

PROPUESTA METODOLÓGICA PARA LA SELECCIÓN DE TECNOLOGÍAS DE ILUMINACIÓN MIXTOS (NATURAL-ARTIFICIAL) PARA EDIFICACIONES

Autores:

Omar Barrera Mendoza

Ronald Ricardo Martínez Arias



ESCUELA DE INGENIERÍAS
ELÉCTRICA, ELECTRÓNICA
Y DE TELECOMUNICACIONES



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

Bucaramanga

2012

**PROPUESTA METODOLÓGICA PARA LA
SELECCIÓN DE TECNOLOGÍAS DE
ILUMINACIÓN MIXTOS (NATURAL-ARTIFICIAL)
PARA EDIFICACIONES**

Omar Barrera Mendoza

Ronald Ricardo Martínez Arias

Trabajo de grado para optar al título de Ingeniero Electrónico

Director:

Msc. GERMÁN ALFONSO OSMA PINTO

Codirectores:

PhD. JOHANN FARITH PETIT SUÁREZ

MPE. JAIME GALINDO CÁRDENAS

**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
FACULTAD DE INGENÍERIAS FÍSICO MECÁNICAS
ESCUELA DE INGENÍERIAS ELÉCTRICA, ELECTRÓNICA Y
TELECOMUNICACIONES**

Bucaramanga

2012



*A mis padres, Gladys y Demetrio.
A mis hermanos: Carlos, Cris, Cesar y Juliancito.
A mi princesita Mildrey*

Omar



Tabla de Contenido

1. INTRODUCCIÓN.....	21
1.1 EDIFICACIONES VERDES	21
1.2 APLICACIONES ENERGÉTICAS SOSTENIBLES	22
1.3 ILUMINACIÓN DE INTERIORES.....	22
1.4 MARCO REGLAMENTARIO.....	23
1.5 DESCRIPCIÓN DEL TRABAJO DE GRADO.....	24
1.5.1 Objetivos	25
1.5.2 Alcance	26
1.6 RESEÑA DEL DOCUMENTO.....	27
2. ILUMINACIÓN NATURAL.....	29
2.1 TIPOS DE ILUMINACIÓN NATURAL	29
2.1.1 Sistemas de iluminación natural con sombreado	30
2.1.2 Sistemas de iluminación natural sin sombreado	31
2.2 TECNOLOGÍAS PARA LA ILUMINACIÓN NATURAL	34
2.2.1 Estante de luz	38
2.2.2 Cortina y sistema de persianas.....	39
2.2.3 Panel prismático.....	40
2.2.4 Panel cortado a laser	41
2.2.5 Tragaluz angular selectivo	43
2.2.6 Guía de luz sombreada	44
2.2.7 Cristal conductor solar	45
2.2.8 Vidrio de luz cenital con elementos ópticos holográficos	46
2.2.9 Persiana solar anidólica	47
2.2.10 Sistema de sombreado direccional con elemento óptico holográfico..	47
2.2.11 Techo anidólico	48
2.2.12 Abertura anidólica cenital.....	50



2.2.13	Heliostato	51
2.2.14	Ducto de fibra óptica	52
2.3	COMPONENTES ESTRUCTURALES DE CAPTACIÓN DE LUZ NATURAL.....	53
2.3.1	Galería	53
2.3.2	Patio.....	53
2.3.3	Atrio.....	54
2.3.4	Muro cortina	55
2.3.5	Techo traslucido.....	55
2.3.6	“Porche”	56
2.3.7	Toldo.....	56
2.3.8	Cúpula.....	57
3.	TECNOLOGÍAS DE ILUMINACIÓN ARTIFICIAL.....	58
3.1	LÁMPARAS INCANDESCENTES	59
3.2	LÁMPARAS DE DESCARGA	59
3.2.1	Lámparas de mercurio a alta presión.....	59
3.2.2	Lámparas de mercurio de baja presión (lámparas fluorescentes tubulares).....	60
3.2.3	Lámparas de vapor de mercurio con halogenuros.....	61
3.2.4	Lámparas de sodio a baja presión	62
3.2.5	Lámparas de sodio de alta presión	63
3.3	LÁMPARAS DE INDUCCIÓN ELECTROMAGNÉTICA	64
3.4	LÁMPARAS LED	65
4.	PROCEDIMIENTO PARA EVALUAR EL DESEMPEÑO LUMÍNICO DE TECNOLOGÍAS DE ILUMINACIÓN NATURAL EN ESPACIOS INTERIORES.....	67
4.1	CASO A: CONSTRUCCIÓN EXISTENTE	68
4.1.1	Medida del nivel de iluminación sobre la superficie de trabajo	69
4.1.2	Determinación del nivel de iluminación sobre la fachada exterior (E_e).....	71
4.1.3	Determinación de la curva de FIN.....	79



4.1.4	Cálculo del nivel de iluminación (NI) sobre la superficie de trabajo. ...	81
	Fuente: Autores.	81
4.1.5	Evaluar el ahorro energético generado por la tecnología de iluminación natural sobre los niveles de iluminación reglamentados para el sitio.....	82
	Fuente: Autores.	82
4.1.6	Evaluar el cambio o complemento de tecnologías de iluminación natural a partir de las curvas FIN, con el fin de lograr un mayor ahorro de energía eléctrica.	83
4.2	CASO B: CONSTRUCCIÓN EN FASE DE DISEÑO	87
4.2.1	Cálculo del nivel de iluminación natural a partir de las curvas FIN ...	87
4.2.2	Cálculo del nivel de iluminación a partir de la utilización de software .	87
4.3	EJEMPLO ILUSTRATIVO DEL PROCEDIMIENTO PARA EVALUAR EL DESEMPEÑO LUMÍNICO DE TECNOLOGÍAS DE ILUMINACIÓN NATURAL EN INTERIORES PARA LA OPTIMIZACIÓN DE LOS RECURSOS ENERGÉTICOS	89
5.	SELECCIÓN DE TECNOLOGÍAS DE ILUMINACIÓN	101
5.1	SELECCIÓN DE TECNOLOGÍAS PARA LA ILUMINACIÓN NATURAL	102
5.1.1	Identificación de áreas del edificio	102
5.1.2	Identificación del ambiente luminoso recomendado	103
5.1.3	Análisis de características y prestaciones lumínicas de cada tecnología.....	103
5.1.4	Selección de la tecnología	103
5.2	SELECCIÓN DE TECNOLOGÍA PARA LA ILUMINACIÓN ARTIFICIAL	110
6.	IDENTIFICACIÓN DE PROTOCOLOS INMÓTICOS DE MEJORES PRESTACIONES PARA SISTEMAS DE ILUMINACIÓN MIXTOS (NATURAL-ARTIFICIAL)	113
6.1	GENERALIDADES SOBRE PROTOCOLOS INMÓTICOS	114
•	Tipos de protocolo:.....	115
•	Medio de comunicación:	115



• Velocidad de transmisión:	115
• Topología:	115
• Alcance:	115
• Número de dispositivos:	115
6.2 DESCRIPCION DE PROTOCOLOS DE COMUNICACIÓN SEGÚN SUS PRESTACIONES PARA LA ILUMINACIÓN DE ESPACIOS INTERIORES	119
7. ESTRATEGIAS DE DISEÑO PARA LA AUTOMATIZACIÓN DE SISTEMAS DE ILUMINACIÓN.....	122
7.1 GENERALIDADES EN UN SISTEMA DE CONTROL	122
7.1.1 Arquitectura de un sistema automatizado	122
7.1.2 Elementos sensores.....	125
7.2 GUÍA PARA EL DISEÑO DE UNA ESTRATEGIA DE AUTOMATIZACIÓN DE UN SISTEMA DE ILUMINACIÓN.....	127
7.2.1 Sectorización de la edificación.....	128
7.2.2 Selección del tipo de sensor según área	128
7.2.3 Identificación del sistema de control según propósito	130
7.2.4 Unificación estratégica de control para sistemas de iluminación mixtos.....	133
8. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.....	135
8.1 RESULTADOS Y CONCLUSIONES.....	135
8.2 RECOMENDACIONES.....	139
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	140
ANEXOS.....	145



ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Tipos de iluminación natural.	29
Tabla 2. Características generales de las tecnologías de iluminación natural.	34
Tabla 3. Descripción de estante de luz.	39
Tabla 4. Descripción de la cortina y sistema de persianas.	40
Tabla 5. Características del panel prismático.	41
Tabla 6. Características del panel cortado a laser.	42
Tabla 7. Características del Tragaluz angular selectivo.	43
Tabla 8. Características de la Guía de luz sombreada.	44
Tabla 9. Características del Cristal conductor solar.	45
Tabla 10. Descripción del vidrio de luz cenital con elementos ópticos holográficos.	46
Tabla 11. Características de las persianas solares anidólicas.	47
Tabla 12. Descripción del sistema de sombreado direccional con elemento óptico holográfico.	48
Tabla 13. Descripción del techo anidólico.	49
Tabla 14. Descripción de la abertura anidólica cenital.	50
Tabla 15. Características del sistema de heliostatos.	51
Tabla 16. Características del sistema de iluminación por fibra óptica.	52
Tabla 17. Características de una galería.	53
Tabla 18. Características de un patio.	54
Tabla 19. Características de un atrio.	54
Tabla 20. Características de un muro cortina.	55
Tabla 21. Características de un techo translucido.	55
Tabla 22. Descripción de un porche.	56
Tabla 23. Características de un toldo.	56
Tabla 24. Descripción de una cúpula.	57
Tabla 25. Principio de operación de las lámparas de mercurio a alta presión.	59



Tabla 26. Descripción de lámparas de mercurio de baja presión (lámparas fluorescentes tubulares).....	60
Tabla 27. Descripción de las lámparas de vapor de mercurio con halogenuros...61	61
Tabla 28. Descripción de la lámpara de sodio a baja presión.....	62
Tabla 29. Descripción de las lámparas de sodio a alta presión.	63
Tabla 30 Descripción de las lámparas de inducción electromagnética.....	64
Tabla 31. Descripción de las lámparas LED.	66
Tabla 32. Formato para la toma de datos del nivel de iluminación en el plano de trabajo.....	70
Tabla 33. Principales tipos de instrumentos para medir radiación solar.	72
Tabla 34. Métodos para calcular la radiación global diaria a partir del valor de horas de Sol.....	74
Tabla 35. Relación de los valores medios mensuales de radiación difusa y directa diaria.	75
Tabla 36. Relación de los valores de radiación difusa diaria a partir de la radiación directa diaria.	76
Tabla 37. Relación de los valores de radiación difusa horaria a partir de la radiación directa horaria.	76
Tabla 38. Expresiones para calcular la radiación reflejada sobre superficies inclinadas.....	77
Tabla 39. Métodos para el cálculo de la radiación difusa sobre una superficie inclinada.....	78
Tabla 40. Formato recomendado para la tabulación de los datos para dibujar FIN.	80
Tabla 41. <i>Valores de FIN adecuados</i>	80
Tabla 42. Relación de uniformidad de iluminación en un local.	81
Tabla 43. Formato para la matriz de NI con los valores en lux y en porcentaje con respecto al nivel de luz exterior.....	81
Tabla 44. Formato para registrar el porcentaje de aporte de luz natural.	82



Tabla 45. Factor de iluminación estante de luz.....	84
Tabla 46. Factor de iluminación cortinas y sistemas de persianas.	84
Tabla 47. Factor de iluminación paneles prismáticos.	85
Tabla 48. Factor de iluminación panel cortados a laser.....	85
Tabla 49. Factor de iluminación cristal conductor solar.	86
Tabla 50. Factor de iluminación vidrio de luz cenital con elemento óptico holográfico.	86
Tabla 51. Programas para el diseño de sistemas de iluminación natural.	87
Tabla 52. Programas para el diseño de sistemas de iluminación artificial.	88
Tabla 53. Descripción del área de trabajo en estudio.....	89
Tabla 54. Niveles de iluminación sobre el plano de trabajo.....	91
Tabla 55. Niveles de exterior medidos y calculados	94
Tabla 56. Graficas del factor de iluminación Natural (FIN) E_i/E_e	95
Tabla 57. Aporte de iluminación producto de la luz natural.	98
Tabla 58. Escala de asignación directa.	105
Tabla 59. Escala fundamental de Saaty.	105
Tabla 60. Índice de consistencia aleatorio.....	107
Tabla 61. Ranking obtenido para las tecnologías de iluminación natural.	110
Tabla 62. Ranking obtenido para las tecnologías de iluminación artificial.	112
Tabla 63 Comparación de protocolos para sistemas inmóticos.....	116
Tabla 64. Ranking obtenido para los protocolos de comunicación.	121
Tabla 65. Descripción de las tecnologías para los sensores ocupacionales.	125
Tabla 66. Descripción de las tecnologías para los sensores fotoeléctricos y horarios.....	126
Tabla 67. Consideraciones en la instalación de sensores.	127
Tabla 68. Estructura del principio de modularidad.....	128
Tabla 69. Recomendación en la elección de sensores en función de la labor y el número de ocupantes	129



Tabla 70. Sensores ocupacionales recomendados en función del espacio a controlar.....	129
Tabla 71. Consideraciones para la selección de sistemas de protección solar. ...	130
Tabla 72. Niveles de iluminación adecuados.....	133
Tabla 73. Selección de la tecnología de iluminación natural utilizando el método AHP.	145
Tabla 74. Ponderación para los sub-criterios que conforman el CRITERIO TÉCNICO.....	149
Tabla 75. Ponderación para los sub-criterios que conforman el CRITERIO ECONÓMICO.	152
Tabla 76. Ponderación para los criterios que conforman el modelo.	154
Tabla 77. Ponderación para los sub-criterios que conforman el criterio Versatilidad y adaptabilidad.....	157
Tabla 78. Ponderación para los sub-criterios que conforman los criterios de accesibilidad.	158
Tabla 79. Ponderación para los sub-criterios que conforman los criterios de accesibilidad.	159
Tabla 80. Ponderación para los sub-criterios que conforman los criterios de características técnicas.....	160
Tabla 81. Ponderación para los sub-criterios que conforman los criterios del modelo.....	161



ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Clasificación de los sistemas de iluminación natural.	30
Figura 2. Ejemplos de sistemas guía de luz difusa	31
Figura 3. Ejemplos de sistemas guía de luz directa	31
Figura 4. Ejemplos de sistemas de difusión o dispersión de la luz.	32
Figura 5. Ejemplos de sistemas de toma y transporte de la luz día.	32
Figura 6. Variables geométricas de un recinto.	34
Figura 7. Fuentes de iluminación artificial.	58
Figura 8. Procedimiento para realizar el diseño de un sistema de iluminación natural en una construcción existente.	68
Figura 9. Planos de trabajo en un recinto.	69
Figura 10. Variación del nivel de iluminación en función de la distancia a la abertura.	70
Figura 11. Variación del nivel de iluminación en función de la hora del día.	71
Figura 12. Método de cálculo de E_e	71
Figura 13. Ejemplo de una edificación con una toma de luz natural inclinada.	77
Figura 14. Sala de referencia.	83
Figura 15. Niveles de iluminación exterior E_e	94
Figura 16. Procedimiento para la selección de tecnologías de iluminación.	102
Figura 17. Etapas para el cálculo de consistencia de las prioridades de los criterios y atributos.	106
Figura 18. Modelo jerárquico para la selección de la tecnología de iluminación natural.	109
Figura 19. Modelo jerárquico para la selección de la tecnología de iluminación artificial.	111
Figura 20. Modelo jerárquico para la selección de protocolos de comunicación en sistemas de iluminación natural y artificial.	120
Figura 21. Configuración de una arquitectura centralizada.	123
Figura 22. Configuración de la arquitectura descentralizada.	123



Figura 23. Configuración de la arquitectura distribuida.....	124
Figura 24. Configuración de la arquitectura mixta.....	124
Figura 25. Clasificación de los sensores para la automatización de la iluminación.	125
Figura 26. Procedimiento para la formulación de la estrategia de control.	127
Figura 27. Esquema para un sistema temporizado.....	131
Figura 28. Esquema para un sistema detector de presencia.....	132
Figura 29. Diagrama de bloques para un sistema de control de iluminación.....	134
Figura 30. Diagrama de flujo del funcionamiento del sistema control para iluminación.....	134



ÍNDICE ANEXOS

ANEXO A ASIGNACIÓN DE LAS PRIORIDADES DE LOS CRITERIOS DE SELECCIÓN DE LA TECNOLOGÍA DE ILUMINACIÓN NATURAL.....	145
ANEXO B ASIGNACION DE LAS PRIORIDADES DE LOS CRITERIOS DE SELECCIÓN PARA LAS TECNOLOGÍAS DE ILUMINACIÓN ARTIFICIAL.....	149
ANEXO C ASIGNACIÓN DE LOS CRITERIOS DE SELECCIÓN PARA LOS PROTOCOLOS DE COMUNICACIÓN CON MEJORES PRESTACIONES.....	157



RESUMEN

TÍTULO: PROPUESTA METODOLÓGICA PARA LA SELECCIÓN DE TECNOLOGÍAS DE ILUMINACIÓN MIXTOS (NATURAL-ARTIFICIAL) PARA EDIFICACIONES.*

AUTORES: BARRERA MENDOZA, Omar; MARTÍNEZ ARIAS, Ronald Ricardo.**

PALABRAS CLAVES: Inmótica, Iluminación natural, protocolo de comunicación, tecnologías de iluminación.

DESCRIPCIÓN

La domótica e inmótica juegan un papel importante en la contribución con el ahorro energético en las edificaciones, ya que falencias tecnológicas, operativas y de infraestructura eléctrica conllevan a las edificaciones a un desperdicio de energía eléctrica, en cuanto a iluminación se refiere, se evidencia en iluminación artificial encendida en horas y en sitios en donde se puede aprovechar la iluminación natural, iluminación artificial innecesaria cuando no hay presencia de usuarios y la falta de actualización tecnológica de dispositivos para iluminación.

El aprovechamiento de tecnologías de iluminación natural y la implementación de estrategias de automatización en el sistema de iluminación permiten un ahorro considerable de energía eléctrica a su vez que brindan condiciones lumínicas favorables para las actividades realizadas por sus usuarios.

En este trabajo se plantea una estrategia para la selección de tecnologías de iluminación, dando a conocer las principales tecnologías de iluminación natural y artificial, planteando una metodología que permite evaluar el rendimiento lumínico de las tecnologías de iluminación natural implementadas en una edificación con el objeto de ser complementada con iluminación artificial para cumplir los requerimientos lumínicos exigidos por los reglamentos técnicos de iluminación, además de esto se presenta una descripción de las principales tecnologías de comunicación que implementan protocolos de gran aplicación en la domótica e inmótica, también se hace la descripción del funcionamiento y aplicabilidad de algunos instrumentos dedicados a la captación de las variables relacionadas con la iluminación, detectores de presencia y temporizadores; que son unas de las herramientas primordiales en la automatización de sistemas de iluminación.

* Trabajo de Grado

** Facultad de ingenierías físico mecánicas. Escuela de Ingenierías Eléctrica, Electrónica y Telecomunicaciones. Director: Msc. Germán Alfonso Osma pinto. Codirectores: PhD. Johann Farith Petit Suarez, MPE. Jaime Galindo Cárdenas.



ABSTRACT

TITLE: PROPOSED METHODOLOGY FOR SELECTION OF LIGHTING TECHNOLOGIES MIXED (NATURAL, ARTIFICIAL) FOR BUILDINGS¹.

AUTHORS: BARRIER MENDOZA, Omar; MARTINEZ ARIAS, Ronald Ricardo².

KEYWORDS: Building Automation, natural lighting, communication protocol, lighting technologies.

DESCRIPTION

The building automation play an important role in contributing to energy saving in buildings, as technological failures, operational and electrical infrastructure leading to the buildings to a waste of electricity in lighting is concerned, is evident in artificial lighting on at times and places where you can take advantage of natural lighting, artificial lighting unnecessary when no user presence and lack of technological upgrading of lighting devices.

The use of daylighting technologies and implementation of automation strategies in the lighting system allow considerable savings in power to turn that provide favorable light conditions for the activities of its users.

This paper presents a strategy for the selection of lighting technologies, revealing the key technologies of natural and artificial lighting, posing a methodology to evaluate the light output of daylighting technologies implemented in a building in order to be supplemented with artificial illumination to meet lighting requirements required by the technical regulations of lighting, besides this is a description of the key technologies that implement communication protocols widely used in the building automation, is also do the functional description and applicability of some instruments dedicated to capturing the variables related to lighting, motion detectors and timers, which are some of the key tools in the automation of lighting systems.

¹ Grade Paper

² Physical-mechanical engineering faculty. School of Electrical, Electronics and Telecommunications. Director: Msc. Alfonso Germain Osma Pinto. Codirectores: PhD. Johann Farith Petit Suarez, MPE. Jaime Galindo Cárdenas.



1. INTRODUCCIÓN

En la actualidad, se aprecia como la industria de la construcción (tipo residencial y comercial) busca promover la disminución de su impacto ambiental; con base en factores como el buen diseño arquitectónico de las edificaciones, a fin de lograr un aprovechamiento significativo de la luz día, y en consecuencia, una disminución del uso de sistemas de iluminación artificial [1].

El consumo de energía eléctrica debido a iluminación artificial corresponde a más del 30% del consumo total de una edificación de cualquier tipo (comercial, industrial, residencial, etc.) [2]. Un factor determinante para la reducción de este consumo energético es la modernización de las instalaciones eléctricas existentes enfocándolas al uso racional y eficiente de la energía [3].

Falencias tecnológicas, operativas y de infraestructura eléctrica conllevan a las edificaciones a un desperdicio de energía eléctrica, lo cual se evidencia en: iluminación artificial encendida en horas y en sitios en donde se puede aprovechar la iluminación natural, iluminación artificial innecesaria cuando no hay presencia de usuarios y la falta de actualización tecnológica de dispositivos para iluminación. En el caso particular de la Universidad Industrial de Santander, se tiene que su planta física se encuentra en un proceso de modernización. Dentro de las propuestas de mejoramiento de su campus universitario, se encuentra la adecuación del Edificio Eléctrica de la Escuela de Ingenierías Eléctrica, Electrónica y de Telecomunicaciones, que se caracterizará por implementar principios de sostenibilidad, entre ellos la tecnología para el aprovechamiento de la luz natural.

1.1 EDIFICACIONES VERDES

Son construcciones creadas para aumentar la eficiencia de los recursos naturales y reducir el impacto sobre el medio ambiente, al mismo tiempo que mejoran el bienestar de quienes los ocupan [4]. Estas edificaciones presentan avances y



desarrollos en varias áreas de aplicación, eficiencia del terreno, manejo de recursos y materiales amigables con el ambiente, ahorro de agua, optimización del uso de energía, armonía entre el aire y el ambiente interior [5]. En términos generales una edificación verde está localizada, diseñada, construida y operada para mejorar el bienestar de sus ocupantes y mantener una armonía con la naturaleza [6].

