluminación son llevados a cabo por medio de herramientas de simulación desarrollada para tales fines (Dialux, Ecolighting).

Adicional a este tipo de archivos fue recibido un pdf con información útil acerca del uso de las curvas IES, diagramas polares para intensidad luminosa y sus respectivas tablas asociadas a dichos diagramas polares presentes en el anexo A. Para hacer un correcto uso de los archivos IES es necesario tener en cuenta los siguientes ítems:

1. El flujo luminoso para este tipo de luminaria varía dependiendo de la ubicación del sitio, la hora del día, las condiciones del cielo, etc. Por tales razones es

indispensable conocer cuál es el comportamiento promedio, mínimo y máximo de los lúmenes a la salida de la luminaria. En la actualidad existen tablas elaboradas por Solatube que caracteriza la salida de lúmenes para 2400, 1800 y 1200 horas, de las 8760 horas para el clima típico de un año en algunas ciudades alrededor del mundo. Estos lúmenes de salida reflejan la cantidad mínima, promedio y máxima de lúmenes a la salida del domo tubular que se observan durante el periodo horario especificado (por ejemplo 2400 horas), en un sistema con un tubo de longitud de 3 m y con diámetro de 530 mm (suspendido del cielo raso). Para sistemas con diámetros de 250 mm y 350 mm la longitud del tubo utilizada es de 1.8 m. Desde luego cuando se ejecuta una simulación con la salida promedio de lúmenes se proporciona al usuario un vistazo de los niveles de iluminación alcanzados habitualmente para el diseño, dependiendo de la luminaria seleccionada. Como se menciona anteriormente la luz del día es una fuente de luz variable, es por esto que, valores marcados en las tablas como "minimum" y "maximum" proporcionan al diseñador conocimiento del mejor y peor escenario posible.

Para Bogotá-Colombia el resultado es el siguiente.

Tabla 12. Salida de lúmenes para Solatube 290 DS.

Solatube 290 DS (tubo con longitud 1.8 m)									
		Max	% Eff	2400		1800		1200	
				Ave	Min	Ave	Min	Ave	Min
Colombia	Bogotá	9,575	74%	4,702	2,561	5,322	3,241	6,082	4,370

Tabla tomada de: Solatube, Technical Center, Datasheets, Photometric and lumen data, web page: <http://www.solatubescotland.co.uk/technical-area/technical/technical-centre/121.htm>

Tabla 13. Salida de lúmenes para Solatube 160 DS.

Solatube 160 DS (tubo con longitud 1.8 m)									
		Max	% Eff	2400		1800		1200	
				Ave	Min	Ave	Min	Ave	Min
Colombia	Bogotá	4,862	71%	2,315	1,241	2,625	1,580	3,009	2,140

Tabla tomada de: Solatube, Technical Center, Datasheets, Photometric and lumen data, web page: <http://www.solatubescotland.co.uk/technical-area/technical/technical-centre/121.htm>

El diseño de iluminación llevado a cabo en secciones posteriores fue calculado en base a datos tabulados anteriormente, puesto que, la caracterización de tubos para Bucaramanga no ha sido llevada a cabo. Cabe mencionar que en diseños elaborados por los representantes de Solatube para Colombia son llevados a cabo con los datos tabulados anteriormente y presentando resultados satisfactorios.

2. Definir el "light loss factor" como 0.92 y no el valor establecido por defecto de 0.8.

EL software utilizado para el diseño es llamado DIALux, desarrollado por un empresa de origen Alemán especialista en domotica e iluminación conocida como DIA. Los principales servicios ofrecidos por esta empresa se encuentran la fábrica de software para herramientas de planificación lumínica y sistemas de gestión de datos de productos.

Este software surgió como una necesidad por crear una plataforma para que los fabricantes de luminarias pudiesen presentar sus productos en dicha plataforma a sus clientes, los planificadores. El proyecto para el desarrollo de este software

empezó en el año 1994 y está continuamente en evolución a cargo de un equipo de 20 personas. Las principales características de esta herramienta de diseño son:

- ✓ Crear proyectos de iluminación eficaz y profesional.
- ✓ Datos actualizados de luminarias de fabricantes a nivel mundial.
- ✓ Software actualizado y técnicamente novedoso siempre disponible de manera gratuita.
- ✓ Evaluación energética del diseño.

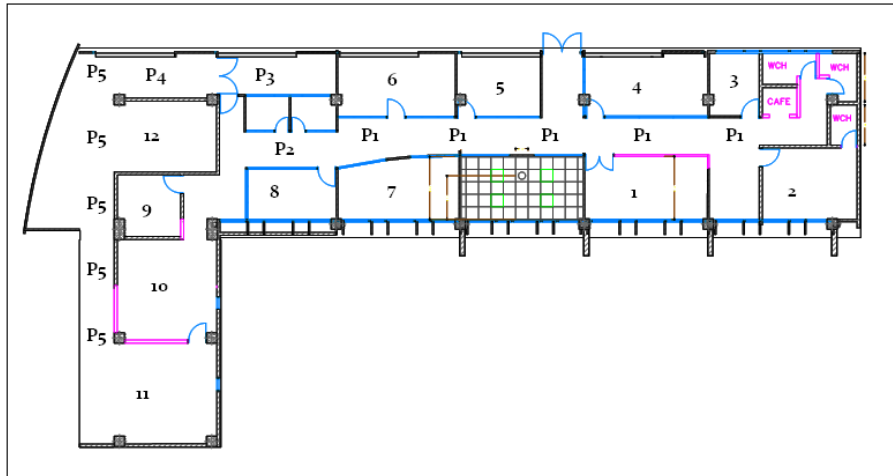
Figura 57. Herramienta de software para diseños luminotécnicos



4.5. DEFINICIÓN TOPOLÓGICA DE ESPACIOS.

El último nivel de la reforma del edificio de la E3T estará constituido por el área administrativa en su totalidad. Bajo esta área se desarrollaran actividades básicas tales como lectura, escritura, mecanografía y computación primordialmente. Los módulos de oficina van a presentar divisiones piso–techo para lograr una mejora en la acústica de cada una de las oficinas. El esquema de la distribución de espacios es el siguiente.

Figura 58. Esquema de distribución de espacios para último nivel reforma E3T



En el diseño las áreas demarcadas del 1 al 12 serán diseñadas como recintos independientes acorde a sus características y serán nombradas como oficina #. Las áreas de circulación al igual que los baños y el café serán nombradas en el diseño con respectivos nombres.

4.5.1. Calculo de número de luminarias por recinto.

4.5.1.1. Oficina #1: Las especificaciones para esta oficina son las siguientes.

❖ Tipo de luminaria : Solatube 290 DS

Dimensiones

❖ Largo : 6.51 m

❖ Ancho : 3.35 m

❖ Alto : 2.4 m

El número de luminarias requeridas para la oficina # 1 es 2. El resumen de resultados para condiciones promedio al interior del recinto es:

Tabla 14. Resumen de resultados condiciones promedio oficina 1.

E _{pro} [lx]	E _{max} [lx]	E _{min} [lx]
337	529	143

En las memorias de cálculo se encuentra un resumen más detallado de los resultados luminotécnicos de todos los posibles escenarios (Promedio, máximo y mínimo).

4.5.1.2. Oficina #2: Las especificaciones para esta oficina son las siguientes.

❖ Tipo de luminaria : Solatube 290 DS

Dimensiones

❖ Largo : 5.02 m

❖ Ancho : 3.78 m

❖ Alto : 2.4 m

El número de luminarias requeridas para la oficina # 2 es 2. El resumen de resultados para condiciones promedio al interior del recinto es:

Tabla 15. Resumen de resultados condiciones promedio oficina 2.

E _{pro} [lx]	E _{max} [lx]	E _{min} [lx]
380	601	169

En las memorias de cálculo se encuentra un resumen más detallado de los resultados luminotécnicos de todos los posibles escenarios (Promedio, máximo y mínimo).

4.5.1.3. Oficina # 3: Las especificaciones para esta oficina son las siguientes.

❖ Tipo de luminaria : Solatube 290 DS

Dimensiones

❖ Largo : 3.3 m

❖ Ancho : 2.64 m

❖ Alto : 2.4 m

El número de luminarias requeridas para la oficina # 3 es 1. El resumen de resultados para condiciones promedio al interior del recinto es:

Tabla 16. Resumen de resultados condiciones promedio oficina 3

E _{pro} [lx]	E _{max} [lx]	E _{min} [lx]
349	525	186

En las memorias de cálculo se encuentra un resumen más detallado de los resultados luminotécnicos de todos los posibles escenarios (Promedio, máximo y mínimo).