1.2 APLICACIONES ENERGÉTICAS SOSTENIBLES

En una edificación se pueden implementar innumerables tecnologías que contribuyen a reducir el impacto ecológico y disminuir los costos de operación. Se encuentran desde techos verdes, utilización de aguas grises, energía eléctrica a partir de energía eólica, utilización de la biomasa, celdas solares y desarrollos innovadores de los acristalamientos con propiedades ópticas que permiten tener un mejor aprovechamiento de la luz día, así como dispositivos que reflejan, refractan y transportan la luz natural a lugares distantes de las tomas de luz convencionales. Estas aplicaciones, además de permitir ahorros considerables de energía, permiten crear ambientes agradables que generan confort en los ocupantes [7].

1.3 ILUMINACIÓN DE INTERIORES

La iluminación se define como la cantidad de flujo luminoso por unidad de área, su unidad es el lux [8]. Puede considerarse como el producto de la luz sobre una superficie. Donde la luz es una energía en forma de radiación electromagnética capaz de afectar el órgano visual humano, compuesta de partículas energizadas llamadas fotones, cuyo grado de energía y frecuencia determinan la longitud de onda y el color [9].

En iluminación se encuentran términos como longitud de onda, índice de reproducción cromático, intensidad luminosa etc. A continuación se describen algunas de ellos:



Intensidad luminosa (I): es la energía luminosa emitida en una dirección, su unidad es la candela (cd) que es aproximadamente la intensidad emitida por una vela [8].

Flujo luminoso (ϕ): es la cantidad de energía luminosa emitida por una fuente, su unidad es el lumen (lm) [8].

Iluminancia (E): Densidad de flujo luminosa que incide sobre una superficie, su unidad es el lux (lx) [15]. $1 \text{ lux} = 1 \text{ lm/m}^2$

Luminancia o brillo (L): En un punto de una superficie, en una dirección, se interpreta como la relación entre la intensidad luminosa en la dirección dada producida por un elemento de la superficie que rodea el punto, con el área de la proyección ortogonal del elemento de superficie sobre un plano perpendicular en la dirección dada. La unidad de luminancia es candela por metro cuadrado. (Cd/m^2). Bajo el concepto de intensidad luminosa, la luminancia puede expresarse como [15].

$$L = \left(\frac{dI}{dA} \right) * \frac{1}{\cos(\theta)} \quad (1.1)$$

Donde θ es el ángulo entre la normal de la superficie y la dirección dada.

1.4 MARCO REGLAMENTARIO

El Ministerio de Minas y Energía, mediante el Reglamento Técnico de Iluminación y Alumbrado Público RETILAP³, brinda diversos criterios de diseño e instalación de iluminación, estableciendo los requerimientos mínimos de iluminación, de seguridad y haciendo uso racional y eficiente de la energía en iluminación para los distintos escenarios que se puedan presentar en la elaboración de una edificación en diversos sectores como son el residencial, el comercial, el industrial, el alumbrado exterior y público; es una fuerte herramienta para el diseño de alumbrado interior que comprende: alumbrado en oficinas, alumbrado en instituciones educativas, salas de lectura y auditorios, entre otros.

³ RETILAP versión 30 de marzo del 2010.



Las secciones de mayor trascendencia para el diseño de iluminación interior según el Reglamento Técnico de Iluminación y Alumbrado Público son las siguientes:

SECCIONES DEL REGLAMENTO TÉCNICO DE ILUMINACIÓN Y ALUMBRADO PÚBLICO (RETILAP) APLICABLES A ILUMINACION INTERIOR PARA EDIFICACIONES						
SECCION 100 OBJETO		SECCION 200 REQUISITOS GENERALES DE UN SISTEMA DE ILUMINACION		SECCION 300 REQUISITOS GENERALES DE LOS PRODUCTOS DE ILUMINACIÓN O ALUMBRADO PÚBLICO	SECCION 400	
110	Alcances	210	Generalidades del diseño de iluminación.		410	Requisitos generales del diseño de alumbrado interior.
110.1	Instalaciones				420	Requisitos específicos de iluminación interior.
110.2	Productos	220	La iluminación en el análisis de riesgos.		430	Cálculos para iluminación interior.
110.3	Personas				440	Eficiencia energética en las instalaciones de iluminación interior.
110.5	Excepciones	230	Medición de variables fotométricas.		450	Eficiencia energética mediante control del alumbrado interior.
					460	La domótica y la inmótica en la iluminación.
					480	Iluminación de ambientes e instalaciones especiales.
				490	Procedimientos para las mediciones fotométricas en iluminación interior.	

1.5 DESCRIPCIÓN DEL TRABAJO DE GRADO

Este trabajo de investigación titulado **“Propuesta metodológica para la selección de tecnologías de iluminación mixtos (natural-artificial) para edificaciones”** se origina ante la necesidad de la Escuela de Ingeniería Eléctrica Electrónica y Telecomunicaciones de aportar información técnica clara para fortalecer el diseño del sistema de iluminación mixto del Edificio Eléctrica II, que brinde las condiciones necesarias de confort visual a sus ocupantes y que logre



una integración de la luz natural y artificial de manera eficiente, a partir de estrategias de automatización en iluminación natural y artificial.

1.5.1 *Objetivos*

Es objeto de este proyecto establecer una propuesta metodológica para la selección de tecnologías de iluminación mixta (natural-artificial) de espacios interiores en edificaciones a partir de lineamientos vigentes a nivel mundial. Para lo cual se han definido los siguientes objetivos específicos:

- Realizar la descripción del funcionamiento y de los parámetros de diseño de tecnologías de iluminación natural y artificial que se encuentran en el mercado.
- Desarrollar un procedimiento para evaluar el desempeño lumínico en espacios interiores de tecnologías de iluminación natural según la orientación de la edificación, el movimiento solar característico del lugar y el entorno.
- Proponer un procedimiento para la selección de tecnologías de iluminación.
- Identificar los protocolos domóticos de mejores prestaciones para sistemas de iluminación mixtos (natural-artificial).
- Establecer una guía para el diseño de estrategias de automatización de los sistemas de iluminación mixtos (natural-artificial).



1.5.2 Alcance

Con el fin de conocer las tecnologías existentes de iluminación natural e iluminación artificial, se establecerá una breve descripción del funcionamiento de cada una de ellas y se indicarán los parámetros para la adaptación en cada espacio interior de una edificación preestablecida.

El procedimiento para evaluar el desempeño lumínico en espacios interiores buscará determinar el nivel de iluminación en función de la profundidad y la uniformidad total a partir de la radiación solar incidente en las aberturas de cada espacio interior y de las características de transmisión de la luz solar de cada tecnología. Esto requerirá el manejo de métodos matemáticos para el cálculo de la radiación sobre superficies inclinadas, los cuales son de considerable complejidad. Así mismo, datos históricos de radiación solar del sitio.

El procedimiento para la selección de tecnologías empleará criterios tales como: costo, consumo energético, rendimiento lumínico, profundidad media de iluminación, protección de la radiación solar directa, protección al deslumbramiento, practicidad, bajo mantenimiento y adaptabilidad a sistemas automatizados. Se buscará evaluar los criterios establecidos en cada tecnología de forma cuantitativa con el fin de seleccionar las tecnologías con mejores prestaciones. Los criterios serán ponderados según el grado de importancia y la clase de tecnología (natural y artificial).

En cuanto a la selección del protocolo domótico, se realizará un análisis de las características técnicas de los principales protocolos de comunicación utilizados comercialmente en el campo de la domótica, estableciendo una comparación entre ellos, para luego identificar los más prometedores, teniendo como criterios fundamentales de selección: el costo, la disponibilidad, viabilidad y adaptabilidad.



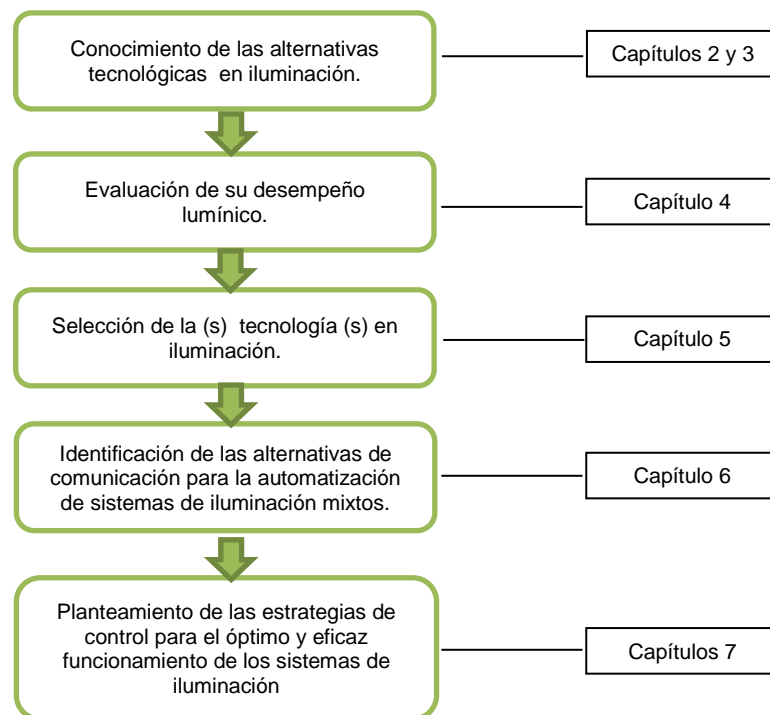
El protocolo específico de trabajo será seleccionado por el diseñador con base en la identificación y descripción realizada de las alternativas más prometedoras.

La guía de diseño de estrategias de automatización deberá contemplar la identificación y cuantificación de regímenes de iluminación típicos, niveles de iluminación, protección solar y de deslumbramiento, que junto a la selección de sensores y necesidades de comunicación, permitirán describir la información necesaria a ser programada.

1.6 RESEÑA DEL DOCUMENTO

La metodología que se implementó para el desarrollo de este documento se encuentra sintetizada en el siguiente diagrama de bloques:

PROPUESTA METODOLOGICA PARA LA SELECCIÓN DE TECNOLOGIAS DE ILUMINACIÓN MIXTOS (NATURAL -ARTIFICIAL) PARA EDIFICACIONES





El presente documento está compuesto por siete capítulos, los cuales se distribuyen de la siguiente forma:

En el capítulo 1, se hace la presentación del trabajo de investigación indicando objetivos y alcances propuestos.

En el capítulo 2, se presenta una recopilación de las tecnologías de iluminación natural, se establece una breve descripción de funcionamiento de cada una de ellas y se indicarán los parámetros para la adaptación en cada espacio de una edificación.

En el capítulo 3, se describen las tecnologías de iluminación artificial desarrolladas, especificando sus principales características, principios de funcionamiento y aplicaciones más comunes.

En el capítulo 4, se presenta un procedimiento para evaluar el desempeño lumínico de tecnologías de iluminación natural en espacios interiores teniendo en cuenta dos criterios: si se trata de una construcción ya existente o de una construcción en fase de diseño.

El capítulo 5, expone un análisis para la selección de tecnologías de iluminación natural y artificial, presentadas en los capítulos 2 y 3, basado en las características y prestaciones propias de cada tecnología.

En el capítulo 6, se presenta un análisis de las características técnicas de los protocolos domóticos y se realiza una identificación del protocolo con mejores prestaciones para sistemas de iluminación (natural y artificial).

En el capítulo 7, se plantea una estrategia para la automatización de la iluminación en edificaciones, ofrece al diseñador de un sistema de iluminación mixto, los pasos a seguir para formular la estrategia de control del sistema de iluminación.

Para finalizar, se presentan las conclusiones y recomendaciones correspondientes al presente trabajo de investigación.



2. ILUMINACIÓN NATURAL

En la actualidad, la búsqueda de la optimización del uso de recursos energéticos y una mejor calidad en los sistemas de iluminación, promueven la aparición de tecnologías y nuevas estrategias de iluminación, enfocadas al aprovechamiento significativo de la luz natural.




En este capítulo se expone un conjunto de tecnologías en iluminación natural, algunas no disponibles en el mercado nacional.

2.1 TIPOS DE ILUMINACIÓN NATURAL

La cantidad, la calidad y la distribución de la luz interior de un local dependen del funcionamiento conjunto de los sistemas de iluminación artificial y de las aberturas o tomas de luz natural en la estructura.

Los sistemas de iluminación natural pueden clasificarse en tres tipos: lateral, cenital y combinada [10], como se muestra en la Tabla 1.

Tabla 1. Tipos de iluminación natural.

Iluminación lateral	<p>La luz ingresa desde una abertura lateral en la fachada, con esto se tiene un nivel alto de iluminancia en una área cercana a la abertura.</p> <p>Las ventanas orientadas al sur en el hemisferio norte reciben iluminación directa todo el día, mientras en el hemisferio sur no reciben iluminación directa, sólo reciben iluminación difusa, las tomas laterales en las zonas tropicales reciben de manera moderada la radiación directa y en un ángulo muy elevado.</p>	
Iluminación cenital	<p>Este tipo de luz incide sobre los objetos de forma vertical y describiendo un ángulo muy agudo. En este tipo de iluminación se indica la distribución de las fuentes luminosas en función de la altura del local.</p>	
Iluminación combinada	<p>Este tipo de iluminación presenta aberturas en las fachadas y en los techos, en instalaciones donde la abertura está por debajo de 2,5 m se considera lateral, por encima de esta altura se considera iluminación cenital.</p>	

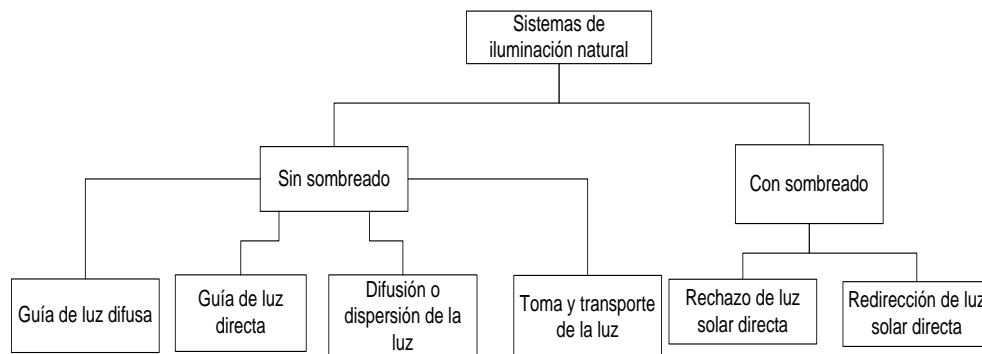
Fuente: [11].



En edificios de mediana y gran altura, generalmente se usan núcleos de ventilación y de ingreso de luz; sin embargo, se presentan áreas distantes a las ventanas que requieren de iluminación adicional; es por ello, que se han desarrollado sistemas de captación y distribución de la iluminación natural.

A continuación se presenta una amplia gama de sistemas avanzados de iluminación natural; los cuales se pueden clasificar en sistemas con sombreado y sistemas sin sombreado, como se muestra en la Figura 1.

Figura 1. Clasificación de los sistemas de iluminación natural.



Fuente: Autores.

2.1.1 *Sistemas de iluminación natural con sombreado*

Se pueden clasificar en: *i)* sistemas que se basan principalmente en capturar la luz difusa y rechazar la luz solar directa, y en *ii)* sistemas que utilizan la luz solar directa y la envían al interior del recinto a una altura superior al nivel visual horizontal. El uso de sistemas convencionales de protección solar, tales como toldos plegables, reducen significativamente el ingreso de luz natural al recinto. Los nuevos sistemas que se han desarrollado, a la vez que protegen de la luz directa las zonas cercanas a las ventanas, envían luz difusa o directa al interior de un local.



2.1.2 *Sistemas de iluminación natural sin sombreado*

Están diseñados para redirigir la luz del día a zonas alejadas de las ventanas o claraboyas. Estos sistemas se pueden dividir en cuatro categorías:

- **Sistemas guía de luz difusa:**

En condiciones de cielo nublado, el área alrededor del cenit es más brillante que el área cercana al horizonte. Para las construcciones con altas obstrucciones de luz directa, típico en entornos urbanos, la luz difusa proveniente del cenit puede ser la única fuente de luz día disponible. Estos sistemas pueden mejorar la utilización de la luz día en estas situaciones.

Figura 2. Ejemplos de sistemas guía de luz difusa

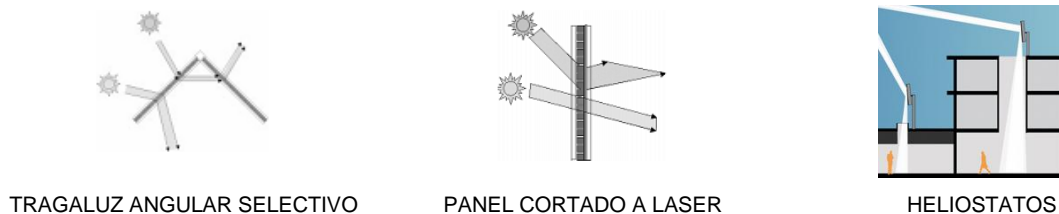


Fuente: [10]

- **Sistemas guía de luz directa:**

Envían la luz directa del Sol al interior del recinto sin efectos secundarios de deslumbramiento o de sobrecalentamiento.

Figura 3. Ejemplos de sistemas guía de luz directa



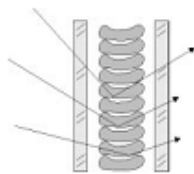
Fuente: [10]



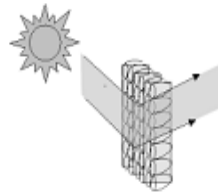
- Sistemas de difusión o dispersión de la luz:

Se utilizan en las claraboyas de luz natural en iluminación cenital, para producir una distribución uniforme de la luz del día. De no utilizar estos sistemas en tomas de luz verticales, se podrían presentar problemas de deslumbramiento.

Figura 4. Ejemplos de sistemas de difusión o dispersión de la luz.



CRISTAL CONDUCTOR SOLAR



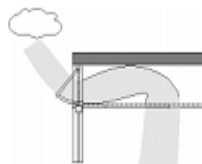
PERSIANAS SOLARES ANIDÓLICAS

Fuente: [10]

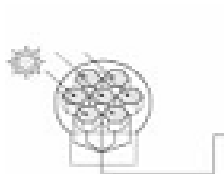
- Sistemas de toma y transporte de la luz día:

Consiste en tomar la luz solar y transportarla una cierta distancia al núcleo de un edificio a través de fibra óptica o ductos solares (tubos solares).

Figura 5. Ejemplos de sistemas de toma y transporte de la luz día.



TECHOS ANIDÓLICOS



DUCTOS DE FIBRA ÓPTICA

Fuente: [10]

Al existir básicamente tres fuentes de luz natural como son: el haz directo procedente del Sol, la luz difusa en la atmosfera y la luz procedente de reflexiones



del suelo o de objetos externos, el diseñador debe tener en cuenta varios aspectos al momento de implementar tecnologías de iluminación natural, tales como:

- Elección del lugar, orientación, forma y dimensiones del edificio.
- Selección de la toma de luz natural, sus dimensiones y su orientación.
- Influencia de las construcciones aledañas en la reflexión u obstrucción de la luz.
- Superficie del suelo que lo rodea, cuya contribución es importante en días de cielo despejado.
- Los colores y texturas de las superficies interiores.

Un elemento típico y de gran importancia en la iluminación natural en un edificio es la ventana. A continuación se presenta una descripción de este elemento.

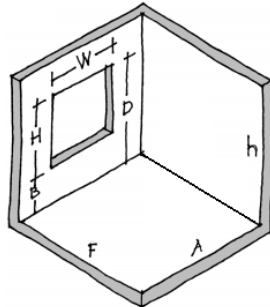
La ventana es una abertura típica en las edificaciones, puede cumplir múltiples funciones, como son: la ventilación, permitir la vista al exterior, el ingreso de luz natural, entre otros. Desde el punto de vista de la iluminación natural es indispensable su ubicación y sus dimensiones, con el fin de no provocar sobrecalentamiento o la penetración incómoda de los rayos solares directos [11].

La cantidad de luz que llega a los diferentes espacios del local depende del diseño espacial del recinto, ya que su geometría determinará la distribución de luz que ingresará por la ventana.

Las variables geométricas que determinan los niveles de iluminación en un recinto son su tamaño y la forma y tamaño de la ventana como se muestra en la Figura 6.



Figura 6. Variables geométricas de un recinto.



- F=Fondo del local.**
- A=Ancho del local.**
- h=Altura del local.**
- W=Ancho de la ventana.**
- H=Alto de la ventana.**
- B=Altura de la ventana hasta la base.**
- D=Altura de la ventana hasta el dintel.**

Fuente: [8].

2.2 TECNOLOGÍAS PARA LA ILUMINACIÓN NATURAL

El nivel de iluminación en una edificación puede ser mejorado a partir de la implementación de diferentes dispositivos o tecnologías que permiten un mejor aprovechamiento de la luz día. La Tabla 2 presenta tecnologías de iluminación natural según sus funciones y características.

Tabla 2. Características generales de las tecnologías de iluminación natural.

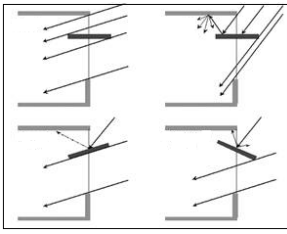
CARACTERÍSTICAS	PROTECCIÓN AL DESLUMBRAMIENTO	PERMITE EL CONTROL DE LA CANTIDAD DE LUZ	PERMITE LA VISTA AL EXTERIOR	APLICABLE EN TECHOS	APLICABLE EN LA FACHADA	REQUIERE MANTENIMIENTO	PERMITE EL AHORRO DE ENERGÍA ELÉCTRICA
TECNOLOGÍAS DE ILUMINACIÓN NATURAL							
ESTANTE DE LUZ 	SI	SI	SI	NO	SI	SI	SI



Tabla 2. (Continuación).

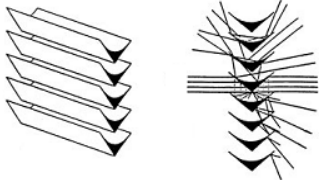
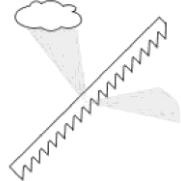
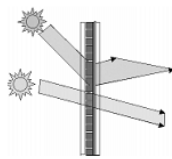

CARACTERÍSTICAS	PROTECCIÓN AL DESLUMBRAMIENTO	PERMITE EL CONTROL DE LA CANTIDAD DE LUZ	PERMITE LA VISTA AL EXTERIOR	APLICABLE EN TECHOS	APLICABLE EN LA FACHADA	REQUIERE MANTENIMIENTO	PERMITE EL AHORRO DE ENERGÍA ELÉCTRICA
TECNOLOGÍAS DE ILUMINACIÓN NATURAL							
<p>CORTINAS Y SISTEMAS DE PERSIANAS</p> 	SI	SI	NO	NO	SI	SI	SI
<p>PANELES PRISMÁTICOS</p> 	SI	SI	NO	NO	SI	NO	SI
<p>PANELES CORTADOS A LASER</p> 	NO	SI	NO	NO	SI	SI	SI
<p>TRAGALUZ ANGULAR SELECTIVO</p> 	SI	NO	N.A	SI	NO	NO	SI



Tabla 2. (Continuación).

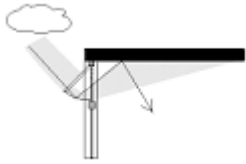
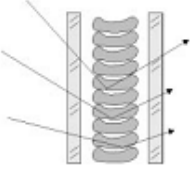
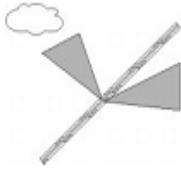
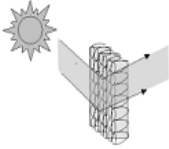
CARACTERÍSTICAS	PROTECCIÓN AL DESLUMBRAMIENTO	PERMITE EL CONTROL DE LA CANTIDAD DE LUZ	PERMITE LA VISTA AL EXTERIOR	APLICABLE EN TECHOS	APLICABLE EN LA FACHADA	REQUIERE MANTENIMIENTO	PERMITE EL AHORRO DE ENERGÍA ELÉCTRICA
TECNOLOGÍAS DE ILUMINACIÓN NATURAL							
<p>GUÍA DE LUZ SOMBREADA</p> 	SI	NO	SI	NO	SI	NO	SI
<p>CRISTAL CONDUCTOR SOLAR</p> 	SI	NO	SI	NO	SI	NO	SI
<p>VIDRIO DE LUZ CENITAL CON HEO</p> 	NO	NO	SI ¹	NO	SI	NO	SI
<p>PERSIANAS SOLARES ANIDÓLICAS</p> 	SI	SI	NO	NO	SI	NO	SI



Tabla 2. (Continuación).

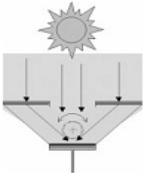
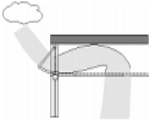

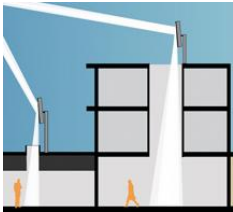
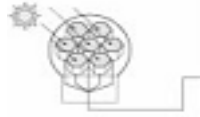
CARACTERÍSTICAS	PROTECCIÓN AL DESLUMBRAMIENTO	PERMITE EL CONTROL DE LA CANTIDAD DE LUZ	PERMITE LA VISTA AL EXTERIOR	APLICABLE EN TECHOS	APLICABLE EN LA FACHADA	REQUIERE MANTENIMIENTO	PERMITE EL AHORRO DE ENERGÍA ELÉCTRICA
TECNOLOGÍAS DE ILUMINACIÓN NATURAL							
<p>SISTEMAS DE SOMBREADO DIRECCIONAL CON HEO</p> 	SI	SI	SI	SI	SI	SI	SI
<p>TECHOS ANIDÓLICOS</p> 	NO	SI	SI	NO	SI	NO	SI
<p>ABERTURAS ANIDÓLICAS CENTALES</p> 	NO	NO	N.A	SI	NO	NO	SI
<p>HELIOSTATOS</p> 	NO	SI	SI	SI	NO	SI	SI



Tabla 2. (Continuación).

CARACTERÍSTICAS	PROTECCIÓN AL DESLUMBRAMIENTO	PERMITE EL CONTROL DE LA CANTIDAD DE LUZ	PERMITE LA VISTA AL EXTERIOR	APLICABLE EN TECHOS	APLICABLE EN LA FACHADA	REQUIERE MANTENIMIENTO	PERMITE EL AHORRO DE ENERGÍA ELÉCTRICA
TECNOLOGÍAS DE ILUMINACIÓN NATURAL							
DUCTOS DE FIBRA ÓPTICA 	NO	SI	N.A	SI	SI	NO	SI

N.A: No aplica.

Fuente: [10], [13].

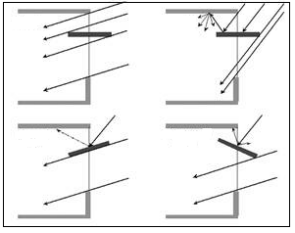
A continuación se describe cada tecnología presentada en la Tabla 2, resaltando sus características más fundamentales, principios físicos y características, adaptación a sistemas de control, mantenimiento, aplicación en el edificio y parámetros de diseño.

2.2.1 Estante de luz

La distribución interior de la luz que ingresa lateralmente a un recinto puede ser mejorada con la utilización de un estante de luz, el cual incrementa la componente de luz reflejada y la re direcciona al techo, que se convierte en una fuente de luz. La Tabla 3 muestra las características fundamentales de esta tecnología.



Tabla 3. Descripción de estante de luz.

<p>Descripción técnica</p>	<p>Un estante de luz es un reflector horizontal o casi horizontal situado en la fachada de la ventana, deben ser adaptados según la arquitectura de la edificación, en especial, del tamaño y ubicación de la ventana. Se coloca generalmente sobre el nivel de visión horizontal. Este dispositivo reducirá la luz recibida en la cercanía de la abertura en relación con una ventana convencional, proyectando la luz al cielorraso del recinto mejorando la iluminación al fondo del local y disminuyendo así el contraste de luz dentro del recinto.</p>	
<p>Aplicación</p>	<p>Son recomendados para espacios con luz solar directa significativa, para edificaciones en el hemisferio norte se recomienda su instalación en las ventanas ubicadas en la fachada sur</p>	
<p>Principios físicos y características</p>	<p>Para las habitaciones que dan al sur, en el hemisferio norte, es recomendable que la profundidad del estante interno sea aproximadamente igual a la altura del triforio⁴ de la ventana por encima del estante. La altura del ventanal acristalado y la longitud del estante dependen de las características de latitud y del clima, alguna inclinación en el sistema de estantes cambiará profundidad de luz reflejada por área sombreada en la ventana.</p>	
<p>Control</p>	<p>Para manejar su inclinación se puede manejar un sistema motorizado que controle el nivel de sombreado sobre la superficie de la ventana.</p>	
<p>Mantenimiento</p>	<p>Requieren de una limpieza regular, aunque algunos de los estantes están ópticamente tratados para mejorar sus propiedades reflectantes y son completamente aislados del ambiente interior y exterior para ser protegido de la suciedad</p>	
<p>Ahorro de energía</p>	<p>El aumento de la uniformidad en la distribución de la luz puede hacer que la sala pueda ser percibida como relativamente bien iluminada, lo que reduce la probabilidad de que los ocupantes enciendan las luces artificiales.</p>	
<p>Parámetros de diseño</p>	<p>Su desempeño depende de las siguientes características: Estante fijo o móvil, dimensiones del estante (menor en latitudes bajas), material (media o alta reflectividad), posición (interno, externo o combinado).</p>	

Fuente: [10]

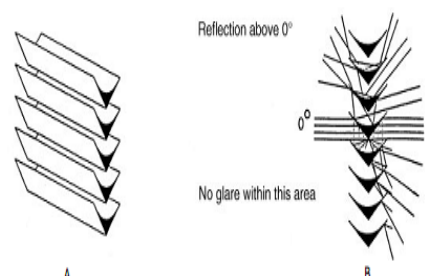
2.2.2 Cortina y sistema de persianas

Son elementos mecánicos ubicados al interior o exterior de una ventana, algunos están ubicados dentro de un sistema de doble acristalamiento. Su función principal es la protección del exceso de luz y protección al calentamiento producto de la radiación solar. La Tabla 4 muestra sus principales características.

⁴ Término de la arquitectura gótica para referirse al espacio situado sobre la ventana, común en las catedrales situadas en las naves centrales sobre los arcos.



Tabla 4. Descripción de la cortina y sistema de persianas.

Descripción técnica	<p>Son sistemas clásicos de iluminación natural que se pueden aplicar para protección contra el deslumbramiento y para redirigir la luz del día. Están compuestas por múltiples listones horizontales, verticales o inclinados.</p> <p>Algunas hacen uso de altas y sofisticadas formas y acabados superficiales para mejorar sus propiedades reflectantes, son generalmente de acero galvanizado, de aluminio anodizado o pintado y plástico (PVC) de alta durabilidad. Los listones están por lo general uniformemente espaciados a una distancia que es menor que el ancho de los listones.</p>	 <p style="text-align: center;">A <i>persiana reflectora cóncava</i></p>
	<p>El tamaño del listón varía con la localización de la persiana: exteriores, interiores, o entre los cristales de una ventana de doble cristal. En condiciones de sol, las persianas pueden producir líneas extremadamente brillantes a lo largo de los listones, causando problemas de deslumbramiento.</p>	
Aplicación	Las persianas y cortinas son utilizables en todas las orientaciones y en todas las latitudes y se pueden añadir a un sistema de ventanas siempre que sea necesario.	
Principios físicos y características	Las persianas y cortinas logran obstruir, absorber, reflejar y/o transmitir la radiación solar (difusa y directa) al interior de un edificio. Su efecto depende de la posición del sol y su ubicación (interior o exterior), el ángulo del listón y de las características de reflectancia de la superficie del listón (lamas), entre algunos tipos de persianas están las fijas u operables, translúcidas y cóncavas reflectoras.	
Control	Las persianas pueden ser controladas manual o automáticamente mediante sistemas motorizados. Las persianas controladas automáticamente logran aumentar la eficiencia energética considerablemente.	
Mantenimiento	El mantenimiento de las persianas consiste especialmente en retirar acumulaciones de polvo o residuos en las láminas, haciendo que estas conserven sus propiedades reflectantes.	
Ahorro de energía	Un sistema de persianas hace que se disminuya la transferencia de calor al interior del local reduciendo gastos energéticos en refrigeración, a su vez mejoran la uniformidad de la luz al interior permitiendo el no uso, en algunas condiciones, de iluminación artificial.	
Parámetros de diseño	Material de los listones, forma del listón (cóncavo o plano).	

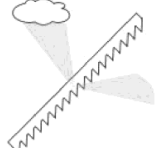
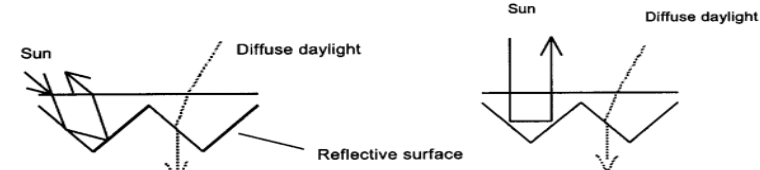
Fuente: [10].

2.2.3 Panel prismático

Son paneles de plástico con uno de sus lados grabados con elementos prismáticos encargados de redirigir los rayos de luz. La Tabla 5 presenta una descripción detallada de sus propiedades y características.



Tabla 5. Características del panel prismático.

<p>Descripción técnica</p>	<p>Los paneles prismáticos son delgadas placas planas de material acrílico transparente, donde una de sus caras tiene una textura de pequeños dientes de sierra encargados de redirigir o reflejar la luz del día.</p> <p>Cuenta con dos ángulos de refracción, este sistema generalmente se instala en medio de un doble acristalamiento con el fin de evitar el mantenimiento.</p> <p>Existen dos procesos diferentes de fabricación.</p> <p>Moldeo por inyección: los paneles prismáticos son producidos a partir de un polímero acrílico en cuatro configuraciones diferentes, con cuatro ángulos de refracción diferentes, algunos están cubiertos con una película de aluminio de reflexión sobre la superficie de cada prisma.</p> <p>Grabado especializado: este proceso de grabado produce paneles con prismas que se espacian menos de un milímetro de distancia. El resultado es un acrílico ligero pero que conserva sus propiedades ópticas.</p> <p>Pueden ser utilizados en configuraciones fijas o móviles, como acristalamiento de la ventana (configuración fija) o en paredes interiores. Son necesarios componentes adicionales para evitar la dispersión del color, como por ejemplo una delgada capa de vidrio.</p>	
<p>Aplicación</p>	<p><i>Luz del día difusa:</i> Se utilizan normalmente en el plano vertical de la fachada para dirigir la luz día a la parte superior del recinto, generalmente al techo.</p> <p><i>Luz solar directa:</i> Se pueden utilizar para evitar la luz solar directa en un local, evitando el deslumbramiento, ubicando los paneles con su debida inclinación.</p> <p>Para fachadas soleadas es recomendable utilizar protección solar adicional.</p>	
<p>Principios físicos y características</p>	<p>Los paneles prismáticos deben adaptarse a una amplia gama de radiación solar en diferentes altitudes.</p> <p>El ángulo de la luz refractada no debe ser superior a 15° grados aproximadamente para obtener una penetración aceptable al interior del recinto, sin permitir que rayos de la luz solar directa puedan generar deslumbramiento.</p> <p>El desempeño del sistema está determinado por una configuración adecuada de los ángulos de refracción.</p> <p>Un perfil prismático diferente es necesario según la ubicación geográfica del edificio.</p> <div style="text-align: center;">  </div>	
<p>Control</p>	<p>Cuando se utilizan como un sistema móvil de protección de luz solar, es necesario un eje automático que permita el movimiento de los paneles de acuerdo al movimiento del sol.</p>	
<p>Mantenimiento</p>	<p>Ya que los paneles prismático están ubicados en sistemas de doble acristalamiento, es necesario solamente una limpieza rutinaria y cuidadosa de las superficies de los vidrios.</p>	
<p>Parámetros de diseño</p>	<p>Según los requerimientos de luz al interior, el diseñador puede utilizar varios grados de inclinación en el sistema dentado de los paneles o variar la inclinación del panel con respecto a la horizontal.</p>	
<p>Ahorro de energía</p>	<p>Información no disponible actualmente.</p>	

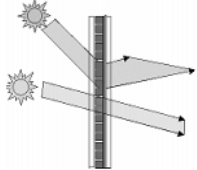
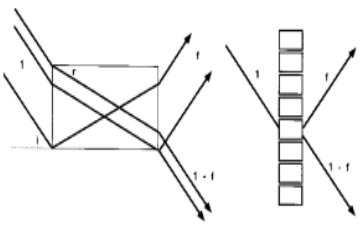
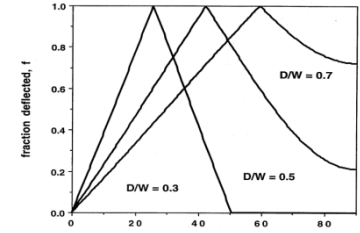
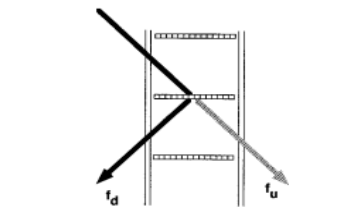
Fuente: [10].

2.2.4 Panel cortado a laser

Es un delgado panel que está dividido por cortes de forma rectangular. La superficie de cada rectángulo se convierte en un pequeño espejo que desvía la luz a través del panel. La Tabla 6 presenta la descripción de sus características.



Tabla 6. Características del panel cortado a laser.

<p>Descripción técnica</p>	<p>Están contruidos por una hoja de acrílico transparente de Polimetilmetacrilato (PMMA). Contienen una periferia sólida sin cortes a laser que permite darle rigidez al panel. Pueden ser utilizados como sistemas fijos o móviles en el sistema de ventanas. Es recomendable la instalación de estos paneles sobre el nivel de visión horizontal para evitar el deslumbramiento.</p>	
<p>Aplicación</p>	<p>Los paneles cortados a laser pueden ser utilizados como: un sistema fijo de sombreado, un sistema para redirigir la luz (fijo o móvil), un sistema de sombreado y a su vez como director de luz en forma de persiana veneciana.</p>	
<p>Principios físicos y características</p>	<p>Un panel cortado a laser con una relación entre la distancia de sus cortes sobre la profundidad del corte igual a 0,7 fijado en una ventana vertical, desvía casi todos los rayos incidentes sobre él, dirigiéndolos en un ángulo superior a 45° sobre la horizontal y en un ángulo por debajo de los 20°.</p>	
	<p>La figura de la derecha muestra la relación de la fracción de luz refractada en función del ángulo de incidencia para diferentes relaciones de distancia y profundidad del corte hecho a laser.</p>	
	<p>Una serie de paneles pequeños se montan horizontalmente en una ventana vertical de tal forma que la luz incidente del sol desde ángulos elevados es desviada nuevamente al exterior. De esta forma se logra un sistema que brinda protección solar y a su vez permite la visión al exterior.</p>	
<p>Control</p>	<p>Permite controlar la inclinación del panel con el objetivo de variar el ángulo de incidencia de la luz solar y por tanto varia las componentes refractadas al interior.</p>	
<p>Mantenimiento</p>	<p>Los paneles cortados a laser solo requieren del mantenimiento propio de un sistema de ventanas con vidrios convencionales.</p>	
<p>Ahorro de energía</p>	<p>El ahorro de energía depende de la aplicación, por ejemplo los paneles utilizados en la parte superior de la ventana incrementa desde un 10% a un 30% la luz en el interior, dependiendo de las condiciones de luminosidad exterior.</p>	
<p>Parámetros de diseño</p>	<p>Se puede variar la relación de la profundidad y espaciamento de los cortes rectangulares del panel, la inclinación del panel o cuando es utilizado como tipo persiana se puede variar la inclinación de los paneles horizontales.</p>	


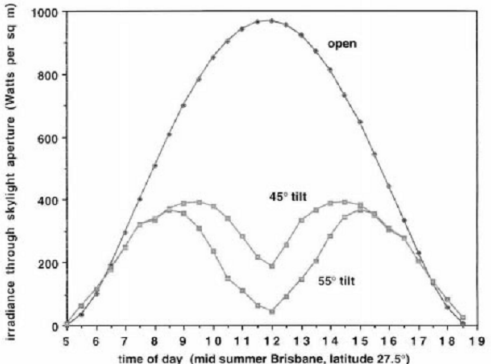
Fuente: [10], [12].



2.2.5 Tragaluz angular selectivo

Es una claraboya convencional tipo piramidal o triangular formada por paneles cortados a laser y ubicada en la parte superior de un recinto. En la Tabla 7 se describen sus características.

Tabla 7. Características del Tragaluz angular selectivo.

<p>Descripción técnica</p>	<p>Este sistema permite el ingreso de las componentes de luz difusa de ángulo bajo y rechaza al exterior las componentes de luz provenientes de ángulos elevados. Para los trópicos es recomendable un ángulo de inclinación entre 45° y 55° donde se presentan rayos de luz con ángulos de penetración elevados. Para latitudes altas se utilizan ángulos de inclinación entre 25° y 35°. Los tragaluzes están instalados en el techo de un edificio. La función principal de un tragaluz angular selectivo es proporcionar irradiación relativamente constante en el interior durante el día y reducir la tendencia a recalentarse el edificio en los días soleados. Este sistema no es recomendado en climas donde predomine el cielo nublado, fueron diseñados para latitudes bajas con cielos despejados.</p>	
<p>Aplicación</p>	<p>Son adecuadas para la iluminación natural en edificaciones con zonas amplias y de techos con una muy baja inclinación. En las latitudes bajas el ángulo de inclinación de los paneles del tragaluz debe ser mayor a 45° para garantizar un mejor desempeño; Para las latitudes altas, el ángulo de inclinación de los paneles debe ser menor a 35°.</p>	
<p>Principios físicos y características</p>	<p>El funcionamiento detallado de un tragaluz angular selectivo depende de las características físicas de los paneles cortados a laser, como es la separación de los cortes, el ángulo de inclinación de los paneles que forman la pirámide, la profundidad del pozo de la claraboya, la hora del día, las condiciones del cielo y la latitud.</p> <p>La figura de la derecha muestra la comparación de una claraboya con profundidad del pozo aproximadamente cero y un sistema angular selectivo para dos ángulos de inclinación en función de la hora del día.</p>	
<p>Control</p>	<p>Este sistema de claraboyas selectivas triangulares siempre se utiliza como sistema fijo.</p>	
<p>Mantenimiento</p>	<p>No requiere de mantenimiento distinto al mantenimiento rutinario de una claraboya.</p>	
<p>Ahorro de energía</p>	<p>El ahorro de energía puede ser significativo, ya que reduce el calentamiento provocado por una claraboya convencional y permite la reducción del uso de iluminación artificial</p>	
<p>parámetros de diseño</p>	<p>Teniendo en cuenta las propiedades de los paneles cortados a laser, se añade un factor muy importante que es la inclinación de los paneles que forman la claraboya, dependiendo de la latitud de lugar.</p>	

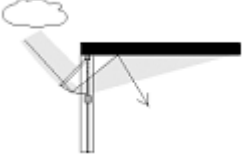

Fuente: [10].



2.2.6 Guía de luz sombreada

Contiene una lámina de vidrio difusor y un reflector diseñado para dirigir la luz difusa que ingresa por la abertura acristalada y dirigirla al techo del recinto, como se muestra en la Tabla 8.

Tabla 8. Características de la Guía de luz sombreada.

<p>Descripción técnica</p>	<p>El tono y propiedades reflectantes del material con el que está construido el sistema son de especial cuidado. El aluminio de acabado brillante es utilizado para la superficie interior de los reflectores, son instalados sobre la mitad de la ventana, con soportes laterales que proporcionan sombra adicional. El principal inconveniente está en el costo de la lámina de metal reflectante, de la cual se debe la luz reflejada al interior. Otro obstáculo es la posible filtración de agua dentro del sistema, pero esta se puede corregir fácilmente con orificios de desagüe.</p>	
<p>Aplicación</p>	<p>Se pueden utilizar en cualquier edificio que utilice el sombreado exterior en las ventanas. La luz del día que entra a través del sistema se dirige sobre el techo; por lo que la sombra sobre la ventana se convierte en una fuente de luz difusa, que no es luminosa cuando se ve desde el interior del recinto y por lo tanto totalmente libre de deslumbramiento.</p>	
<p>Principios físicos y características</p>	<p>Están diseñados para mejorar la iluminación natural en edificios de zonas subtropicales que utilizan sistemas de sombreado convencionales para reducir el incremento de la temperatura debida a la radiación sobre la ventana.</p>	
<p>Control</p>	<p>Este sistema es fijo. El control de la cantidad de luz que ingrese al recinto dependerá del diseño de los reflectores.</p>	
<p>Mantenimiento</p>	<p>No requiere de mantenimiento en particular diferente a la limpieza ocasional del vidrio de la apertura de toma de Luz.</p>	
<p>Ahorro de energía</p>	<p>En condiciones de cielo soleado, en comparación con un sistema de sombreado convencional, se puede obtener incrementos de iluminancia con una relación hasta de 1:20 en el área próxima a la ventana. Proporciona sombreado sobre la ventana evitando el incremento de la temperatura producto de la radiación solar.</p>	
<p>Parámetros de diseño</p>	<p>Las propiedades ópticas del material reflectante y el color y textura del cielorraso son los parámetros a tener en cuenta en la utilización de este sistema.</p>	

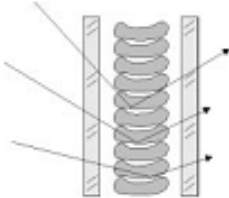
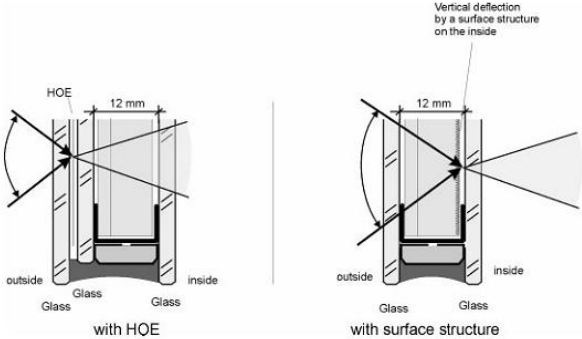
Fuente: [10].