4.5.1.4. Oficina #4: Las especificaciones para esta oficina son las siguientes.

❖ Tipo de luminaria : Solatube 290 DS

Dimensiones

- ❖ Largo : 6.54 m
- ❖ Ancho : 3.13 m
- ❖ Alto : 2.4 m

El número de luminarias requeridas para la oficina # 4 es 2. El resumen de resultados para condiciones promedio al interior del recinto es:

Tabla 17. Resumen de resultados condiciones promedio oficina 4

Epro[lx]	E _{max} [lx]	E _{min} [lx]
350	532	157

En las memorias de cálculo se encuentra un resumen más detallado de los resultados luminotécnicos de todos los posibles escenarios (Promedio, máximo y mínimo).

4.5.1.5. Oficina # 5: Las especificaciones para esta oficina son las siguientes.

- ❖ Tipo de luminaria : Solatube 290 DS

Dimensiones

- ❖ Largo : 4.42 m
- ❖ Ancho : 3.14 m
- ❖ Alto : 2.4 m

El número de luminarias requeridas para la oficina # 5 es 1. El resumen de resultados para condiciones promedio al interior del recinto es:

Tabla 18. Resumen de resultados condiciones promedio oficina 5.

Epro[lx]	E _{max} [lx]	E _{min} [lx]
265	495	91

En las memorias de cálculo se encuentra un resumen más detallado de los resultados luminotécnicos de todos los posibles escenarios (Promedio, máximo y mínimo).

4.5.1.6. Oficina # 6: Las especificaciones para esta oficina son las siguientes.

❖ Tipo de luminaria : Solatube 290 DS

Dimensiones

❖ Largo : 6.24 m

❖ Ancho : 3.14 m

❖ Alto : 2.4 m

El número de luminarias requeridas para la oficina # 6 es 2. El resumen de resultados para condiciones promedio al interior del recinto es:

Tabla 19. Resumen de resultados condiciones promedio oficina 6.

Epro[lx]	E _{max} [lx]	E _{min} [lx]
362	539	171

En las memorias de cálculo se encuentra un resumen más detallado de los resultados luminotécnicos de todos los posibles escenarios (Promedio, máximo y mínimo).

4.5.1.7. Oficina #7: Las especificaciones para esta oficina son las siguientes.

❖ Tipo de luminaria : Solatube 290 DS

Dimensiones

❖ Largo : 6.43 m

❖ Ancho : 3.33 m

❖ Alto : 2.4 m

El número de luminarias requeridas para la oficina # 7 es 2. El resumen de resultados para condiciones promedio al interior del recinto es:

Tabla 20. Resumen de resultados condiciones promedio oficina 7.

Epro[lx]	E _{max} [lx]	E _{min} [lx]
341	536	124

En las memorias de cálculo se encuentra un resumen más detallado de los resultados luminotécnicos de todos los posibles escenarios (Promedio, máximo y mínimo).

4.5.1.8. Oficina # 8: Las especificaciones para esta oficina son las siguientes.

❖ Tipo de luminaria : Solatube 290 DS

Dimensiones

- ❖ Largo : 4.71 m
- ❖ Ancho : 2.66 m
- ❖ Alto : 2.4 m

El número de luminarias requeridas para la oficina # 8 es 1. El resumen de resultados para condiciones promedio al interior del recinto es:

Tabla 21. Resumen de resultados condiciones promedio oficina 8.

Epro[lx]	E _{max} [lx]	E _{min} [lx]
290	540	98

En las memorias de cálculo se encuentra un resumen más detallado de los resultados luminotécnicos de todos los posibles escenarios (Promedio, máximo y mínimo).

4.5.1.9. Oficina # 9: Las especificaciones para esta oficina son las siguientes.

- ❖ Tipo de luminaria : Solatube 290 DS

Dimensiones

- ❖ Largo : 3.34 m
- ❖ Ancho : 3.25 m
- ❖ Alto : 2.4 m

El número de luminarias requeridas para la oficina # 9 es 1. El resumen de resultados para condiciones promedio al interior del recinto es:

Tabla 22. Resumen de resultados condiciones promedio oficina 9.