2.2.7 Cristal conductor solar

Este dispositivo está formado por elementos cóncavos acrílicos apilados verticalmente dentro de un doble acristalamiento con el fin de dirigir la luz solar desde todos los ángulos de incidencia hacia el techo sus características se muestran en la Tabla 9.

Tabla 9. Características del Cristal conductor solar.

<p>Descripción técnica</p>	<p>Esta es una unidad sellada, normalmente se coloca en la ventana por encima de la vista. Los elementos de acrílico que la conforman se producen por extrusión. Debido a su configuración física, se nota un cambio en su apariencia al compararlo con una ventana convencional, este sistema presenta un color blanco que se diferencia de un vidrio transparente convencional.</p>	
<p>Aplicación</p>	<p>Está diseñado para ser usado donde se cuente con radiación solar directa, la mejor orientación para su aplicación es la fachada sur (en el hemisferio norte). El ángulo óptimo de elevación del sol para lograr un buen desempeño se encuentre entre los 10° y los 65°.</p> <p>Para latitudes en las zonas tropicales, el ángulo de incidencia puede ser superior, para lo cual es necesario instalar el sistema con un ángulo de inclinación con respecto a la vertical para lograr capturar una considerable cantidad de radiación directa.</p> <p>Para contrarrestar una posible reflexión en ángulos bajos dentro del recinto, son necesarias algunas modificaciones en su proceso de fabricación, con cierto ángulo de inclinación de los elementos apilados dentro del acristalamiento.</p>	
<p>Principios físicos y características</p>	<p>Este sistema permite el direccionamiento de la luz en el plano horizontal y vertical. Así se puede re direccionar la luz al interior del local sin ser necesario un sistema móvil. Pueden contar con elementos ópticos holográficos que mejoran sus propiedades.</p>	
<p>Control</p>	<p>Al ser un sistema fijo, no incluye partes móviles o ajustables, no es necesario controlarlo.</p>	
<p>Mantenimiento</p>	<p>Como los elementos que redirigen la luz solar se instalan dentro de un doble acristalamiento, no es necesario un mantenimiento extra distinto a la limpieza de los cristales que los contienen.</p>	
<p>Parámetros de diseño</p>	<p>Al ser un sistema básicamente de acristalamiento, los parámetros están definidos en su construcción como es la posibilidad de incluir o no una lámina de un elemento óptico Holográfico para modificar las características de dispersión o refracción de la luz solar directa.</p>	
<p>Ahorro de energía</p>	<p>Información no disponible actualmente.</p>	

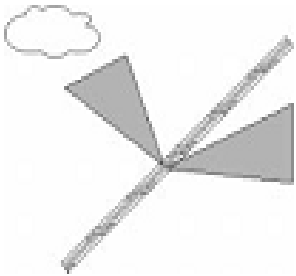
Fuente: [10].



2.2.8 Vidrio de luz cenital con elementos ópticos holográficos

El principal componente de este sistema es una capa polimérica de difracción holográfica que está en medio de dos cristales. Su descripción se muestra en la Tabla 10.

Tabla 10. Descripción del vidrio de luz cenital con elementos ópticos holográficos.

<p>Descripción técnica</p>	<p>Este sistema redirige la luz difusa que proviene de la región cenital del cielo para transmitirla al interior de la edificación. Debido a que el sistema puede provocar la dispersión de los colores cuando es expuesto a la luz solar directa, solo se utiliza en las fachadas que no cuentan con radiación solar directa. El vidrio de luz cenital se produce al someter una película de un elemento holográfico a un tratamiento con rayos laser para variar el índice de refracción. Se puede integrar en la parte superior del sistema de ventanas que no reciben radiación solar directa. Ha sido diseñado específicamente para su uso con luz difusa. Si la luz solar directa incide sobre el sistema holográfico se puede presentar deslumbramiento y la dispersión de los colores.</p>	
<p>Aplicación</p>	<p>El sistema es muy útil en edificaciones que tienen obstruida la vista al cielo, típico en entornos urbanos o en climas donde predomine el cielo nublado.</p>	
<p>Principios físicos y características</p>	<p>Las funciones ópticas, reflexión, difracción, refracción o transmisión selectiva de la luz, entre otras; los capacitan para difractar o desviar la luz, hacerla converger, reflejarla, comportarse como prismas, diferentes lentes, espejos y otros elementos ópticos. Los Elementos Ópticos Holográficos iluminados con fuentes de luz puntual, difusa o luz láser, la reconstrucción que se obtiene no es una imagen, sino que es el efecto de diferentes funciones ópticas, almacenadas holográficamente, según los diferentes tipos de elementos ópticos holográficos registrados.</p>	
<p>Control</p>	<p>Al ser un elemento fijo en el sistema de ventanas no requiere de ningún tipo de control.</p>	
<p>Mantenimiento</p>	<p>Solo requiere de una limpieza propia de un acristalamiento convencional.</p>	
<p>Parámetros de diseño</p>	<p>Los parámetros que influyen en el comportamiento de este sistema ante la luz están definidos en la fabricación, más exactamente en el tratamiento dado a la capa de polímero que hace las veces de elemento de difracción.</p>	
<p>Ahorro de energía</p>	<p>Información no disponible actualmente.</p>	

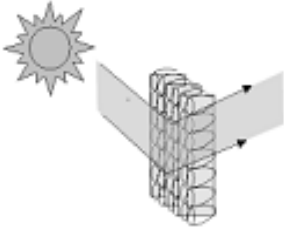
Fuente: [10].



2.2.9 *Persiana solar anidólica*

Consisten en una red de huecos de reflexión, cada uno de los cuales se compone de concentradores parabólicos. Su descripción se encuentra en la Tabla 11.

Tabla 11. Características de las persianas solares anidólicas.

<p>Descripción técnica</p>	<p>La característica innovadora de las persianas anidólicas solares en comparación con otros sistemas anidólicos (techos anidólicos, aberturas cenitales anidólicas) es el uso de elementos reflectantes en tres dimensiones. Este sistema está en fase de estudio, se han desarrollado pruebas utilizando algunos prototipos pero no se ha llegado a la producción comercial. Se usa para controlar la luz del día y las ganancias térmicas en orientaciones donde la fachada recibe radiación solar directa.</p>	
<p>Aplicación</p>	<p>Puede aplicarse ya sea como una persiana fija o se puede colocar en la parte superior de una ventana convencional. La vista a través de ellos es borrosa.</p>	
<p>Principios físicos y características</p>	<p>El diseño del sistema se basa en la óptica sin imágenes, y es similar a otros sistemas anidólicos excepto que está hecha de elementos tridimensionales.</p>	
<p>Control</p>	<p>Puede permanecer en una posición fija y no tiene que ser movido. Los niveles de iluminación solar se pueden aumentar por la inclinación del dispositivo.</p>	
<p>Mantenimiento</p>	<p>Debido a que es un sistema fijo que está protegido contra el polvo y la suciedad por medio de cristales en ambos lados, no se requiere mantenimiento especial.</p>	
<p>Parámetros de diseño</p>	<p>Además de los parámetros comunes de la óptica anidólica, el diseñador puede aplicarle un grado de inclinación al sistema dependiendo de la latitud donde se va a instalar.</p>	

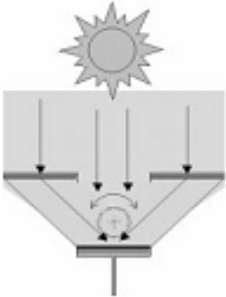
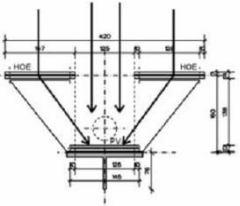
Fuente: [10].

2.2.10 *Sistema de sombreado direccional con elemento óptico holográfico*

Es un sistema móvil provisto de paneles con elementos ópticos anidólicos encargados de redirigir los rayos de la luz solar a un solo punto. La Tabla 12 muestra una descripción detallada de esta tecnología.



Tabla 12. Descripción del sistema de sombreado direccional con elemento óptico holográfico.

<p>Descripción técnica</p>	<p>Está formado por una rejilla de difracción holográfica dentro de un acristalamiento, diseñada para reflejar los rayos solares directos que inciden con un ángulo normal a la superficie, mientras que los rayos de luz difusa provenientes de otros ángulos pasan a través del sistema. Este sistema está acondicionado para reorientarse y seguir la trayectoria del sol.</p> <p>La luz solar directa es reflejada y dirigida a celdas solares fotovoltaicas para ser convertidas en electricidad o es aprovechada para convertirla energía térmica.</p> <p>Está formado por una película holográfica que se expone a un tratamiento con rayos laser para variar el índice de refracción. Se pueden ubicar de forma vertical en la fachada del edificio o en una abertura en el techo como un sistema de sombreado.</p> <p>Es recomendable considerar la instalación de este sistema en la fase de diseño del edificio, teniendo en cuenta aspectos técnicos y arquitectónicos.</p>	
<p>Aplicación</p>	<p>Este sistema es deseable en fachadas con una gran superficie acristalada donde se presentan problemas de sobrecalentamiento y deslumbramiento. Puede ser instalado para rotar sobre el eje horizontal o vertical en techos o ventanas verticales respectivamente.</p>	
<p>Principios físicos y características</p>	<p>Permite una reflexión total de la luz solar directa.</p> <p>El sistema está inactivo para todos los otros ángulos de incidencia diferentes a los cercanos a 90°, por lo que la luz difusa puede penetrar el sistema para proporcionar luz natural al espacio situado detrás de los cristales.</p>	
<p>Control</p>	<p>El seguimiento solar se realiza utilizando un sistema de control que permite el accionamiento de un motor para reorientar el sistema. La posición del Sol puede ser calculada con anterioridad y ser tabulada en una base de datos o ser calculada mediante la utilización de sensores para tomar las acciones de control correspondientes.</p>	
<p>Mantenimiento</p>	<p>El mantenimiento de la parte acristalada requiere de la limpieza propia de un cristal. La parte mecánica requiere de un mantenimiento más frecuente ya que se encuentra expuesto al aire libre.</p>	
<p>Parámetros de diseño</p>	<p>Como sistema de sombreado, permite la utilización de la energía incidente sobre este; según el tipo de edificación el diseñador puede decidir si se adapta un sistema de generación de energía eléctrica o se aprovechan sus propiedades térmicas para diferentes aplicaciones.</p>	
<p>Ahorro de energía</p>	<p>Información no disponible actualmente.</p>	

Fuente: [10].

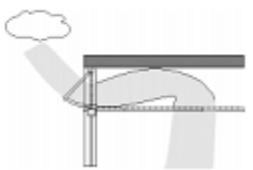
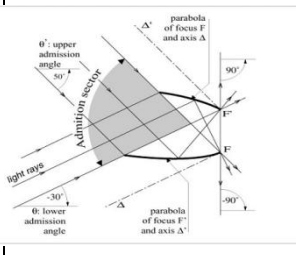
2.2.11 Techo anidólico

Esta tecnología optimiza el nivel de iluminación interior mediante el aprovechamiento de la luz disponible en la fachada. Toma la luz y la transporta al



fondo del local, mejorando la uniformidad de la luz. La Tabla 13 describe sus características.

Tabla 13. Descripción del techo anidólico.

<p>Descripción técnica</p>	<p>Está compuesto por un elemento anidólico de captación de luz, un ducto de luz ubicado a través de un falso techo y finalmente cuenta con un segundo elemento óptico anidólico.</p> <p>Estos elementos ópticos están contruidos de aluminio anodizado que garantiza un alto grado de reflectancia. Para evitar la penetración de luz solar directa se puede utilizar un toldo o un sistema de sombreado convencional. Un sistema de techo anidólico está diseñado para ser ubicado en una fachada vertical por encima del nivel de visión de la ventana.</p> <p>El principal inconveniente se presenta en el espacio requerido para su instalación, es necesario contar con gran parte del falso techo para la instalación del ducto solar.</p>	
<p>Aplicación</p>	<p>Este sistema está diseñado para recoger la luz difusa, por tal motivo puede ser utilizado en cualquier latitud.</p> <p>El sistema se utiliza mejor en las fachadas verticales en edificios que se encuentran en su mayor parte nublado y que tienen un acceso limitado a la luz solar directa.</p>	
<p>Principios físicos y características</p>	<p>El sistema se basa en la reflexión por medio de una superficie altamente reflectante.</p> <hr/> <p>Un colector de luz anidólico es instalado en la toma de luz en la entrada del conducto y otro similar es colocado en el otro extremo del conducto para distribuir la luz en el interior.</p>	
<p>Control</p>	<p>Si se utiliza un sistema de sombreado para controlar el nivel de luz incidente en el concentrador de luz exterior, este puede ser manual o automático.</p> <p>El techo anidólico en específico no requiere de algún tipo de control.</p>	
<p>Mantenimiento</p>	<p>No necesita de mantenimiento, generalmente la lluvia retira los residuos que se pueden acumular en el panel de entrada de luz.</p>	
<p>Parámetros de diseño</p>	<p>Los parámetros de diseño dependen esencialmente de las propiedades reflectantes de los materiales de los cuales están contruidos los elementos anidólicos y el ducto que transporta la luz. La luz transmitida depende directamente de la anchura y longitud del sistema de captación y de transporte de luz respectivamente.</p>	
<p>Ahorro de energía</p>	<p>Información no disponible actualmente.</p>	

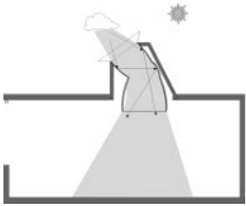
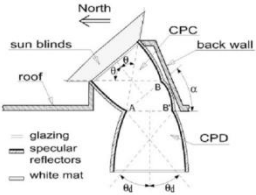
Fuente: [10].



2.2.12 Abertura anidólica cenital

Este dispositivo aprovecha la luz difusa y la proyecta cenitalmente al interior del local, su posición debe garantizar la obstrucción de los rayos de luz solar directa. La Tabla 14 describe sus principales características.

Tabla 14. Descripción de la abertura anidólica cenital.

<p>Descripción técnica</p>	<p>Se compone de un elemento óptico de concentración de luz y uno de “desconcentración” o elemento emisor. Los reflectores de los elementos anidólicos consisten en superficies de aluminio anodizado (reflectancia $\rho = 0.9$). Los conductos están rodeados por cristales para mantener limpia las superficies reflectantes. Está diseñado para ser ubicado en techos con una dirección oriente-occidente en el eje horizontal. Su apertura de entrada se inclina hacia el norte en el hemisferio norte y al sur en el hemisferio sur con el fin de impedir el ingreso de los rayos solares directos. El sistema debe ser integrado en el proceso de diseño del edificio en las primeras etapas.</p>	
<p>Aplicación</p>	<p>Pueden ser aplicados en espacios amplios como coliseos deportivos, museos, pasillos. Ya que la abertura requiere espacio suficiente para garantizar una entrada de luz considerable.</p>	
<p>Principios físicos y características</p>	<p>El diseño del sistema se basa en la óptica sin imágenes, y es similar al diseño de cualquier sistema de iluminación natural anidólico.</p>	
<p>Control</p>	<p>Por su ubicación u orientación garantiza la no penetración de la luz solar directa y al ser un sistema fijo no requiere de un sistema de control.</p>	
<p>Mantenimiento</p>	<p>En zonas con condiciones normales de precipitaciones, estas son suficientes para retirar residuos que se puedan acumular.</p>	
<p>Parámetros de diseño</p>	<p>Como en cualquier sistema de captación de luz natural, la luz capturada es proporcional a las dimensiones de la abertura. La inclinación adecuada del dispositivo para que no permita el ingreso de luz solar directa influye notablemente en el desempeño del sistema.</p>	
<p>Ahorro de energía</p>	<p>Información no disponible actualmente.</p>	

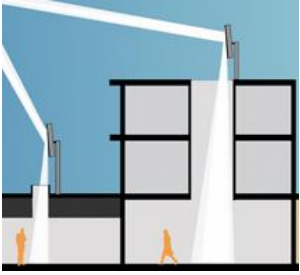
Fuente: [10].



2.2.13 Heliostato

Este sistema es muy utilizado en varias aplicaciones que tienen como fin el aprovechamiento de la energía solar. En iluminación son utilizados principalmente para iluminar espacios como patios internos o lugares donde haya presencia continua de ocupantes. La Tabla 15 describe sus principales características.

Tabla 15. Características del sistema de heliostatos.

<p>Descripción técnica</p>	<p>Es un sistema de reflexión especular, toma la luz solar y la redirige al sitio deseado. Puede contar con reflectores secundarios que reciben los rayos del Sol desde el primer heliostato y los redirige al lugar deseado. Gracias a su capacidad de re-direccionamiento y su potencia lumínica puede generar incomodidades de no ser instalado de forma correcta.</p>	
<p>Aplicación</p>	<p>Es utilizado para iluminar grandes espacios como patios internos o plantas subterráneas o para enfocar los rayos a tomas de luz como ductos solares, entre otros.</p>	
<p>Principios físicos y características</p>	<p>Los rayos solares inciden directamente sobre una superficie especular plana, estos son reflejados y utilizados en diferentes aplicaciones aprovechando sus propiedades térmicas y lumínicas.</p>	
<p>Control</p>	<p>Un sistema de control motorizado se encarga de re direccionar el espejo plano que sigue la trayectoria solar y redirige los rayos a un punto fijo, ya sea al espacio directamente a iluminar o un segundo reflector.</p>	
<p>Ahorro de energía</p>	<p>En condiciones de cielo soleado aporta gran cantidad de luz a los locales contiguos o los patios o sitios donde este implementado</p>	
<p>Mantenimiento</p>	<p>Su mantenimiento se enfoca principalmente en la parte mecánica debido a que se encuentran a la intemperie y las inclemencias del clima pueden producir desgastes. Este mantenimiento es esporádico y no requiere de costos elevados.</p>	
<p>Parámetros de diseño</p>	<p>El diseñador puede optar por la utilización de un solo panel reflector móvil o un sistema de varios reflectores que conduzcan la luz a lugares más alejados.</p>	

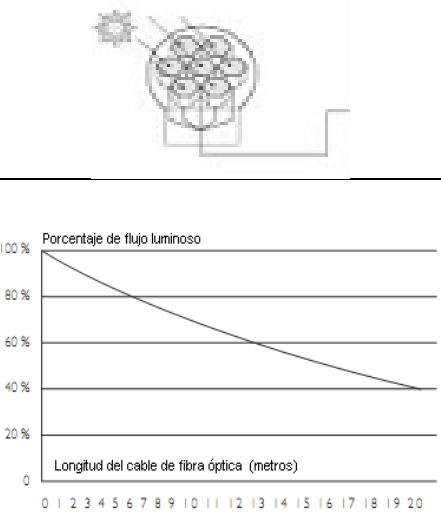
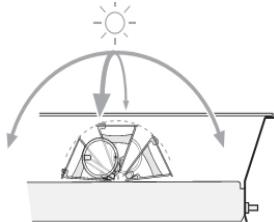
Fuente: [14]



2.2.14 Ducto de fibra óptica

Esta tecnología se encarga de captar la luz solar y transportarla a través de fibra óptica al interior de un local. La Tabla 16 describe sus características principales.

Tabla 16. Características del sistema de iluminación por fibra óptica.

<p>Descripción técnica</p>	<p>El sistema consiste de: Módulos concentradores de luz instalados en el exterior de la edificación, este módulo está formado con una gran cantidad de lentes concentradores que siguen automáticamente la trayectoria solar.</p> <p>Seguido a los módulos concentradores, la luz es transportada por medio de un conjunto de cables de fibra óptica al interior del recinto aprovechando su flexibilidad y alta eficiencia a largas distancias.</p> <p>Finalmente la luz transportada es dispersada en el interior del recinto por medio de una serie de luminarias dispersoras ubicadas estratégicamente a lo largo del recinto, la luz puede ser reflejada cenitalmente o proyectada sobre alguna superficie de la sala. La figura de la derecha muestra la relación del flujo de luz en función de la longitud de la fibra óptica.</p>	 <p>The diagram shows a solar concentrator with a sun icon, a lens array, and fiber optic cables leading to a light fixture. The graph plots 'Porcentaje de flujo luminoso' (0-100%) against 'Longitud del cable de fibra óptica (metros)' (0-20). The curve shows a steady decline from 100% at 0m to approximately 40% at 20m.</p>
<p>Aplicación</p>	<p>Puede ser aplicado en cualquier edificación, sus características de flexibilidad y maniobrabilidad permiten conducir la luz hasta los lugares más alejados de las tomas de luz natural.</p>	
<p>Principios físicos y características</p>	<p>Los paneles receptores contienen una cantidad de lentes concentradores de luz que siguen automáticamente la trayectoria solar. Un arreglo de cables de fibra óptica se agrupa en cada concentrador de luz. Para reducir la exposición de la capa exterior de la fibra al calor producido por la concentración, se utilizan diferentes diámetros de los hilos de fibra óptica, siendo los hilos internos de menor diámetro que los externos.</p>	
<p>Control</p>	<p>El seguimiento solar se realiza por medio de motores de bajo consumo energético que re direccionan los lentes concentradores. Foto sensores son los encargados de generar las señales que alimentan el micro controlador, el cual genera la señal de control a los motores para corregir su inclinación.</p>	 <p>The diagram shows a solar concentrator mounted on a motorized base that can rotate and tilt to follow the sun's path, indicated by a sun icon and curved arrows.</p>
<p>Mantenimiento</p>	<p>Como cualquier sistema de acristalamiento, es necesaria una limpieza periódica para retirar la suciedad que pueda impedir el ingreso de la luz a los concentradores.</p>	
<p>Parámetros de diseño</p>	<p>Según las necesidades del recinto, el diseñador tiene un gran número de variables para garantizar la iluminación en el interior. Puede decidir el número de módulos concentradores de luz y por ende el número de hilos de fibra óptica, el tipo de luminaria utilizada para la dispersión de la luz al interior y la longitud del ducto de fibra óptica.</p>	

Fuente: [10].



2.3 COMPONENTES ESTRUCTURALES DE CAPTACIÓN DE LUZ NATURAL

En una edificación, su estructura es un importante elemento de captación de luz, cuando ésta lo ilumina o pasa a través de él, o bien como elemento que controla cómo y por donde entra la luz en un espacio. A continuación en las Tablas 17 a 24 se describen algunos elementos arquitectónicos que cumplen un gran papel en cuanto a aporte de luz natural se refiere.

2.3.1 Galería

Las edificaciones que cuentan con este componente, además de contar con alto nivel de iluminación natural, son muy espaciosas, generando un ambiente agradable para su instancia. La Tabla 17 muestra un ejemplo de esta y su descripción.

Tabla 17. Características de una galería.