Epro[lx]	E _{max} [lx]	E _{min} [lx]
306	505	136

En las memorias de cálculo se encuentra un resumen más detallado de los resultados luminotécnicos de todos los posibles escenarios (Promedio, máximo y mínimo).

4.5.1.10. Oficina # 10: Las especificaciones para esta oficina son las siguientes.

❖ Tipo de luminaria : Solatube 290 DS

Dimensiones

❖ Largo : 5.46 m

❖ Ancho : 5.32 m

❖ Alto : 2.4 m

El número de luminarias requeridas para la oficina # 10 es 2. El resumen de resultados para condiciones promedio al interior del recinto es:

Tabla 23. Resumen de resultados condiciones promedio oficina 10.

Epro[lx]	E _{max} [lx]	E _{min} [lx]
273	540	77

En las memorias de cálculo se encuentra un resumen más detallado de los resultados luminotécnicos de todos los posibles escenarios (Promedio, máximo y mínimo).

4.5.1.11. Oficina # 11: Las especificaciones para esta oficina son las siguientes.

❖ Tipo de luminaria : Solatube 290 DS

Dimensiones

❖ Largo : 7.3 m

❖ Ancho : 5.34 m

❖ Alto : 2.4 m

El número de luminarias requeridas para la oficina # 11 es 2. El resumen de resultados para condiciones promedio al interior del recinto es:

Tabla 24. Resumen de resultados condiciones promedio oficina 11.

E _{pro} [lx]	E _{max} [lx]	E _{min} [lx]
215	496	59

En las memorias de cálculo se encuentra un resumen más detallado de los resultados luminotécnicos de todos los posibles escenarios (Promedio, máximo y mínimo).

4.5.1.12. Oficina #12: Las especificaciones para esta oficina son las siguientes.

❖ Tipo de luminaria : Solatube 290 DS

Dimensiones

- ❖ Largo : 5.42 m
- ❖ Ancho : 3.75 m
- ❖ Alto : 2.4 m

El número de luminarias requeridas para la oficina # 12 es 2. El resumen de resultados para condiciones promedio al interior del recinto es:

Tabla 25. Resumen de resultados condiciones promedio oficina 12.

E _{pro} [lx]	E _{max} [lx]	E _{min} [lx]
360	561	157

En las memorias de cálculo se encuentra un resumen más detallado de los resultados luminotécnicos de todos los posibles escenarios (Promedio, máximo y mínimo).

4.5.1.13. Baños y café: Por sus dimensiones la luminaria escogida para este tipo de recintos es:

- ❖ Tipo de luminaria: Solatube 160 DS.

A cada baño y al café le corresponde 1 luminaria.

4.5.1.14. Áreas de circulación: Para las áreas de circulación se escogió la siguiente luminaria:

- ❖ Tipo de luminaria: Solatube 160 DS.

En el último nivel de la reforma E3T se encuentran pasillos de circulación claramente observables en el esquema mostrado al inicio de esta sección.

La primera área de circulación P1 tiene las siguientes dimensiones:

- ❖ Largo : 26 m
- ❖ Ancho : 2 m
- ❖ Altura : 2.4 m

El numero de luminarias calculadas para iluminar el pasillo 1 es de 6 y el resumen de resultados para condiciones promedio es:

Tabla 26. Resumen de resultados condiciones promedio pasillo 1

$E_{pro}[lx]$	$E_{max}[lx]$	$E_{min}[lx]$
178	280	73

En las memorias de cálculo se encuentra un resumen más detallado de los resultados luminotécnicos de todos los posibles escenarios (Promedio, máximo y mínimo).

Al finalizar el área de circulación se encuentra una pequeña área de circulación con denominada pasillo 2 que tiene las siguientes dimensiones:

- ❖ Largo : 6 m
- ❖ Ancho : 1.91 m
- ❖ Alto : 2.4

El número de luminarias para iluminar dicho pasillo es de 1, el resumen de resultados para condiciones promedio son:

Tabla 27. Resumen de resultados condiciones promedio pasillo 2

E _{pro} [lx]	E _{max} [lx]	E _{min} [lx]
127	270	32

En las memorias de cálculo se encuentra un resumen más detallado de los resultados luminotécnicos de todos los posibles escenarios (Promedio, máximo y mínimo).

El pasillo denominado como pasillo 3 posee las siguientes dimensiones:

- ❖ Largo : 6.19
- ❖ Ancho : 1.99
- ❖ Alto : 2.4

Este pasillo posee las mismas dimensiones del pasillo calculado anteriormente, debido a esto en número de luminarias para este pasillo es de 1. Las memorias de cálculo se pueden leer del pasillo 2.

El pasillo denominado como pasillo 4 posee las siguientes dimensiones:

- ❖ Largo: 5 m
- ❖ Ancho: 2.18 m
- ❖ Alto: 2.4 m

El resumen de resultados para las condiciones promedio es:

Tabla 28. Resumen de resultados condiciones promedio pasillo 4.

Epro[lx]	E _{max} [lx]	E _{min} [lx]
140	262	46

En las memorias de cálculo se encuentra un resumen más detallado de los resultados luminotécnicos de todos los posibles escenarios (Promedio, máximo y mínimo). El número de luminarias requeridas para iluminar este pasillo es 1.

El pasillo denominado como pasillo 5 posee las siguientes dimensiones:

- ❖ Largo : 15.31 m
- ❖ Ancho : 1.35 m
- ❖ Alto : 2.4 m

El número de luminaria para iluminar este pasillo es de 3. El resumen de resultados para condiciones promedio son:

Tabla 29. Resumen de resultados condiciones promedio pasillo 5.

Epro[lx]	E _{max} [lx]	E _{min} [lx]
151	73	308

En las memorias de cálculo se encuentra un resumen más detallado de los resultados luminotécnicos de todos los posibles escenarios (Promedio, máximo y mínimo).

4.6. RESUMEN NÚMERO DE LUMINARIAS.

El número total de luminarias es:

Tabla 30. Resumen luminarias.

Tipo de luminaria	160 DS	290 DS
Recintos		
Oficinas		20
Baños	3	
Café	1	
Pasillos	14	
Totales	18	20

El resumen de luminarias muestra un total de 38 sistemas Solatube, en el siguiente ítem se aprecia que además del conjunto básico del sistema, también se seleccionan un kit de iluminación de respaldo en caso de que condiciones muy desfavorables hagan necesario el uso de la iluminación artificial. La luminaria que incluye el kit es una luminaria tipo LED de 23 W. En el Anexo B se encuentra el cuadro de cargas de la iluminación de respaldo. El anexo C contiene plano con la ubicación en planta de los diferentes sistemas Solatube que componen el diseño y el cableado correspondiente a la iluminación de respaldo.

4.7. PRESUPUESTO DE INVERSIÓN.

El presupuesto de inversión se encuentra consignado en las tablas 31, 32 y 33 que se presentan en páginas siguientes.

En las tablas 31 y 32 se encuentran consignados los precios de todos los posibles componentes y accesorios para cada de los dos sistemas seleccionados, Solatube

160 DS y Solatube 290 DS. Para este diseño se seleccionaron los ítems marcados en las tablas con el símbolo (*).

Para lograr menores costos se seleccionaron los componentes básicos del cada sistema. Se presentan los precios para los diferentes componentes y accesorios como una base para consulta de precios.

Tabla 31. Precios por unidad de sistemas Solatube 290 DS.

LUMINARIA SOLATUBE 160DS Y ACCESORIOS			
DESCRIPCION		VALOR	
		USD	PESOS
Solatube 160DS (25 cm) con base, Aro Blanco, Difusor Vusion & Lente con efecto Natural (*)		\$ 369,60	\$ 672.672,00
Tubo de extensión de 24" para Solatube 160DS		\$ 76,70	
Estilo	Aro Stainless	\$ 22,40	
	Aro Frostead Shade	\$ 22,40	
Difusor	Difusor Optiview	\$ 28,00	
Efecto	Warm, Softening, Warm Softening	\$ 11,20	
Funciones adicionales	Unidad de luz eléctrica de respaldo (*)	\$ 69,80	\$ 127.036,00
	Unidad de ventilación	\$ 277,80	
	Dimmer regulador de luz con switch	\$ 262,90	
Infraestructura adicional	Tubería PVC, Apagador, Caja PVC, Alambre 14		\$ 58.812,00
VALOR UNITARIO DEL CONJUNTO ÓPTICO 160DS Y ACCESORIOS		\$1.140,80	\$858.520,00