<p>Descripción técnica</p>	<p>Es un espacio de luz cubierto (loft), que hace parte de un edificio. Puede abrirse al exterior o puede estar cerrada mediante cristales.</p> <p>Permite que la luz natural entre en las partes interiores de un edificio, conectando a la galería con el exterior por elementos de paso.</p> <p>Permite la disminución de cambios bruscos de contrastes de luz en las zonas adyacentes a esta.</p>	
<p>Aplicación</p>	<p>Son utilizadas en edificaciones amplias, desempeñándose como pasillos o salas de exhibición permitiendo unas condiciones de luz natural confortables para el ser humano.</p>	

Fuente: [12].

2.3.2 Patio

Consiste en un área sin techar al interior de una edificación, puede ser considerado como un lugar de esparcimiento, a su vez se convierte en una fuente de luz para los recintos contiguos. La Tabla 18 da una descripción de sus características.



Tabla 18. Características de un patio.


<p>Descripción técnica</p>	<p>Es un espacio encerrado por las paredes de uno o varios edificios y está abierto al exterior por su parte superior, en edificaciones de varias plantas solo ingresa la luz difusa proveniente del cenit. En algunas ocasiones, cuando no se cuenta con altos niveles de iluminación, son instalados heliostatos que reflejan la luz solar al interior del patio, evitando que los rayos reflejados incidan directamente sobre las aberturas de toma de luz que dan al patio. Los acabados de las paredes que lo encierran, influyen sobre las prestaciones de iluminación del patio. Aparte de permitir el ingreso de la luz solar, cumplen un gran papel en el acondicionamiento climático de la edificación permitiendo la circulación de aire.</p>	
<p>Aplicación</p>	<p>Es un espacio útil en cualquier edificación donde su diseño lo permita, en particular en edificaciones que cuenten con recintos de gran profundidad o que no limiten con algún costado de la edificación que brinde entrada de luz.</p>	

Fuente: [12]

2.3.3 Atrio

Un atrio es un espacio cerrado lateralmente por las paredes de un edificio y cubierto con material transparente o translúcido. La Tabla 19 presenta la descripción de algunas de sus características.

Tabla 19. Características de un atrio.

<p>Descripción técnica</p>	<p>Permite la entrada de luz a otros espacios interiores unidos a él por elementos de paso. Puede introducir un elemento de espaciosidad en un interior de trabajo, las superficies interiores están protegidas de la intemperie de modo que las paredes y las ventanas que dan al atrio no necesitan ser herméticas, permitiendo la ventilación.</p>	
<p>Aplicación</p>	<p>Se puede aplicar en edificaciones de pocas plantas. Normalmente ocupa la altura total del edificio. En climas fríos en una buena opción, ya que evita pérdidas de calor al ser un espacio cerrado y protegido de la intemperie.</p>	


Fuente: [12].



2.3.4 Muro cortina

Es un tipo de fachada transparente que no soporta ninguna carga del edificio más que su propio peso. La Tabla 20 describe sus características.

Tabla 20. Características de un muro cortina.


<p>Descripción técnica</p>	<p>Consiste en una superficie vertical translúcida o transparente continua, sin función estructural, con un bastidor metálico típicamente diseñado con perfiles de aluminio extruido que soporta dicha superficie transparente. Este componente incrementa el nivel luminoso en zonas próximas al muro cortina, pero no permite la ventilación.</p>	
<p>Aplicación</p>	<p>Puede ser utilizado en cualquier tipo de edificación, ya sea de una o varias plantas. Al permitir la vista al exterior es una buena opción en edificio de oficinas, brindando un ambiente agradable de trabajo.</p>	

Fuente: [12].

2.3.5 Techo traslucido

Para lograr una mejor iluminación en el interior de los locales se utilizan, en algunos casos, los llamados techos translucidos. La Tabla 21 da una descripción de sus características.

Tabla 21. Características de un techo traslucido.

<p>Descripción técnica</p>	<p>Consiste en una superficie horizontal construida con materiales translucidos, que separa el espacio interior del exterior o dos espacios interiores superpuestos. Permite la entrada cenital de luz natural difundida a través del material translúcido, sus dimensiones pueden ser similares o menores al área inferior iluminada. Puede estar construido con una gran variedad de materiales translucidos, que para el caso en el que dividen dos plantas superpuestas, tienen la suficiente resistencia para soportar la carga móvil de la planta superior.</p>	
<p>Aplicación</p>	<p>Pueden ser utilizados en los techos de la planta superior del edificio o en las placas divisorias. Utilizado también para cubrir los patios, especialmente en zonas lluviosas.</p>	


Fuente: [12].



2.3.6 “Porche”

Un “porche” es un espacio arquitectónico abierto lateralmente y cerrado por la parte superior, ubicado generalmente como antesala según se describe en la Tabla 22.

Tabla 22. Descripción de un porche.

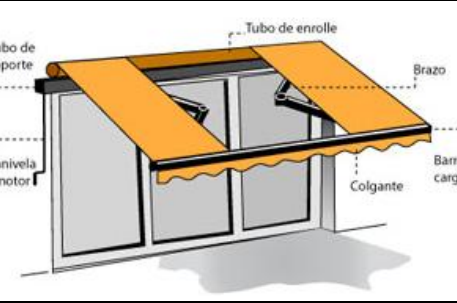
<p>Descripción técnica</p>	<p>Es un espacio de luz cubierto unido a un edificio a nivel del suelo, abierto al entorno exterior en los que circula libremente el aire, permite la entrada de luz natural a las partes del edificio directamente conectadas a él y las protege contra la radiación solar directa y la lluvia. Representan una prolongación de algunos espacios interiores hacia el exterior de la casa, creando así un área intermedia.</p>	
<p>Aplicación</p>	<p>Puede ser utilizado como base o soporte para la construcción de una segunda planta, o simplemente ser una prolongación del techo para impedir la radiación solar directa sobre la fachada.</p>	

Fuente: [12].

2.3.7 Toldo

Son elementos de protección a la radiación solar, pero en algunas ocasiones son utilizados como techos provisionales plegables. La Tabla 23 presenta una descripción de sus características.

Tabla 23. Características de un toldo.

<p>Descripción técnica</p>	<p>Un toldo es un elemento de control de luz hecho de un material flexible, opaco o difusor colocado en el exterior de un componente de captación de luz o para cubrir patios y balcones con el fin de obstaculizar o difundir la radiación solar directa. Proporciona una iluminación de bajo contraste en la zona próxima al toldo y una sombra parcial o total para la ventana cuando así se requiere. Su modo de proteger de la luz solar permite evitar la penetración directa sin impedir la visión al exterior.</p>	
<p>Aplicación</p>	<p>Se puede utilizar como protección contra la radiación solar que incide directamente sobre una ventana. Los parámetros a tener en cuenta son el largo, salida del toldo y la inclinación. Pueden ser manuales o motorizados</p>	


Fuente: [12].



2.3.8 Cúpula

Este elemento arquitectónico, además de cumplir sus funciones arquitectónicas o de decoración, es un elemento, que construido con materiales translucidos, se convierte en un elemento de captación de luz natural importante. Su descripción se encuentra en la Tabla 24.

Tabla 24. Descripción de una cúpula.

<p>Descripción técnica</p>	<p>Permite la iluminación cenital del espacio situado bajo ella. Puede ser de vidrio, material acrílico o policarbonato, requiere de técnicas de construcción y materiales muy adecuados, que brinden estabilidad y propiedades ópticas que controlen la luz solar incidente. Pueden ser de diferentes formas y tamaños, las más comunes son ovaladas o semiesféricas, pueden alcanzar desde algunos centímetros a varios metros de diámetro.</p>	
<p>Aplicación</p>	<p>Es utilizada en construcciones con el fin de permitir el ingreso de luz natural al interior del edificio y a su vez, dentro del marco arquitectónico, cumpliendo una función decorativa.</p>	

Fuente: [12].



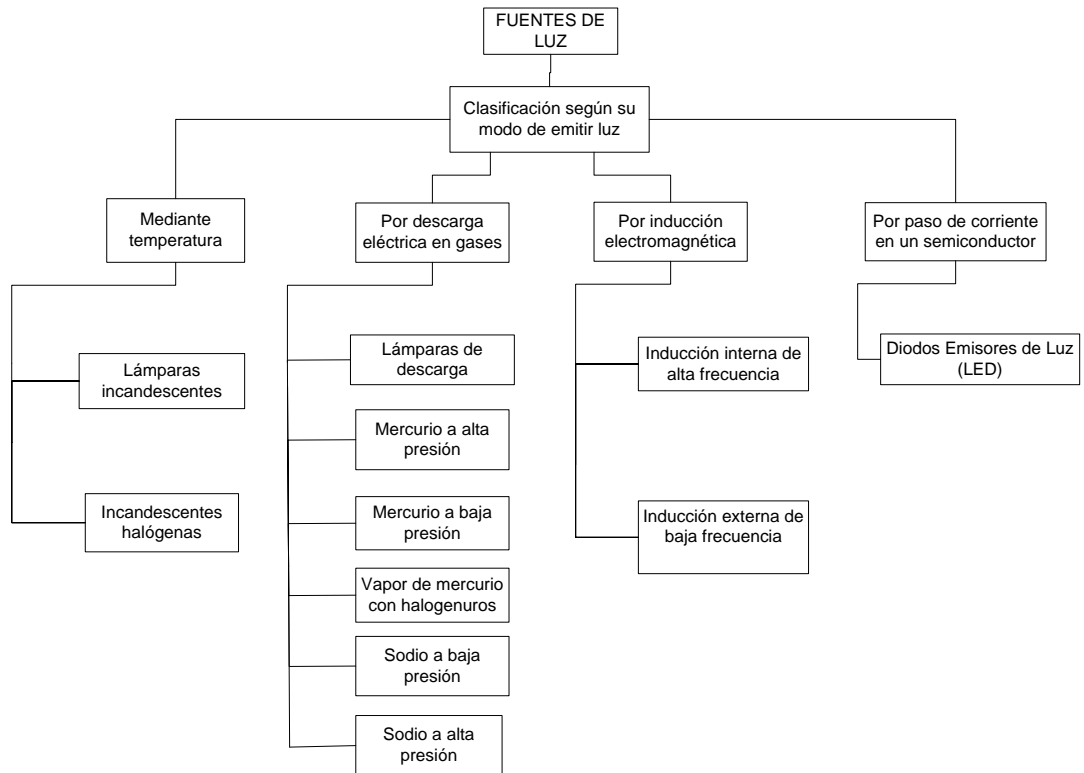
3. TECNOLOGÍAS DE ILUMINACIÓN ARTIFICIAL

A pesar de tener un buen aprovechamiento de la luz natural en la iluminación interior de edificios, se hace necesaria la utilización de luz artificial para brindar los niveles de iluminación adecuados para desarrollar las diferentes actividades de manera confortable y sin producir molestias o desgaste en la visión humana.

A continuación se describen tecnologías de iluminación artificial a partir de sus principales características, principio de funcionamiento, aplicaciones más comunes, entre otros aspectos.

La Figura 7 muestra una clasificación de las fuentes de luz artificial en función del modo de emitir luz.

Figura 7. Fuentes de iluminación artificial.



Fuente: Autores.



3.1 LÁMPARAS INCANDESCENTES

A pesar de ser elementos con una excelente reproducción cromática, su modo de emitir luz hace que gran cantidad de la energía consumida sea disipada en calor. Una reducida cantidad de la energía consumida es convertida en luz visible, lo cual hace que en la actualidad se encuentren discontinuadas [15].

3.2 LÁMPARAS DE DESCARGA

En este tipo de lámparas la luz es producida por la excitación de un gas sometido a descargas eléctricas entre dos electrodos, dependiendo del tipo de gas contenido en la lámpara y la presión a la que se encuentre se obtiene diferentes tipos de lámparas con propiedades luminosas diferentes, las cuales se describen a continuación [17].

3.2.1 Lámparas de mercurio a alta presión

En su interior se encuentran gases como argón y mercurio, no se caracterizan por una buena reproducción cromática. La Tabla 25 describe su principio de operación y sus principales características.

Tabla 25. Principio de operación de las lámparas de mercurio a alta presión.


Descripción técnica	<p>Están constituidas por una pequeña ampolla de cuarzo, provista de dos electrodos principales y uno o dos auxiliares, en cuyo interior se encuentra una cierta cantidad de argón y unas gotas de mercurio. Los electrodos auxiliares llevan una resistencia en serie que limita la intensidad de la corriente que por ellos puede circular. Debe llevar un elemento limitador de corriente (balasto). La temperatura de color de estas lámparas, depende del tipo de recubrimiento fluorescente que lleve, pero suele estar comprendida entre (3 800 K a 4 000 K), y tiene un rendimiento luminoso que oscila entre 40 Lm/W y 60 Lm/W.</p>	
	<p>Proporcionan una reproducción del color reducida. Sensibles a bajas temperaturas. La lámpara no se apaga cuando la tensión baja del 100% al 90% en 0,5 segundos y se mantiene en este valor durante 5 segundos más.</p>	
Aplicación	<p>Alumbrado interior con equipo electrónico. Aconsejables en alumbrados públicos y en grandes almacenes. Se usan lámparas completamente transparentes, las cuales iluminan bien en zonas donde no se requiera estrictamente una exacta reproducción de los colores, naves industriales de elevada altura.</p>	



Tabla 25. (Continuación)

Principios físicos y características	El funcionamiento de las lámparas de vapor de mercurio a alta presión, se basa en el mismo principio que el de las lámparas fluorescentes. Cuando se conecta a la red de alimentación, se producirá inicialmente una descarga entre el electrodo principal y el auxiliar, que se encuentran muy próximos, lo que ioniza el argón, haciéndolo conductor y estableciendo un tenue arco entre los dos electrodos principales; el calor generado por esta descarga va progresivamente evaporando el mercurio del interior de la ampolla. A medida que aumenta la temperatura en el tubo de descarga, aumenta la presión del vapor de mercurio y con ella la potencia activa consumida y el flujo luminoso emitido, hasta alcanzar transcurridos de 3 a 4 minutos los valores nominales.
Control	Regulables solo un 50% de su flujo luminoso y un 60% de su consumo eléctrico. El modo de regularlos es con balastos inductivos de doble nivel.
Mantenimiento	La depreciación del flujo luminoso depende de las horas de funcionamiento de la lámpara, suele ser del 12% a las 8 000 horas de funcionamiento y del 35% a las 15 000 horas. La vida media de la lámpara es extraordinariamente elevada, del orden de 24 000 horas, aunque para estas horas de funcionamiento la depreciación del flujo luminoso sea del orden del 50%. Debido a su bajo costo este tipo de lámparas presenta un ahorro significativo en instalación, funcionamiento y mantenimiento.
Ahorro de energía	Eficiencia luminosa del orden de 60 Lm/W.
Ventajas	Larga duración, bajo costo de adquisición, variedad de apariencia y color, distribución luminosa adecuada para empleo en interiores, buena reproducción de los colores.
Desventajas	Sin equipo electrónico el encendido no es instantáneo (dura de tres a cuatro minutos alcanzar su flujo luminoso nominal), se presenta efecto estroboscopia, en ocasiones presenta altas radiaciones UV.

Fuente: [16], [17].

3.2.2 Lámparas de mercurio de baja presión (lámparas fluorescentes tubulares)

Fueron destinadas inicialmente al remplazo de las lámparas incandescentes en usos domiciliarios. La Tabla 26 describe sus principales características técnicas y de aplicación.

Tabla 26. Descripción de lámparas de mercurio de baja presión (lámparas fluorescentes tubulares).

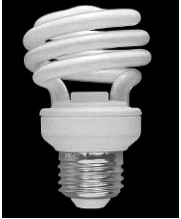
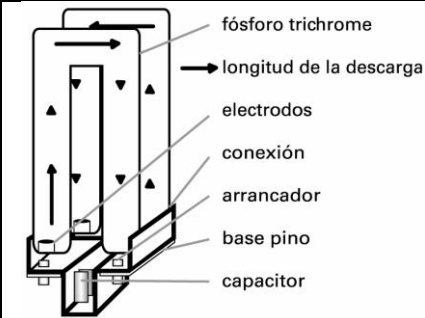
Descripción técnica	La técnica de miniaturización de las lámparas fluorescentes permitió el desarrollo de las lámparas fluorescentes compactas. Conocidas popularmente como "lámparas de bajo consumo" contienen balastos electrónicos incorporados.	
Aplicación	Su propósito fue la sustitución de lámparas incandescentes y de vapor de mercurio y cubrir las necesidades de iluminación de interiores en general.	



Tabla 26. (Continuación)

Principios físicos y características	Están basadas en el principio de descarga en vapor de mercurio a baja presión, similar al de las lámparas fluorescentes convencionales. Su principal atributo es su reducido tamaño, comparable al de las lámparas de incandescencia. Se fabrican en cuatro potencias 5 W, 7 W, 9 W y 11 W, tienen la particularidad que el cebador va incorporado en la base de la lámpara.	
Control	Tiene la posibilidad de regulación de flujo luminoso y potencia de 10 -100%	
Mantenimiento	Su vida media es de unas 8 000 horas, la depreciación del flujo luminoso para su vida media es del 20%.	
Ahorro de energía	La eficiencia luminosa es del orden de 56 - 60 Lm/W.	
Ventajas	Buena eficiencia luminosa, larga duración, mínima emisión de calor, variedad de apariencia y color, buena reproducción de los colores.	
Desventajas	Costo medio alto.	

Fuente: [16], [17].

3.2.3 Lámparas de vapor de mercurio con halógenos

La adición de halógenos hace necesaria una tensión de encendido muy superior a la de una red de alimentación, 200/380 V, por lo que necesita un arrancador que proporcione tensiones de pico del orden de 1,5 kV a 5 kV.

La Tabla 27 describe algunas de sus características principales, principios físicos y aplicaciones más comunes.

Tabla 27. Descripción de las lámparas de vapor de mercurio con halógenos.


Descripción técnica	Estas lámparas cumplen el objetivo de igualar el color de la luz a la diurna o solar, mejorando su índice de reproducción cromática y su color. Requieren de un balasto para regular la corriente y un arrancador para provocar la descarga. Con una potencia de 150 W pueden llegar a equivaler a incandescentes de 1 000 W. El tubo de descarga es de cuarzo con un electrodo de wolframio en cada extremo, recubierto de un material emisor de electrones. El bulbo exterior es de vidrio duro y sirve para el equilibrio térmico del tubo de descarga y para su aislamiento.	
	Temperatura de color 3000 K - 6000 K. Rendimiento de color Ra 65 - 95. Están disponibles en tres colores de luz: blanco cálido, blanco neutro y blanco de luz diurna.	



Tabla 27. (Continuación)

Aplicación	Se le suele usar en lugares donde se requiere una buena reproducción de colores, como estaciones de televisión y campos deportivos, en estaciones de combustible, plazas y alumbrado público.
Principios físicos y características	A la lámpara estándar de mercurio se le agregan elementos adicionales en el quemador de cuarzo tales como yoduro ftálico y halogenuros de las tierras raras (disprosio, holmio, tulio, indio, sodio, titanio, estaño y argón). La corriente llega a los electrodos a través de unas láminas de molibdeno, selladas herméticamente con el cristal de cuarzo. Los electrodos tienen además óxido de torio, para colaborar con la emisión de electrones. A 1 000 °C de temperatura las tierras raras se subliman, produciendo una radiación luminosa con una distribución espectral muy continua, logrando un índice de reproducción cromática. Dado que estas lámparas no emiten radiaciones ultravioleta, eliminan la necesidad de la capa fluorescente, por lo que se suelen construir en ampollas cilíndricas transparentes. Las mezclas de haluros metálicos afecta la naturaleza de la luz producida, variando correlacionadamente la temperatura del color y su intensidad.
Control	En estas lámparas son regulables su flujo y potencia eléctrica, mediante balastos electrónicos de alta frecuencia, esta regulación de flujo y potencia es posible hacerla entre un 40% y un 100%, también se pueden usar dimmers mecánicos logrando atenuar su nivel de luminosidad. Se deben conectar a la red a través de una reactancia que controle la intensidad, es preciso tener especial cuidado con la combinación reactancia-arrancador para que sea la adecuada.
Mantenimiento	La vida útil de la lámpara se encuentra entre 2 000 y 8 000 horas, dependiendo directamente del tipo y del fabricante.
Ahorro de energía	Cuando se utilizan aditivos de sodio, talio e indio, se obtiene una eficacia luminosa del orden de 95 Lm/W y cuando se utilizan aditivos a base de estaño, el rendimiento luminoso es de unos 45 Lm/W.
Ventajas	Buena eficiencia luminosa, reducida radiación térmica, buena reproducción cromática Ra >90, duración media, variedad de potencias, reducidas dimensiones.
Desventajas	Alta depreciación del flujo, sensibilidad a las variaciones de tensión, requiere equipos especiales para arranque en caliente, flujo luminoso no instantáneo, poca estabilidad del color.

Fuente: [16], [17].

3.2.4 Lámparas de sodio a baja presión

Se fabrican en un rango de potencias relativamente bajas, comprendidas entre 18 y 180 W. La Tabla 28 da la descripción de sus principales características.

Tabla 28. Descripción de la lámpara de sodio a baja presión.


Descripción técnica	<p>Debido a que estas lámparas requieren para su encendido tensiones más elevadas que la nominal de la línea, que varían entre 400 y 680 V, se necesita un equipo auxiliar del tipo autotransformador de dispersión para su funcionamiento, cuyo diseño varía según la potencia de la lámpara. Sin embargo, también existen circuitos híbridos, compuestos por un balasto en serie con un capacitor y un ignitor.</p> <p>El proceso de encendido de una lámpara de vapor de sodio a baja presión dura unos 10 minutos y al final se obtiene una luz amarilla monocromática. El rendimiento de estas lámparas es óptimo cuando la temperatura interna alcanza los 270 °C. Reproducción cromática: nula. Ra = 0. Luz totalmente monocromática amarillo oro. Para su encendido requiere alrededor de 9-10 minutos y para el re encendido de 4 - 5 minutos. Su factor de potencia es bajo y puede corregirse con capacitores.</p>	
---------------------	---	---



Tabla 28. (Continuación)

Aplicación	Se utilizan en aplicaciones muy específicas donde no resulta tan importante la reproducción cromática obtenida; alumbrado de Seguridad, alumbrado de túneles, alumbrado de carreteras con neblina, alumbrado exterior en donde la identificación de colores no es necesaria.
Principios físicos y características	Constructivamente las lámparas de vapor de sodio a baja presión están formadas por dos ampollas de vidrio tubulares. La ampolla interna o tubo de descarga tiene forma de U, en su interior se encuentra una pequeña cantidad de gas neón a baja presión y sodio puro en forma de gotas, cuando está frío; así mismo, en los extremos del tubo de descarga se encuentran dos electrodos de filamento de wolframio, sobre los que se ha depositado un material emisor de electrones. La ampolla exterior envolvente, tiene como misión la protección térmica y mecánica del tubo de descarga y entre las dos se ha hecho el vacío. Al aplicar tensión entre los electrodos, se produce la descarga a través del gas neón, la cual determina la emisión de una luz roja característica de este gas. El calor generado por la descarga produce la vaporización progresiva del sodio y como consecuencia, la descarga pasa a efectuarse en una atmósfera en la que la concentración de sodio es cada vez mayor, produciendo una luz cada vez más amarilla.
Control	Permite la regulación de la emisión de luminosidad conservando un alto rendimiento.
Mantenimiento	La vida media resulta ser de unas 15 000 horas, con una depreciación que no llega al 20%.
Ahorro de energía	La eficiencia luminosa de las lámparas de vapor de sodio a baja presión llega a ser de 180 Lm/W.
Ventajas	Excelente eficiencia luminosa, larga vida, aceptable rendimiento de color en tipos especiales, re encendidos instantáneos en caliente.
Desventajas	Muy baja reproducción cromática, sensibilidad a descensos de tensión.