Tabla 32. Precios por unidad del sistema Solatube 290 DS

LUMINARIA SOLATUBE 290DS			
DESCRIPCION		VALOR	
		USD	PESOS
Solatube 290DS (25 cm) con base, Aro Blanco, Difusor Vusion & Lente con efecto Natural (*)		\$ 515,20	\$ 937.664,00
Tubo de extensión de 24" para Solatube 290DS		\$ 93,60	
Estilo	Aro Stainless	\$ 33,60	
	Aro Frostead Shade	\$ 33,60	
Difusor	Difusor Optiview	\$ 67,20	
Efecto	Warm, Softening, Warm Softening	\$ 22,40	
Funciones adicionales	Unidad de luz eléctrica de respaldo (*)	\$ 74,40	\$ 135.408,00
	Dimmer regulador de luz con switch	\$ 290,20	
Infraestructura adicional	Tubería PVC, Apagador, Caja PVC, Alambre 14		\$ 58.812,00
VALOR UNITARIO DEL CONJUNTO ÓPTICO 290DS Y ACCESORIOS		\$ 1.130,20	\$ 1.131.884,00

5. CONCLUSIONES GENERALES DEL PROYECTO

1. En la actualidad la oferta de los sistemas de iluminación natural cuenta con una amplia oferta de productos para diferentes latitudes y condiciones climáticas, esta circunstancia facilita la incorporación de este tipo de soluciones en las construcciones nuevas y las existentes. Debido a bajo nivel de penetración en el mercado de los sistemas de iluminación natural, los costos de producción se mantienen altos y la implantación de las soluciones están acompañadas de presupuestos importantes que retrasan las condiciones de inversión. Sin embargo en el futuro inmediato, el marco normativo y reglamentario debe evolucionar para motivar la incorporación de sistemas amigables con el medio ambiente en las construcciones nuevas. Adicionalmente la eficiencia energética es un componente importante del puntaje que se requiere para lograr una certificación de calidad verde para los proyectos.
2. Aun cuando los costos de inversión de los sistemas de iluminación natural basados en domo tubulares son elevados, los costos de operación y mantenimiento son casi nulos. Este contraste favorece la evaluación de la relación costo beneficio de los proyectos y se adhiere a las demás ventajas en los contextos ambientales y culturales.
3. Para que los resultados obtenidos resulten estéticos y funcionales en la implantación de los sistemas de iluminación natural, es conveniente que los aportes conceptuales se incorporen desde las primeras etapas del diseño arquitectónico de los proyectos de construcción, lo cual supone un mayor nivel de interacción en el equipo de diseño y una coordinación de esfuerzos que permitan la elaboración de una buena ingeniería detallada.

4. Para facilitar la aplicación de soluciones basadas en sistemas de iluminación natural, se advierte la necesidad de incorporar los componentes técnicos y constructivos correspondientes en reglamento técnico de iluminación y alumbrado público vigente. Esta situación se facilita debido a que la oferta comercial disponible incluye la información técnica necesaria para efectuar las simulaciones en la mayor parte de las herramientas de software para el diseño de sistemas de iluminación.
5. Aun cuando la información suministrada por el proveedor del sistema de domo tubulares permite la instalación de trayectorias curvas, para garantizar las mejores condiciones de operación del sistema se evitaron los cambios de trayectoria de los tubos de extensión, lo cual supone una ventaja debido a la ubicación del edificio en línea con la trayectoria y de la salida y puesta del sol. Un beneficio adicional es la mejor incidencia solar debido a la cercanía de Bucaramanga con respecto al ecuador.
6. Un requisito importante para el tratamiento técnico de los sistemas de iluminación natural es evitar la semejanza con los sistemas de iluminación artificial , es decir, aunque ambos satisfacen los mismos propósitos tienen características diferentes y el éxito de la implementación de un sistema de iluminación artificial en gran medida del grado de sensibilidad y experiencia del proyectista para establecer las variables endógenas y exógenas que permitan la selección de la mejor alternativa y topología del sistema.
7. Una restricción importante en Colombia es la limitada oferta tecnológica disponible, lo cual restringe las alternativas técnicas y las aplicaciones para domos tubulares. En un escenario futuro de mayor diversidad en la oferta tecnológica, y debido a condiciones de latitud y clima se facilitara la implantación de una mayor variedad de soluciones.