Fuente: [16], [17].

3.2.5 Lámparas de sodio de alta presión

Tienen el mismo principio de funcionamiento que las lámparas de sodio de baja presión. Su descripción se muestra en la Tabla 29.

Tabla 29. Descripción de las lámparas de sodio a alta presión.


Descripción técnica	<p>La ampolla de la que está hecha la lámpara es de materiales transparentes ya que emite despreciables cantidades de radiación ultra violeta. Debido a la presión elevada del sodio en el tubo de descarga, para el encendido de estas lámparas es preciso aplicar tensiones de pico comprendidas entre 2 800 V y 5 500 V. Utiliza arrancadores especiales capaces de generar los impulsos de encendido. La intensidad de arranque de estas lámparas es del orden del 40 al 50% superior al valor nominal que se alcanza una vez transcurrido el tiempo de encendido. El tiempo de re encendido suele ser del orden de 2 a 3 minutos. La temperatura de color resulta ser de 2000 K - 2200 K. Rendimiento de color de Ra= 20 - 65 predominantemente amarilla.</p>	
	<p>Generalmente se les conecta un capacitor para corregir el factor de potencia en forma local. Requieren un período de cebado de unos cuantos minutos y una fase de enfriamiento, antes de que se puedan encender de nuevo.</p>	



Tabla 29. (Continuación)

Aplicación	Las lámparas de sodio de alta presión a menudo se utilizan cuando a largo plazo es más importante la economía que una reproducción precisa del color; alumbrado exterior, alumbrado de túneles, alumbrado Industrial de media y gran altura, alumbrado público, estacionamientos, alumbrado de seguridad, alumbrado de pasos peatonales.
Principios físicos y características	Tienen el mismo principio de funcionamiento que las lámparas de sodio de baja presión. Las lámparas de alta presión presentan modificaciones, tales como aumentar la presión del vapor de sodio, a costa de trabajar a temperaturas más elevadas, y agregar además del gas inerte, xenón, una pequeña cantidad de mercurio que ayude a mejorar el espectro. Para que estas dos modificaciones se puedan hacer es necesario vencer una seria dificultad, dado que el sodio a alta presión y temperatura, ataca seriamente al vidrio y al cuarzo. Por lo tanto, se han creado tubos de descarga a base de óxido de aluminio sinterizado, capaces de soportar la acción del sodio a temperaturas superiores a los 1 000 °C y al mismo tiempo transmitir el 90% de la luz visible producida por la descarga eléctrica en su interior. Este tubo está cerrado mediante tapones de corindón sintético, en los que se soportan los electrodos.
Control	Es posible regular el flujo luminoso y potencia de 50% a 100% mediante la utilización de balastos electrónicos de alta frecuencia.
Mantenimiento	La vida media es de unas 15 000 - 24 000 horas, con una depreciación del flujo que no llega al 40%.
Ahorro de energía	La eficiencia luminosa es francamente buena, del orden de 90 -150 Lm/W.
Ventajas	Muy buena eficiencia luminosa, larga vida, aceptable rendimiento de color en tipos especiales, baja depreciación de flujo, casos de reducidas dimensiones.
Desventajas	Mala reproducción cromática en versión estándar, estabilización no instantánea en potencias pequeñas, gran sensibilidad a sobre tensiones, equipos especiales para re encendido en caliente.

Fuente: [16], [17].

3.3 LÁMPARAS DE INDUCCIÓN ELECTROMAGNÉTICA

La Tabla 30 presenta una descripción de sus características y principio de funcionamiento.

Tabla 30 Descripción de las lámparas de inducción electromagnética.

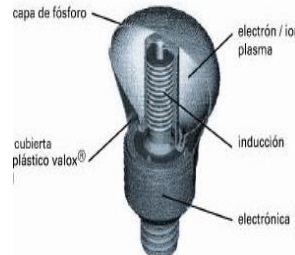
Descripción técnica	<p>La Lámpara de Inducción Electromagnética “sin electrodos” (IEM) es un nuevo concepto de muy alta tecnología para el ahorro energético en la iluminación, basado en el principio de gas de descarga de las lámparas fluorescentes y en el principio de la inducción electromagnética de alta frecuencia. Se pueden clasificar en dos tipos, de inducción interna de alta frecuencia (2,65 MHz) y de inducción externa de baja frecuencia (2,5 KHz). Presenta versatilidad en el diseño de lámparas que pueden producir diferentes temperaturas de color (2 700 K a 4 000 K) reproducción cromática buena (Ra = 80), variedad de lámparas en cuanto a potencias que van de los 23 W a los 165 W, alto factor de potencia > 0,99 y < 1, alta eficiencia luminosa (superior a 80 Lm/W), luz suave sin parpadeo.</p>	
---------------------	--	---



Tabla 30. (Continuación)

Aplicación	La aplicación más extendida hoy día es en la iluminación de parques y plazas, dentro de farolas, aunque los varios tipos y series de la lámpara de inducción son capaces de cumplir con los alumbrados de espacio interior o exterior comerciales e industriales.
Principios físicos y características	Las lámparas de inducción usan una bobina de inducción sin filamentos y una antena acopladora, la cual consiste en aplicar una descarga a determinada frecuencia para proveer soluciones de iluminación. El centro de la lámpara es la bobina de inducción a la cual le provee potencia un generador de alta frecuencia. El ensamble de vidrio circundante contiene un material electrón-Ion plasma y esta relleno con un gas inerte. La porción interior del vidrio está recubierta con una película de fósforo la cual es similar al que se encuentra en las lámparas fluorescentes. La antena transmite la energía generada por el primario de la bobina de un sistema de inducción al gas que se encuentra dentro de la lámpara, por lo cual se crea una radiación ultravioleta, la cual es luego transformada a fuentes visibles de luz por medio del recubrimiento de fósforo en la superficie de vidrio.
Control	Las lámparas de inducción se encienden inmediatamente en 70 - 80% de su intensidad total, esto permite el uso de controles de encendido/apagado automáticos o manuales. En el caso de controles automáticos el uso de sensores de presencia, temporizadores y sensores de luz es conveniente. Las lámparas de inducción pueden atenuarse usando balastos atenuables lo cual puede proporcionar ahorros de hasta un 65%, se espera que en un futuro se desarrollen balastos capaces de atenuar desde un 100 hasta un 30% de la intensidad total de la lámpara. En el caso de atenuación manual las perillas, botones, barras, etc. Son una buena opción de control.
Mantenimiento	No necesita mantenimiento ni cambios de foco ni balasto
Ventajas	Tiene un blindaje contra la radiación, mayor seguridad, tecnología de disipación térmica más avanzada, larga vida útil, cableado regular, excelente protección por alambres. No utiliza gases a presión ni tóxicos como el haluro metálico. Posee protección contra variaciones de voltaje que evita daños a las luminarias. La depreciación de la luz es mucho menor en comparación con la tasa de depreciación en una de haluros metálicos ⁵ , no se calientan más allá de los 85 °C, sus elementos no se funden ni tampoco los cables de conexión, su bombilla no explota producto del cambio de temperatura ambiente dentro del amplio rango en la que puede operar. Dado que las Lámparas de Inducción Electromagnética funcionan a alta frecuencia, no producen el efecto estroboscópico típico de los tubos fluorescentes convencionales, lo que se traduce en una reducción de tensión y cansancio visual del ser humano.
Desventajas	En algunos modelos las lámparas vienen provistas con una jaula de Faraday, para evitar interferencias del campo electromagnético generado con otros equipos cercanos.

Fuente: [16], [17].


3.4 LÁMPARAS LED

Inicialmente esta tecnología fue utilizada para aplicaciones decorativas y posteriormente se desarrollaron aplicaciones para iluminación en interiores y exteriores. Una descripción de sus principales características se muestra en la Tabla 31.

⁵ Son los compuestos que contienen los elementos del grupo 7 de la tabla periódica (flúor, coro, bromo, yodo y ástato) en estado de oxidación -1.



Tabla 31. Descripción de las lámparas LED.

<p>Descripción técnica</p>	<p>En el interior de un LED se encuentra un pequeño semiconductor encapsulado en un recinto de resina de epoxi. No tienen filamentos u otras partes mecánicas sujetas a rotura ni a fallos por "fundido", no existe un punto en que cesen de funcionar, sino que su degradación es gradual a lo largo de su vida. El encendido se produce instantáneamente al 100% de su intensidad sin parpadeos ni periodos de arranque.</p> <p>La luz blanca pura del LED proporciona un mejor espectro para el ojo humano. Con las lámparas LED actuales se obtienen un flujo luminoso de 115 lúmenes por LED a 350 mA.</p>	
<p>Aplicación</p>	<p>Diferentes tipos de lámparas LED son utilizados para uso doméstico, para producir luz extremadamente brillante y continua. Se utilizan para el entretenimiento y la iluminación arquitectónica en el marco de sofisticadas edificaciones y el de diseño de interiores de vanguardia. Uno de los usos más importantes y visibles de la iluminación por LED son las aplicaciones de iluminación con cambio de color RGB⁶.</p>	
<p>Principios físicos y características</p>	<p>Es un dispositivo semiconductor que emite luz incoherente de espectro reducido, cuando se polariza de forma directa la unión PN del mismo y circula por él una corriente eléctrica. Este fenómeno es una forma de electroluminiscencia, el color depende del material semiconductor empleado en la construcción del diodo y puede variar desde el ultravioleta, pasando por el visible, hasta el infrarrojo. El cátodo de cualquier LED produce electrones excitados que producen fosforescencia en un 75% y fluorescencia en un 25%. En este caso, consiste en situar una capa fluorescente azul cerca del cátodo, mientras que las capas roja y verde fosforecen unos nanómetros por encima, de este modo, la capa azul absorbe aquellos electrones dispuestos a fluorescer y dejando los otros electrones para que los atrapen las capas roja y verde; teniendo en cuenta que la luz blanca tiene un 25% de luz azul, el resultado final es luz blanca casi perfecta.</p>	
<p>Control</p>	<p>Se pueden utilizar varios sistemas de control, en el cuerpo del artefacto o remoto. Debido a sus principios y características físicas se presta para que pueda ser controlada su emisión luminica y una correcta adaptación a las escenas requeridas.</p>	
<p>Mantenimiento</p>	<p>Aproximadamente a las 50 000 horas según fabricantes, es cuando su flujo decae por debajo del 70% de la inicial, eso significa aproximadamente 6 años en una aplicación de 24 horas diarias 365 días/año. Reducción de costos de mantenimiento ya que no se necesita reemplazarlas, no se degrada por el número de encendidos. Absorbe las posibles vibraciones a las que pueda estar sometido el equipo sin producir fallos ni variaciones de iluminación, Esto es debido a que el LED carece de filamento luminiscente evitando de esta manera las variaciones de luminosidad y su posible rotura.</p>	
<p>Ahorro de Energía</p>	<p>Sustituir los bombillos tradicionales incandescentes y fluorescentes por lámparas LED garantiza reducir los consumos por iluminación entre un 50% y un 90%. Los LED tienen un consumo de electricidad muy bajo (hasta 80% de ahorro). Generalmente, un LED está diseñado para funcionar con un voltaje y una corriente de 2 – 3,6 V, 0,02 - 0,03 A, esto significa que no necesita más de 0,1 W para funcionar. La iluminación LED utiliza 90% para iluminar y solamente el 10% de calor de la energía consumida.</p>	
<p>Ventajas</p>	<p>Diseñados para una fácil instalación, gama completa de colores y ángulos de iluminación para múltiples efectos, un LED puede ser sumamente pequeño y proporcionar un haz de luz de altas prestaciones lumínicas, puede convertir casi toda la energía usada en luz, y por lo tanto el rendimiento de los mismos se traduce en una muy alta eficacia luminosa y baja emisión de calor, están fabricados con materiales no tóxicos a diferencia de las lámparas fluorescentes con el mercurio que contienen y que plantean un peligro de contaminación. Los LED pueden ser totalmente reciclados, reducen al mínimo los posibles riesgos de electrocución, debido a los valores bajos de corriente que maneja, tienen una respuesta de funcionamiento mucho más rápida que el halógeno y el fluorescente, del orden de algunos microsegundos.</p>	
<p>Desventajas</p>	<p>Son más caros que las bombillas convencionales.</p>	

Fuente: [16], [17].

⁶ El código de colores RGB, (rojo - verde – azul), se basa en la mezcla de estos 3 colores para conseguir toda la gama completa de colores.

4. PROCEDIMIENTO PARA EVALUAR EL DESEMPEÑO LUMÍNICO DE TECNOLOGÍAS DE ILUMINACIÓN NATURAL EN ESPACIOS INTERIORES

La iluminación natural en el interior de un recinto depende de la radiación solar que ingresa por las aberturas. Diversos factores influyen en la cantidad y calidad de la luz natural, como son: la radiación solar directa, la nubosidad, las propiedades reflectantes de obstáculos aledaños, la orientación, etc. Estos factores constituyen el *clima luminoso*, el cual se define como el conjunto de valores estadísticos de la luminosidad del cielo a diferentes horas del día, a partir del estudio de la trayectoria solar según la latitud del lugar [8].

La realización de un proyecto de iluminación natural requiere la estimación de la luminosidad del cielo para calcular el nivel de iluminación potencial sobre las aberturas en la estructura. Estas estimaciones son realizadas con base en datos experimentales y la utilización de software, como por ejemplo *Meteonorm* o *Solea* [21]. Estas herramientas facilitan el cálculo de iluminación a partir de datos de entrada como: latitud del lugar, inclinación de la abertura, orientación, entre otras.

Luego de la descripción del funcionamiento y de las principales características técnicas de las tecnologías de iluminación, en este capítulo se presenta la propuesta de un procedimiento para evaluar el desempeño lumínico de tecnologías de iluminación natural. Depende en primera instancia si se trata de una edificación ya existente o de una construcción que se encuentra en fase de diseño.

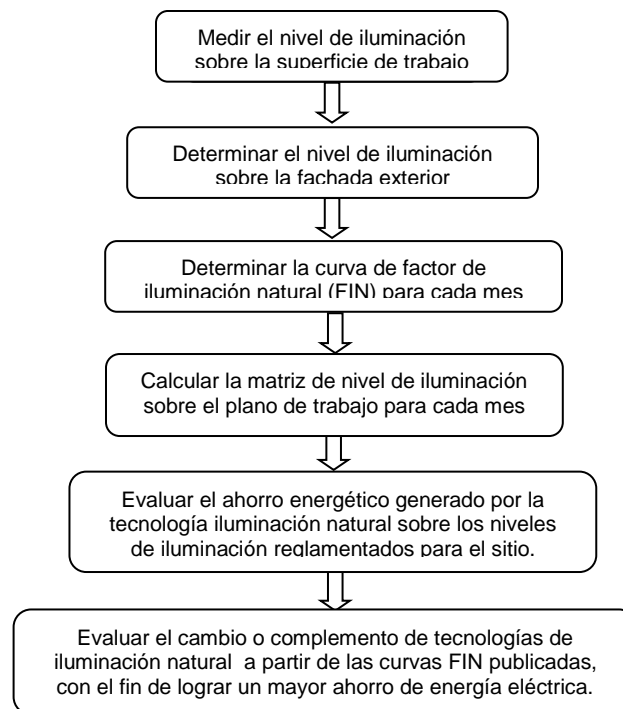
El cálculo de la iluminación en el exterior para edificaciones en fase de diseño se determinará de igual forma que en de edificaciones existentes. La obtención de los niveles de iluminación al interior de la edificación se logrará a partir de las

curvas del Factor de Iluminación Natural (FIN) o mediante la utilización de software especializados.

4.1 CASO A: CONSTRUCCIÓN EXISTENTE

Este procedimiento brinda una herramienta para calcular el porcentaje de iluminación natural aprovechada sobre la superficie de trabajo, así como el ahorro potencial de energía eléctrica a lograrse. El procedimiento establecido para realizar la evaluación se presenta en la Figura 8.

Figura 8. Procedimiento para realizar el diseño de un sistema de iluminación natural en una construcción existente.



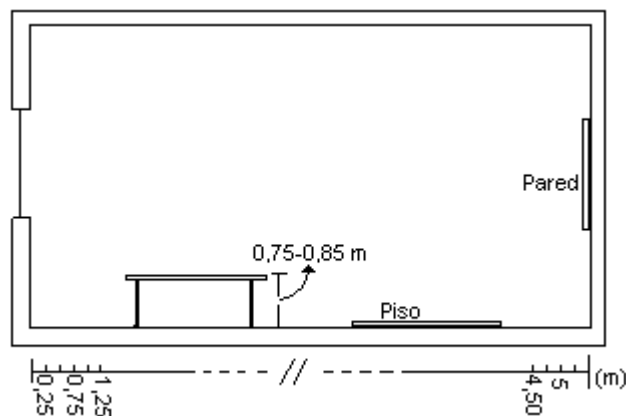
Fuente: Autores

A continuación se describen los pasos establecidos, y las herramientas requeridas para su aplicación tales como métodos, instrumentos de medición y expresiones matemáticas que permiten obtener los valores de iluminación natural en un recinto.

4.1.1 Medida del nivel de iluminación sobre la superficie de trabajo

Con el objetivo de obtener el aporte de iluminación natural sobre el plano de trabajo, se debe medir el nivel de iluminación en la superficie de interés. La superficie de trabajo puede referirse a una altura de 0,75 o 0,85 m, dependiendo si las actividades son realizadas por un sujeto sentado o de pie [15]; el piso, si se trata de pasillos o lugares de paso; o paredes, si es el caso, como se muestra en la Figura 9. Esta medición se debe hacer a una distancia que permita obtener suficiente información del nivel de iluminación y del contraste en el área de interés, aproximadamente de 0,25 m a 1 m sobre toda la superficie de trabajo.

Figura 9. Planos de trabajo en un recinto.



Fuente: Autores.

Esta medición se recomienda realizarse cada hora, con el fin de obtener de forma periódica el comportamiento durante el día del nivel de iluminación, desde las 7 a.m. hasta las 5 p.m., periodo útil debido al valor significativo de la radiación solar ($\geq 100 \text{ W/m}^2$).

La Tabla 32 muestra un formato recomendado para la recolección de datos de nivel de iluminación en un recinto.

Tabla 32. Formato para la toma de datos del nivel de iluminación en el plano de trabajo.

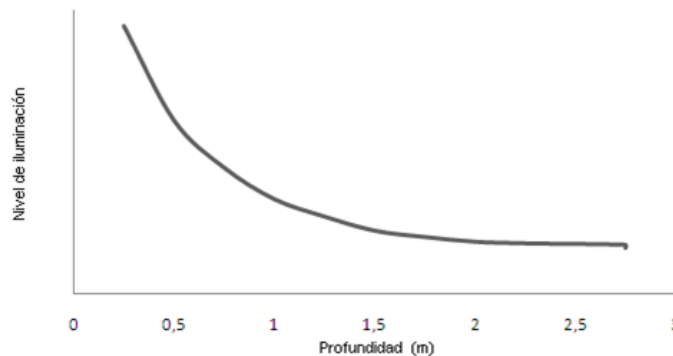
Nivel de iluminación						
Fecha						
Tecnología en estudio:						
Hora	Profundidad (m)					
	0.25	0.50	0.75	...	4.75	5.0
07:00 am.						
08:00 am.						
09:00 am.						
.						
.						
.						
04:00 pm.						
05:00 pm.						

Datos en (Lx)

Fuente: Autores

Al graficar los datos tomados en la Tabla 32 se muestra el cambio del nivel de iluminación en el recinto a medida que se aleja de la abertura, de forma similar a como se ilustra en la Figura 10.

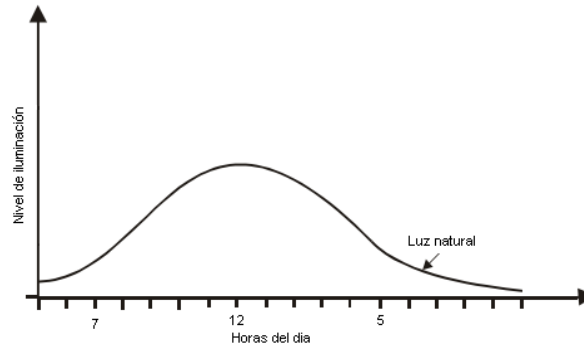
Figura 10. Variación del nivel de iluminación en función de la distancia a la abertura.



Fuente: Autores.

La Figura 11 muestra el comportamiento del nivel de iluminación en función de la hora del día, identificando con esto las horas del día en las que se cuenta con niveles de iluminación apreciables para ser aprovechados al interior de un local.

Figura 11. Variación del nivel de iluminación en función de la hora del día.

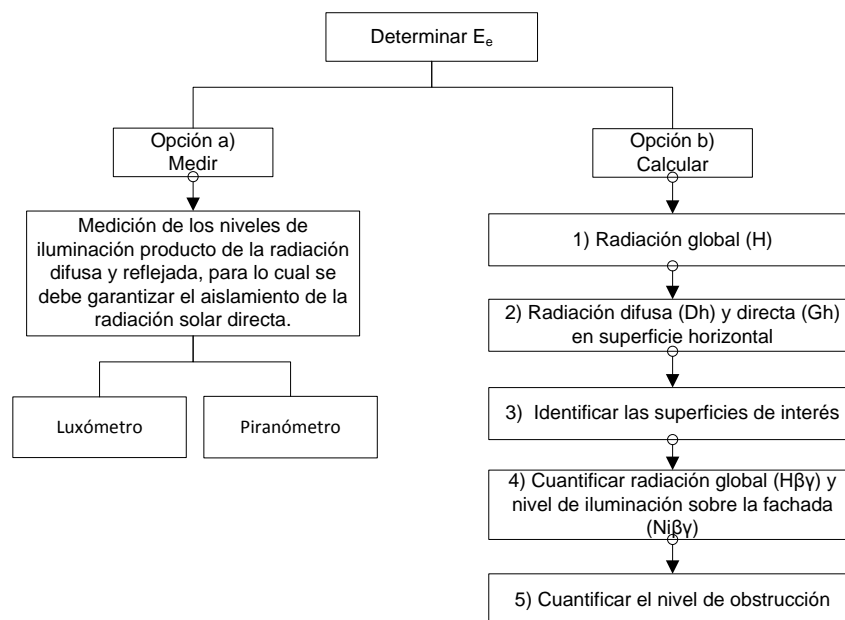


Fuente: Autores.

4.1.2 Determinación del nivel de iluminación sobre la fachada exterior (E_e)

Se realiza con el fin de cuantificar el potencial de iluminación en el exterior del recinto. Este nivel de iluminación puede ser calculado de dos formas, por medio de la realización de mediciones o cálculos matemáticos, como se muestra en la Figura 12.

Figura 12. Método de cálculo de E_e .



Fuente: Autores.

a) *Medición de nivel de iluminación exterior (E_e)*

Las diversas componentes de radiación en la superficie terrestre se miden con instrumentos avalados por Organización Mundial de Meteorología, OMM. Estos instrumentos se clasifican de acuerdo al tipo de componente radiométrico que miden. La Tabla 33 describe los principales tipos de instrumentos.

Tabla 33. Principales tipos de instrumentos para medir radiación solar.

TIPO DE INSTRUMENTO	PARÁMETRO DE MEDIDA	ANGULO DE VISIÓN [rad]	UNIDAD DE MEDIDA
Pirheliómetro absoluto	Radiación directa.	$5 \cdot 10^{-3}$	$\left[\frac{W}{m^2}\right]$
Pirheliómetro de incidencia normal	Radiación directa.	$5 \cdot 10^{-3}$	$\left[\frac{W}{m^2}\right]$
Pirheliómetro (con filtros)	Radiación directa en bandas espectrales anchas.	$5 \cdot 10^{-3}$ a $2.5 \cdot 10^{-2}$	$\left[\frac{W}{m^2}\right]$
Fotómetro solar	Radiación solar directa en bandas espectrales estrechas.	$1 \cdot 10^{-3}$ a $1 \cdot 10^{-2}$	$\left[\frac{W}{m^2}\right]$
Piranómetro	Radiación global, radiación difusa y radiación reflejada.	2π	$\left[\frac{W}{m^2}\right]$
Piranómetro espectral	Radiación global en intervalos espectrales de banda ancha.	2π	$\left[\frac{W}{m^2}\right]$
Pirgeómetro	Radiación de onda larga descendente y ascendente.	2π	$\left[\frac{W}{m^2}\right]$
Luxómetro	Iluminancia.		[lx]

Fuente: [18].

Existe una relación entre la radiación solar y la luz solar, depende si la radiación es directa (100 lm/W) o de si la luz procede de la bóveda celeste (130 lm/W) siendo común utilizar el valor medio de 115 Lm/w como rendimiento luminoso de la radiación solar [8]. La siguiente expresión indica cómo obtener la conversión de W/m^2 a lx.

$$G \left[\frac{W}{m^2}\right] * 115 \left[\frac{Lm}{W}\right] = IL \left[\frac{Lm}{m^2}\right] = IL [lx] \tag{4.1}$$

Dónde: G es valor de radiación solar en W/m^2 y IL es el valor de la iluminancia dado en Lx .

Para fines prácticos en un proyecto de diseño de iluminación natural es indispensable realizar la medición únicamente de las componentes de luz difusa y reflejada.

La radiación directa es considerada una fuente de ruido en las mediciones, al ser un componente muy variable, generador de grandes contrastes en los niveles de iluminación, y por tanto, responsable de provocar deslumbramiento e incrementos de temperatura incómodos para los ocupantes. Se recomienda, si es necesario, utilizar un elemento de protección de la radiación solar directa, para obtener la lectura en el área de estudio.

b) Cálculo de nivel de iluminación exterior E_e

En este apartado se describen los pasos para realizar el cálculo del potencial de iluminación exterior con base en métodos de cálculo de la radiación global, directa y difusa; tanto para una superficie horizontal como para una superficie inclinada.

b.1) Cálculo de radiación global sobre superficie horizontal (H)

La radiación global procedente del sol que incide sobre una superficie en la tierra, se define como la sumatoria de las componentes de radiación directa y radiación difusa ($H=G+D$) en superficies horizontales, y como la sumatoria de las componentes de radiación directa, radiación difusa y radiación reflejada ($H=G+D+R$) en superficies inclinadas. La radiación directa es aquella que llega directamente en línea con el disco solar, la radiación difusa es originada por los efectos de dispersión de las componentes de la atmosfera, incluidas las nubes y la radiación reflejada es la radiación incidente sobre una superficie, procedente de la radiación reflejada por el suelo [19].

Para obtener la radiación solar del lugar en estudio, se recomienda la búsqueda de datos históricos; en caso de no contar con dichos datos, se deberá utilizar software especializados como por ejemplo Meteonorm, para su generación a partir de una simulación. Si esto no es posible, se pueden emplear métodos matemáticos, los cuales utilizan diferentes parámetros meteorológicos como son: humedad relativa, temperatura, altitud, nubosidad, horas de brillo solar, entre otros. La Tabla 34 muestra algunos de los métodos más utilizados para el cálculo de radiación solar global.

Tabla 34. Métodos para calcular la radiación global diaria a partir del valor de horas de Sol.

MÉTODO	EXPRESIÓN	PARÁMETROS		
Reddy	$H = 0,0418 K \left[\frac{(1+0,8 \frac{n}{N})(1-0,2 \frac{r}{m})}{(0,1 h_r^{0,5})} \right]$	H	Radiación global diaria promedio mensual	
		$K = [(\lambda)N + (\Psi) \cos \phi] * 100$		
		$\lambda = 0,2/(1 + 0,1\phi)$	Factor empírico de latitud.	
		$N = \frac{2}{15} (-\tan \phi \tan \delta)$	Longitud promedio del día durante el mes.	
		ϕ	Latitud del lugar.	
		Ψ	Factor en función de la localización del lugar y del mes.	
		N	Número de horas de sol diarias promedio mensual.	
		M	Número de días en el mes.	
		R	Número de días con lluvia en el mes.	
		h_r	Humedad relativa promedio mensual.	
		$\delta = [0,006918 - 0,399912 \cos \Gamma + 0,070257 \sin \Gamma - 0,006758 \cos 2\Gamma + 0,000907 \sin 2\Gamma - 0,002697 \cos 3\Gamma + 0,00148 \sin 3\Gamma] * \left(\frac{180}{\pi}\right)$		Declinación solar
		$\Gamma = 2\pi \left(\frac{nd - 1}{365}\right)$		Angulo diario
nd		Número de día del año (día juliano).		
Correlación de Angstrom	$H = H_C (a_1 + (1 - a_1)s)$	Hc	Radiación global directa en un día claro.	
		a ₁	Coefficiente empírico, Angstrom recomienda el valor de 0,25.	
		$s = \bar{n}/\bar{N}_d$	Fracción media mensual de horas de sol posibles.	
		\bar{n}	Valor medio mensual de horas de sol diarias.	
		$\bar{N}_d = \frac{1}{n_2 - n_1} \sum_{n=n_1}^{n_2} \left[\frac{2}{15} \cos^{-1}(-\tan \phi \tan \delta) \right]$		Longitud media de los días del mes.
		n ₁ , n ₂	Números de los días julianos de inicio y fin de mes respectivamente.	
		ϕ	Latitud del lugar.	
		δ	Declinación del sol de cada día desde n ₁ hasta n ₂ .	

Tabla 34. (Continuación)

Correlación de Prescott	$\bar{H} = \bar{H}_0 \left(a + b \left(\frac{\bar{n}}{\bar{N}_d} \right) \right)$	\bar{H}	Radiación global promedio diaria.
		\bar{H}_0	La radiación extraterrestre promedio
		a, b	Rietveld propone los valores para a y b de 0,18 y 0,62 respectivamente.
		\bar{n}	Valor medio mensual de horas de sol diarias.
		\bar{N}_d	Longitud media de los días del mes.

Fuente: [19], [20].

b.2) Cálculo de radiación directa (G) y difusa (D) sobre una superficie horizontal

En el aprovechamiento de la luz natural, la radiación directa es un componente indeseada debido a su gran intensidad; y en consecuencia, es responsable del deslumbramiento e incremento considerable de la temperatura en un recinto, provocando discomfort visual y térmico, debido a lo anterior, la radiación difusa es de gran valor para estas aplicaciones por su poca transferencia de temperatura e intensidad regularmente constante. La Tabla 35 expresa la relación de los valores medio mensuales de radiación difusa (D) y radiación directa (G) diaria, la Tabla 36 muestra los métodos para el cálculo de los valores de radiación difusa diaria a partir de la radiación directa diaria y en la tabla 37 se muestran los métodos para calcular los valores de radiación difusa horaria a partir de la radiación directa horaria.

Tabla 35. Relación de los valores medios mensuales de radiación difusa y directa diaria.

MÉTODO	EXPRESIÓN	PARÁMETROS	
Lui y Jordan	$\frac{\bar{D}_d}{\bar{G}_d} = 1,39 - 4,027\bar{K}_d + 5,531\bar{K}_d^2 - 3,108\bar{K}_d^3$	\bar{D}_d	Radiación difusa diaria promedio mensual.
		\bar{G}_d	Radiación directa diaria promedio mensual.
Page	$\frac{\bar{D}_d}{\bar{G}_d} = 1,00 - 1,13\bar{K}_d$	$0,3 \leq \bar{K}_d \leq 0,7$	Índice de fracción de difusa diaria (relación entre la radiación difusa y radiación global promedio).
Iqbal	$\frac{\bar{D}_d}{\bar{G}_d} = 0,958 - 0,982\bar{K}_d$	$0,3 \leq \bar{K}_d \leq 0,6$	Índice de fracción de difusa diaria (relación entre la radiación difusa y radiación global promedio).

Fuente: [18], [19], [20].

Tabla 36. Relación de los valores de radiación difusa diaria a partir de la radiación directa diaria.

MÉTODO	EXPRESIÓN	PARÁMETROS	
Ruth y Chant	$\frac{D_d}{G_d} = \begin{cases} 0,98 & ; K_d \leq 0,1 \\ 0,91 + 1,154K_d - 4,936K_d^2 + 2,848K_d^3 & ; 0,1 \leq K_d \leq 0,7 \end{cases}$	D_d	Radiación difusa diaria.
		G_d	Radiación directa diaria.
Collares-Pereira y Rabl	$\frac{D_d}{G_d} = \begin{cases} 0,99 & ; K_d \leq 0,17 \\ 1,188 - 2,272K_d + 9,473K_d^2 - 21,85K_d^3 + 14,648K_d^4 & ; 0,17 \leq K_d \leq 0,8 \end{cases}$	K_d	Índice de fracción de difusa diaria (relación entre la radiación difusa y radiación global).

Fuente: [18], [19], [20].

Tabla 37. Relación de los valores de radiación difusa horaria a partir de la radiación directa horaria.

MÉTODO	EXPRESIÓN	PARÁMETROS	
Correlación de Orgill y Hollands	$\frac{D_h}{G_h} = \begin{cases} 1,0 - 0,249K_h & ; 0 \leq K_h \leq 0,35 \\ 1,577 - 1,84K_h & ; 0,35 \leq K_h \leq 0,75 \\ 0,177 & ; K_h > 0,75 \end{cases}$	D_h	Radiación difusa horaria.
Correlación de Erbs et al.	$\frac{D_h}{G_h} = \begin{cases} 1,0 - 0,09K_h & ; 0 \leq K_h \leq 0,22 \\ 0,9511 - 0,160K_h + 4,388K_h^3 - 16,638K_h^3 + 12,336K_h^4 & ; 0,22 \leq K_h \leq 0,80 \\ 0,165 & ; K_h > 0,80 \end{cases}$	G_h	Radiación directa horaria.
		K_h	Índice de fracción de difusa horaria (relación entre la radiación difusa y radiación global).

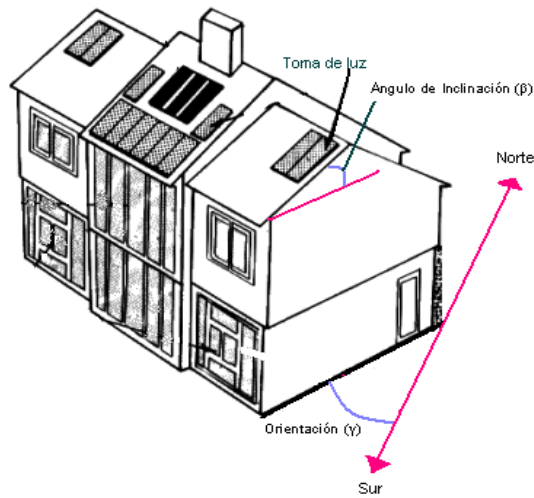
Nota: Los parámetros de esta expresión fueron calculados con datos tomados en Toronto Canadá.

Fuente: [18], [19], [20].

b.3) Identificación de superficies de captación de luz

Para el aprovechamiento de la iluminación natural, es de gran importancia la identificación de las superficies de toma de luz, ya que no todas las tecnologías para el aprovechamiento de la luz natural utilizan superficies de captación vertical. La Figura 13 muestra un ejemplo de una edificación, indicando el ángulo de inclinación (β) y la orientación (γ) de las superficies de toma de luz.

Figura 13. Ejemplo de una edificación con una toma de luz natural inclinada.



Fuente: Autores.

El ángulo de orientación (γ) es el ángulo medido entre el sur y la proyección sobre el plano horizontal del elemento de captación de luz, positivo en la dirección suroeste y negativo en dirección sureste. El ángulo de inclinación (β) es el ángulo medido entre el plano horizontal y la superficie de captación de luz, como se ilustra en la Figura 8.

b.4) Cuantificación de la radiación global ($H_{\beta\gamma}$) sobre una superficie inclinada

Los cálculos de radiación sobre superficies inclinadas están basados en los datos obtenidos sobre las superficies horizontales, adicionando algunos parámetros como el ángulo de inclinación, orientación y albedo, entre otros; además de la componente de radiación reflejada, como lo muestra la Tabla 38.

Tabla 38. Expresiones para calcular la radiación reflejada sobre superficies inclinadas.

	EXPRESIÓN	PARÁMETROS	
A partir de datos de radiación global diaria	$R_{\beta\gamma}^d = H_o^d \rho \frac{1-\cos\beta}{2}$	$R_{\beta\gamma}^d$	Radiación reflejada diaria sobre una superficie inclinada.
		H_o^d	Radiación global diaria fuera de la atmosfera.
		ρ	Albedo.
		β	Elevación de la superficie.

Tabla 38. (Continuación)

A partir de datos de radiación global horaria	$R_{\beta\gamma}^h = H_o^h \rho \frac{1-\cos\beta}{2}$	$R_{\beta\gamma}^h$	Radiación reflejada diaria sobre una superficie inclinada.
		H_o^h	Radiación global horaria fuera de la atmosfera.
		ρ	Albedo.
		β	Elevación de la superficie.

Fuente: [19], [20].

La radiación directa en un plano inclinado está dada por la radiación global horizontal multiplicada por un factor geométrico R_b , dado por:

$$R_b = \frac{\cos\theta_{\beta\gamma}}{\cos\theta_0}$$

Donde:

$$\cos\theta_{\beta\gamma} = \cos\theta_0 \cos\beta + \sin\theta_0 \sin\beta \cos(\gamma_s - \gamma)$$

Siendo β la inclinación de la superficie, γ la orientación, γ_s la altura solar y θ_0 es el ángulo cenital formado por la dirección de la radiación directa y la vertical del lugar. Por tanto, la radiación directa sobre una superficie inclinada está dada por:

$$G_{\beta\gamma}^{d,h} = H_o^{d,h} * R_b = H_o^{d,h} * \frac{\cos\theta_{\beta\gamma}}{\cos\theta_0}$$

La expresión anterior puede ser utilizada para calcular la radiación directa diaria u horaria sobre una superficie inclinada.

La radiación difusa sobre una superficie inclinada está dada en función de la radiación fuera de la atmosfera. La Tabla 39 muestra las expresiones para el cálculo de la radiación difusa sobre una superficie inclinada.

Tabla 39. Métodos para el cálculo de la radiación difusa sobre una superficie inclinada.

MÉTODO	EXPRESIÓN	PARÁMETROS
Isotrópico de Liu & Jordán	$D_{\beta\gamma} = \frac{1-\cos\beta}{2} D_0$	D_0 la componente difusa de radiación fuera de la atmosfera

Tabla 39. (Continuación)

Anisotrópico de Hay & Davies	$D_{\beta\gamma} = \left[\left(1 - \frac{B_0}{I_0}\right) \left(\frac{1+\cos\beta}{2}\right) + \frac{B_0 \cos\theta_{\beta\gamma}}{I_0 \cos\theta_0} \right] D_0$	B ₀ , I ₀ y D ₀ son la componentes directa, reflejada y difusa respectivamente de radiación fuera de la atmosfera
Anisotrópico de Reindl, Beckman & Duffie	$D_{\beta\gamma} = \left[\left(1 - \frac{B_0}{I_0}\right) \left(\frac{1+\cos\beta}{2}\right) \left(1 + \sqrt{\frac{B_0}{G_0}} \left(\sin\frac{\beta}{2}\right)^3\right) + \frac{B_0 \cos\theta_{\beta\gamma}}{I_0 \cos\theta_0} \right] D_0$	G ₀ radiación global fuera de la atmosfera

Fuente: [19].

La radiación global sobre una superficie inclinada está dada por:

$$H_{\beta\gamma} = R_{\beta\gamma} + G_{\beta\gamma} + D_{\beta\gamma}$$

4.1.3 Determinación de la curva de FIN.

El *Factor de Iluminación Natural (FIN)* es una expresión de eficiencia de la fracción de luz exterior que es ingresada sobre la superficie de trabajo interior. Está expresado como la relación entre el nivel de iluminación exterior sobre el nivel de iluminación interior [8], como se muestra a continuación:

$$FIN = \frac{E_i}{E_e} * 100$$

Donde E_i=Nivel de iluminación interior, E_e=Nivel de iluminación exterior.

Permite calcular el nivel de iluminación en cada momento sobre cualquier punto del interior del recinto como un porcentaje del nivel de iluminación exterior. Con los datos obtenidos en los numerales 4.1.1 y 4.1.2, la relación se puede graficar en función de la profundidad del local. La Tabla 40 muestra un formato recomendado para tabular los datos obtenidos para luego proceder a dibujar la curva FIN. Las mediciones de nivel de iluminación sobre la superficie de trabajo se realizan partiendo desde el costado más iluminado en el recinto por la toma de luz.

Tabla 40. Formato recomendado para la tabulación de los datos para dibujar FIN.

Tecnología en estudio:				
Nivel de iluminación exterior, E_e (lux):	Hora:		Fecha:	
	ANCHO (m)			
PROFUNDIDAD (M)	0,25	0,5	...	5
0,25				
0,50				
0,75				
⋮				
5,0				

Fuente: Autores.

En la Tabla 41 se muestran los valores recomendados para el factor de iluminación natural según el nivel de exigencia visual [8].

Tabla 41. Valores de FIN adecuados.

Exigencia visual	Luminosidad del espacio	FIN	E_i mínimo con $E_e \approx 10000$ Lx	E_i máximo con $E_e = 100.000$ Lx
Muy alta	Muy luminoso	>10%	>1000 lux	>10000 lux
Alta	Luminoso	6%	600 lux	6000 lux
Normal	Normal	3%	300 lux	3000 lux
Baja	Oscuro	1%	100 lux	1000 lux
Muy baja	Muy oscuro	< 0,3%	< 30 lux	<300 lux

Fuente [8]

Se recomienda, además del cálculo del FIN, el análisis de los índices de uniformidad con el objetivo de calcular el contraste entre los niveles de iluminación al interior del local. La Tabla 42 indica los niveles mínimos y máximos recomendados.

Tabla 42. Relación de uniformidad de iluminación en un local.

FACTOR DE RELACIÓN	DESCRIPCIÓN
FIN_{min}/FIN_{medio}	Es un índice de falta de iluminación en la zona más oscura. Se deben evitar valores inferiores a 1/3.
FIN_{max}/FIN_{medio}	Es un índice de exceso de brillo en la zona próxima a la toma de luz. De deben evitar valores superiores a 3.
FIN_{max}/FIN_{min}	Indica la relación de contraste total del local. Valores elevados podrían generar deslumbramiento, recomendable valores inferiores a 10.

Fuente: [8].

4.1.4 Cálculo del nivel de iluminación (NI) sobre la superficie de trabajo.

En esta matriz se registra el nivel de iluminación al interior del local, en lux y en porcentaje de la iluminación exterior. Se realiza tomando datos de iluminación el día 21 de cada mes, con el fin de registrar los datos en las fechas donde se presentan las distancias críticas Tierra-Sol (solsticio de verano el 21 de junio, solsticio de invierno el 21 de diciembre; Equinoccio 21 de marzo y 22 de septiembre) [19]. Con esta matriz se tiene la información del nivel de iluminación durante el año, permitiendo identificar la prestación de iluminación de las tecnologías de iluminación natural implementadas. En la Tabla 43 se presenta el formato para esta matriz NI.

Tabla 43. Formato para la matriz de NI con los valores en lux y en porcentaje con respecto al nivel de luz exterior.

Profundidad (m)	0,25	0,5	0,75	1	1,25	...	4,75	5
Fecha:	Ancho:							
21/Enero	[Lux]	[Lux]	[Lux]	[Lux]	[Lux]		[Lux]	[Lux]
	% (FIN)	% (FIN)	% (FIN)	% (FIN)	% (FIN)		% (FIN)	% (FIN)
21/Febrero								
⋮	⋮							
21/Noviembre								
21/Diciembre								

Fuente: Autores.

4.1.5 *Evaluar el ahorro energético generado por la tecnología de iluminación natural sobre los niveles de iluminación reglamentados para el sitio.*

Se realiza con el fin de identificar el aporte de iluminación natural sobre la superficie de trabajo, traduciéndose esto directamente en ahorro de energía eléctrica; el aporte se calcula mediante la relación de nivel de iluminación natural presente en la superficie de trabajo y el nivel de iluminación mínimo exigido para cada tarea, en el caso de Colombia los niveles de iluminación exigidos están reglamentados por el RETILAP.

$$Aporte = \frac{\text{Iluminación natural}}{\text{Nivel mínimo exigido}} * 100$$

La Tabla 44 muestra un formato que permite registrar el porcentaje de ahorro de energía producto del aprovechamiento de la luz natural, para identificar el porcentaje mínimo de iluminación artificial necesario para cumplir los requerimientos.

Tabla 44. Formato para registrar el porcentaje de aporte de luz natural.

Nivel mínimo exigido: [lux]								
Fecha	Profundidad (m)							
	0,25	0,5	0,75	1	1,25	...	4,75	5
21/enero	[Lux]	[Lux]	[Lux]	[Lux]	[Lux]		[Lux]	[Lux]
	% aporte	% aporte	% aporte	% aporte	% aporte		% aporte	% aporte
21/febrero								
⋮	⋮							
21/octubre								
21/noviembre								
21/diciembre								

Fuente: Autores.