8. La motivación de la escuela de ingeniería eléctrica, electrónica y telecomunicaciones hacia la incorporación del sistema de domos luminosos como parte de un grupo de componentes amigables con el medio ambiente constituye un paso importante en la dinámica de generara una nueva tendencia a nivel del diseño y el uso de aplicaciones que faciliten los aportes conceptuales y pragmáticos en los procesos de misión de la institución.

9. Los sistemas de iluminación artificial se encuentran en un estado de desarrollo más avanzado que los sistemas de iluminación natural, sin embargo, si se valoran los sistemas de iluminación natural dejando de lado el valor económico del proyecto se pueden vislumbrar aspectos como: mejor confort en las instalaciones, no existen transformaciones de energía para su operación, bajo mantenimiento, incentiva creatividad para el desarrollo de nuevos sistemas de iluminación, entre otros.

BIBLIOGRAFÍA

- ✓ Agency, I. e. *Daylight in buildings*.
- ✓ Energía, m. d. (2010). *Reglamento técnico de iluminación y alumbrado público "RETILAP"*. Bogota.
- ✓ Indalux. (2002). *Curso de luminotecnia*.
- ✓ Kim, J. T. *Overview and new developments in optical daylighting systems for building*.
- ✓ Koshe, A. G.–R. *Simplifying the lightpipe design process*.
- ✓ *La energía y el reto de la sostenibilidad*. (2000).
- ✓ Monodraught. (n.d.). *Sunpipe technical*. Retrieved from <http://www.monodraught.com/technical/index.php>
- ✓ Solatube. *Solatube Test report – Solatube40.IES*.
- ✓ Wikipedia. (n.d.). Retrieved mayo 10, 2010, from wikipedia : <http://es.wikipedia.org/wiki/Wikipedia:Portada>

ANEXOS

ANEXO A. Información sistemas Solatube 160DS y 290DS, formato digital pdf (Especificaciones técnicas, instrucciones de instalación, planos arquitectónicos, fotometría).

ANEXO B. Cuadro de cargas para iluminación de respaldo.

Tabla 34. Cuadro de cargas iluminación de respaldo

PROYECTO:		TABLERO TUBOS REFLECTANTES E3T								E3T UIS			Mayo 26 de 2012		REV NO.	1		
LONGITUDES					CARACTERISTICAS DE LA CARGA				VALORES NOMINALES			MOMENTO ELECTRICO			REGULACION [%]		CALIBRE Y PROTECCION	
TRAMO		LONG. (m)			P	S	FASES	FP	CTE	MOMENTO	KG	K	PARCIAL	TOTAL	PROT.	CALIBRE		
Inicio	Fin	V	H	Total	[W]	[KVA]										[A]	[KVA*m]	[A]
TN5	TN	2,0	15,0	17,0	4.250	5	2	0,85	24,04	85,00	207,161	4,7883E-03	0,9160	0,916	2X30	Cu 8	Cu 10	
TN	C1	2,0	35,0	37,0	276	0,3247	1	0,85	2,71	12,01	504,466	3,5032E-02	1,7890	2,705	1X15	Cu 12	Cu 14	
TN	C2	2,0	32,0	34,0	207	0,2435	1	0,85	2,03	8,28	504,466	3,5032E-02	1,2330	2,149	1X15	Cu 12	Cu 14	
TN	C3	2,0	42,0	44,0	391	0,4600	1	0,85	3,83	20,24	504,466	3,5032E-02	3,0130	3,929	1X15	Cu 12	Cu 14	

ANEXO C. Plano físico y formato digital con copia en archivo llamado "Diseño tubos reflectantes reforma E3T.dwg".

ANEXO D. Memorias de cálculo, Dialux. Formato digital .pdf.