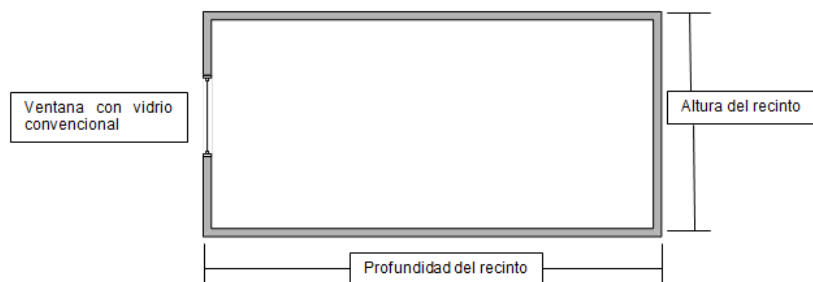
4.1.6 *Evaluar el cambio o complemento de tecnologías de iluminación natural a partir de las curvas FIN, con el fin de lograr un mayor ahorro de energía eléctrica.*

De acuerdo con los resultados obtenidos en las curvas FIN para el sitio en estudio, se determina si la tecnología de iluminación natural existente permite obtener niveles de iluminación significativos en la superficie de trabajo que contribuya a un ahorro de energía eléctrica importante; en caso de que la tecnología de iluminación natural existente no aporte niveles de iluminación considerables, se evalúa la necesidad del cambio de tecnología de iluminación natural o complementar la tecnología existente con la instalación de otra tecnología de iluminación natural, con el fin de lograr un ahorro sustancial de energía eléctrica.

Varias de las tecnologías de iluminación natural no cuentan con estudios tan técnicos; sin embargo, se conoce información sobre algunas tecnologías donde muestran gráficas del factor de iluminación natural. Es importante aclarar que los estudios publicados sobre el comportamiento lumínico se han realizado en su mayoría en lugares del hemisferio norte. A pesar de ello se considera que tal aspecto influye mayormente en el nivel de iluminación exterior y en menor grado afecta la curva FIN.

Las Tablas 45 a 50 presentan la comparación entre las curvas FIN de las tecnologías mostradas en [10] y una sala de referencia mostrada en la Figura 14.

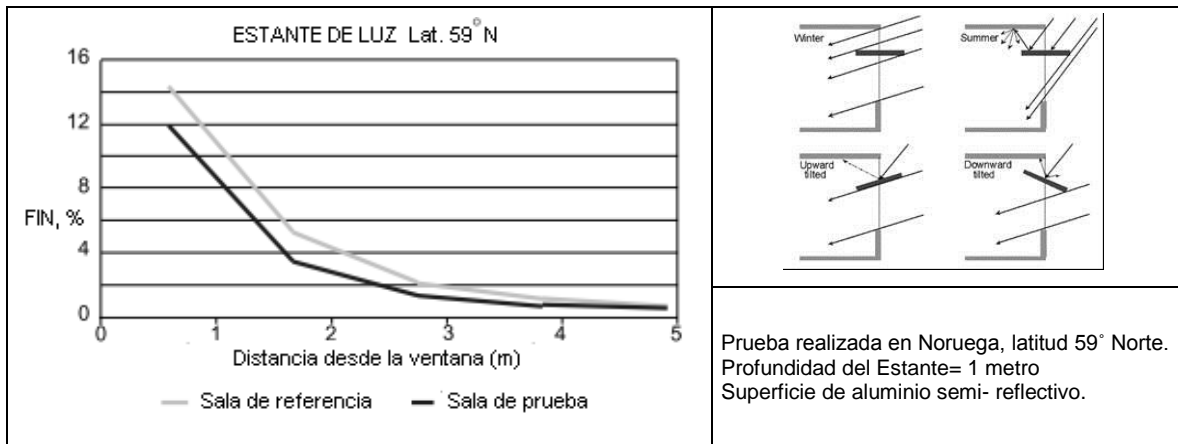
Figura 14. Sala de referencia.



Fuente: Autores.

En la Tabla 45 se muestra la similitud de la grafica FIN para una sala con ventanales comunes (sala de referencia) frente a una sala donde se implementó la tecnología de estantes de luz (sala de prueba). Se aprecia la disminución del nivel de iluminación en la proximidad de la ventana.

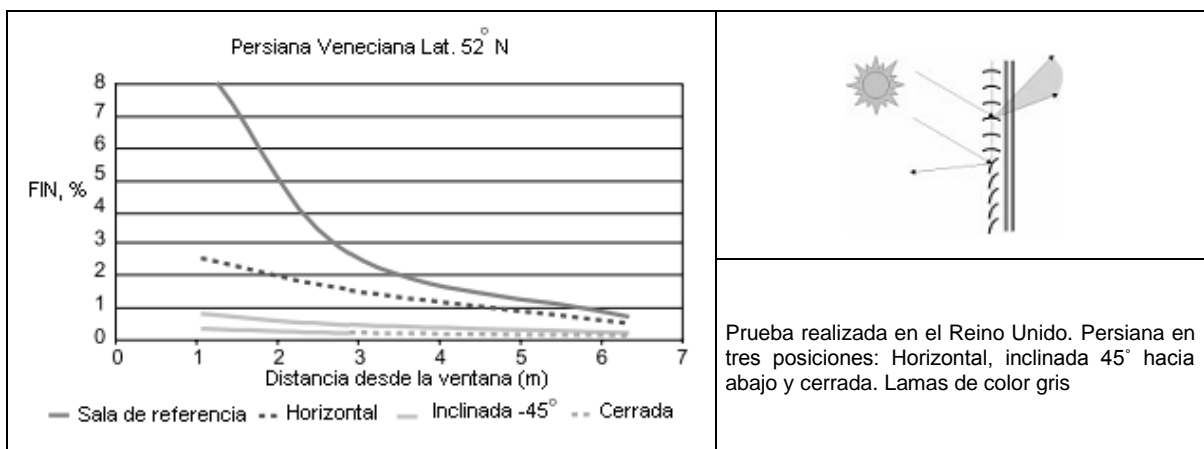
Tabla 45. Factor de iluminación estante de luz.



Fuente: [10].

La Tabla 46 muestra el comportamiento de las gráficas del FIN para un sistema de persianas con tres ángulos de inclinación frente a una sala de referencia con un sistema de ventanas común.

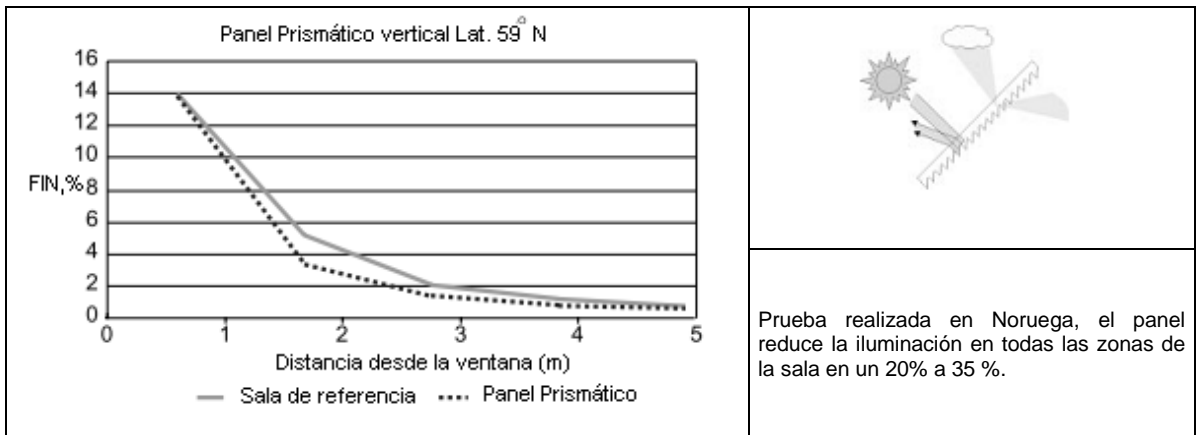
Tabla 46. Factor de iluminación cortinas y sistemas de persianas.



Fuente: [10].

En la Tabla 47 se muestra el comportamiento de la curva FIN para una sala donde se implementó un panel prismático vertical frente a una sala convencional. Se puede apreciar una leve disminución del nivel de iluminación con respecto a la sala de referencia.

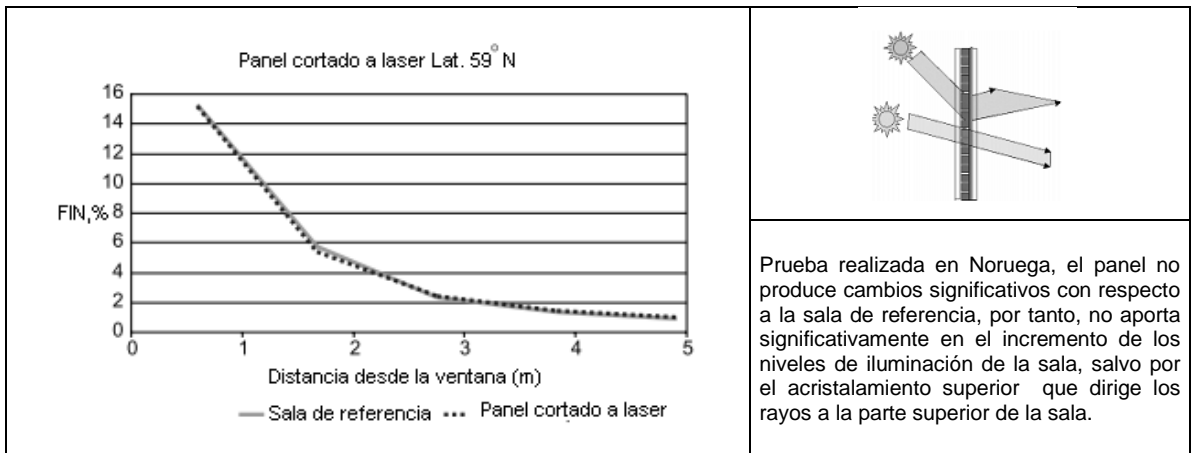
Tabla 47. Factor de iluminación paneles prismáticos.



Fuente: [10].

La Tabla 48 muestra la grafica FIN para una sala donde se implementó un panel cortado a laser en su ventana junto con la curva obtenida mediante la implementación de un cristal convencional.

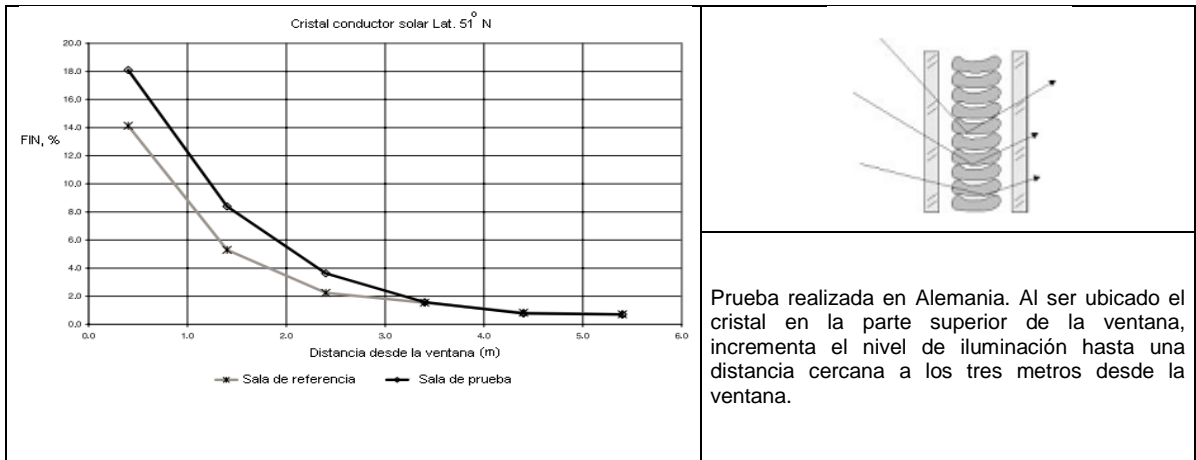
Tabla 48. Factor de iluminación panel cortados a laser.



Fuente: [10].

En la Tabla 49 se muestra la similitud de las curvas FIN para una sala con un acristalamiento convencional frente a la misma sala con un cristal conductor solar instalado en la parte superior del ventanal.

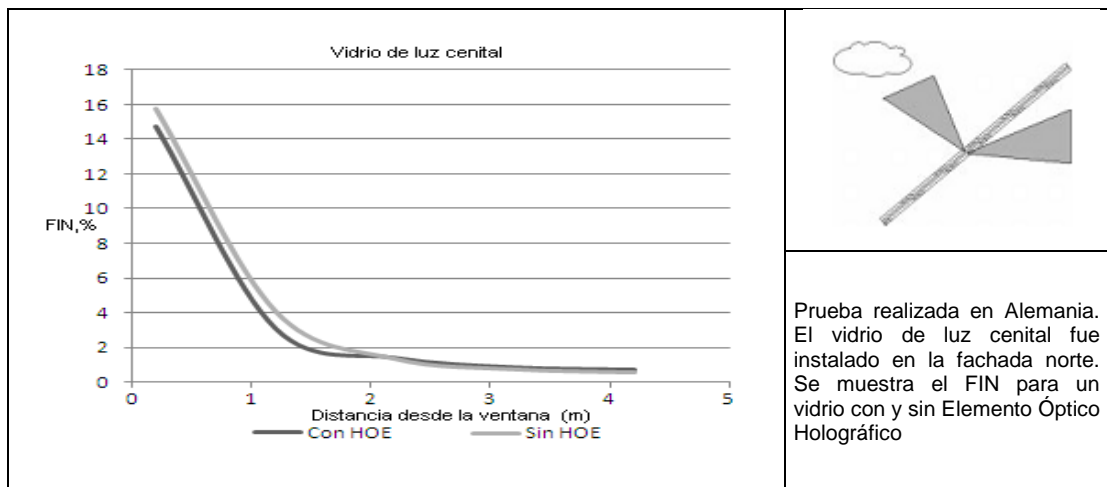
Tabla 49. Factor de iluminación cristal conductor solar.



Fuente: [10].

La Tabla 50 muestra las curvas FIN para una sala con un cristal de luz cenital con elemento óptico holográfico junto con la obtenida en una sala con cristal de luz cenital convencional.

Tabla 50. Factor de iluminación vidrio de luz cenital con elemento óptico holográfico.



Fuente: [10].

4.2 CASO B: CONSTRUCCIÓN EN FASE DE DISEÑO

El procedimiento a seguir es similar al presentado para edificaciones existentes, se diferencia básicamente en la cuantificación del nivel de iluminación en el interior del recinto, ya que para este caso sólo es posible determinarla a partir de la utilización de herramientas computacionales o mediante la utilización de curvas de Factor de Iluminación Natural, si se encuentran disponibles, para la tecnología en estudio.

4.2.1 Cálculo del nivel de iluminación natural a partir de las curvas FIN

Algunas de las tecnologías de iluminación natural cuentan con la curva del factor de iluminación natural que, tal como se mencionó anteriormente, proporciona el porcentaje de iluminación al interior del recinto en función de la iluminación exterior. Sin embargo, esta información no se encuentra disponible para todas las tecnologías.

4.2.2 Cálculo del nivel de iluminación a partir de la utilización de software

Actualmente, existen programas que facilitan el diseño de sistemas de iluminación, tanto en interiores como en exteriores. La Tabla 51 presenta algunas de estas herramientas.

Tabla 51. Programas para el diseño de sistemas de iluminación natural.

NOMBRE DEL SOFTWARE	PROCEDENCIA	PRECIO USD	APLICACIONES	CARACTERÍSTICAS
VELUX Daylight Visualizer	VELUX	Gratis	Interior	Herramienta para el diseño y análisis de iluminación natural al interior antes de la construcción de la edificación.
DesingBuilder	Sol-arq	2 399	Interior	Herramienta para evaluar y optimizar el aprovechamiento de la luz natural en los edificios
BIOSOL	INSTITUTO DE INGENIERIA UNAM	Versión prueba	Interior y exterior	Herramienta para el estudio del bioclima, geometría solar, control solar, radiación solar e iluminación natural.
DiaLux	DIAL GmbH Alemania	0	Interior, exterior, espacios abiertos y evaluación energética	Diseño 3D, catálogos de luminarias, acabados, muebles, entre otros. Archivos CAD, fotometrías electrónicas, estudio de iluminación natural interior.

Tabla 51. (Continuación).

DAYSIM	Desing Iterate Evaluate Adapt	Gratis	Interior	Análisis de la iluminación natural anual en edificios, basado en trazador de rayos solares
Solarspot	ECOPOWER	Gratis	Interior	Indica el número de dispositivos solarspot que se deben instalar en una edificación para el máximo aprovechamiento de la iluminación natural.

Fuente: Autores.

Algunos programas para el diseño de sistemas de iluminación artificial se muestran en la Tabla 52.

Tabla 52. Programas para el diseño de sistemas de iluminación artificial.

NOMBRE DEL SOFTWARE	PROCEDENCIA	PRECIO USD	APLICACIONES	CARACTERÍSTICAS
DiaLux	DIAL GmbH Alemania	0	Interior, exterior, espacios abiertos y evaluación energética	Diseño 3D, catálogos de luminarias, acabados, muebles, entre otros. Archivos CAD, fometrías electrónicas.
ReluxPro	Relux Informatik AG. Suiza	0	Interior, exterior, espacios abiertos y luz día.	Diseño 3D, Archivos CAD, fometrías electrónicas. Cuenta con venta de módulos complementarios.
Visual Lighting	Lithonia lighting Group	150	Interior, exterior, espacios abiertos.	Diseño 3D, Archivos CAD, fometrías electrónicas. Cuenta con una limitada versión gratuita.
Luxicon	Cooper Crouse Hinds	200	Interior, exterior, espacios abiertos y luz día.	Diseño 3D, fometrías electrónicas, resultados 3D
Agi32	Ligthing analisist E.U	895	Interior, exterior, espacios abiertos y luz día.	Diseño 3D, cataloga de objetos para diseño, archivos CAD, fometrías electrónicas
AutoLux	Independent Testing laboratories. E.U	979	Exterior, espacios abiertos	Diseño 3D, Archivos CAD, fometrías electrónicas.
Listestar 4D	OxyTech Italia	2 085	Interior, exterior, espacios abiertos	Diseño 3D, Archivos CAD, fometrías electrónicas. Cuenta con una versión gratuita.
Inspirer lighting desing	Integra, Japón	4 000	Interior, exterior, espacios abiertos y luz día.	Diseño 3D, Archivos CAD, fometrías electrónicas IES
LumenLux	Lumenac	ND	Interior, exterior	Incluye información de productos a modo de catálogo electrónico con posibilidad de impresión de la ficha técnica del mismo
CalcuLux	Philips	ND	Interior	Incluye el catálogo de la línea Philips en pdf con sus respectivas características. Saca las curvas de temperatura de los locales según el tipo e intensidad de luminaria

Fuente: [21].

Cabe resaltar que existen más programas con prestaciones similares, pertenecientes a las marcas fabricantes o comercializadoras de lámparas o luminarias.

4.3 EJEMPLO ILUSTRATIVO DEL PROCEDIMIENTO PARA EVALUAR EL DESEMPEÑO LUMÍNICO DE TECNOLOGÍAS DE ILUMINACIÓN NATURAL EN INTERIORES PARA LA OPTIMIZACIÓN DE LOS RECURSOS ENERGÉTICOS.

➤ Definición y caracterización de la superficie de trabajo

El lugar seleccionado para este ejemplo ilustrativo corresponde al aula de clase LP 214 del edificio de laboratorios pesados de la Universidad Industrial de Santander. El aula está descrita con las características espaciales mostradas en la Tabla 53.

Tabla 53. Descripción del área de trabajo en estudio

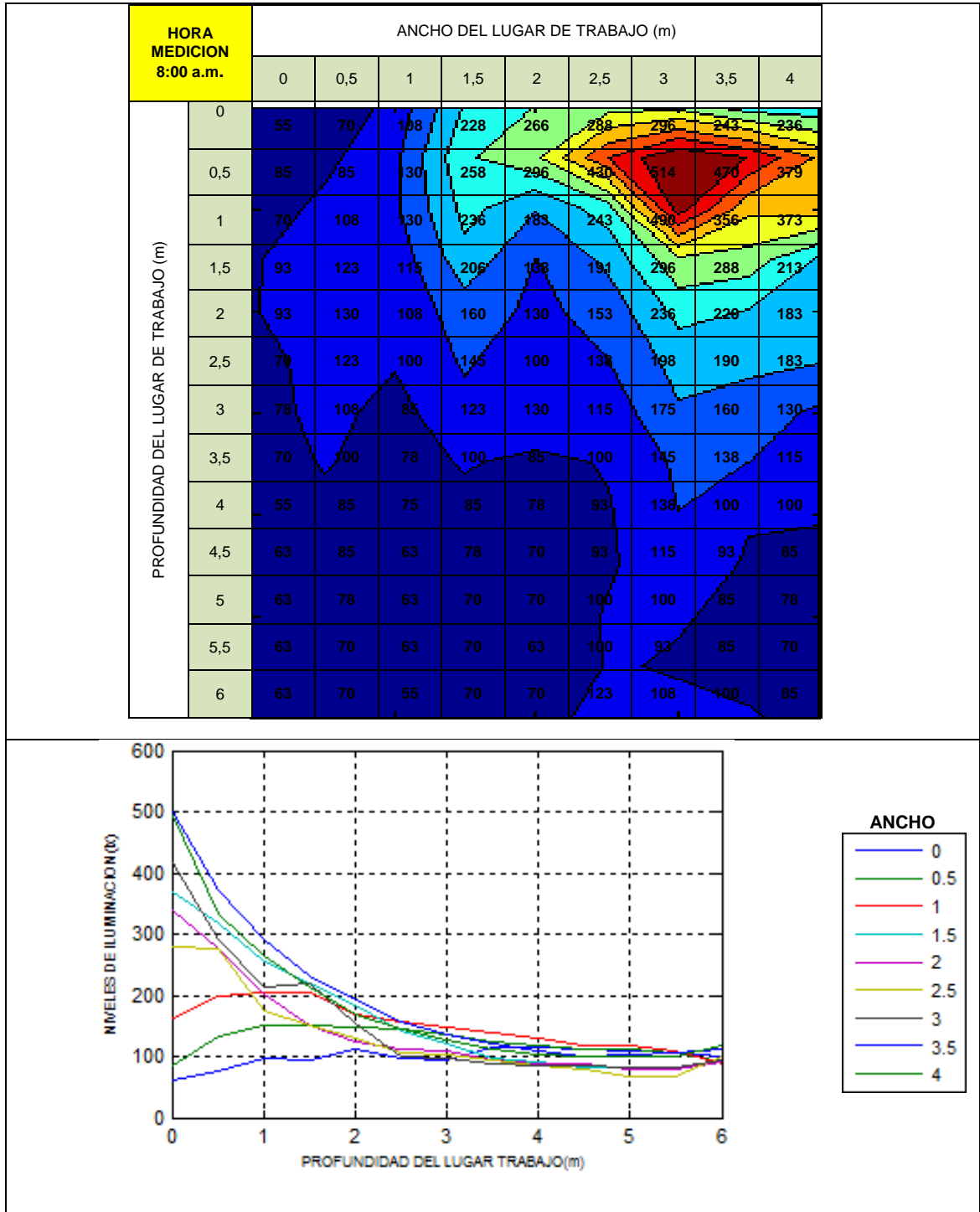
LUGAR	VALOR	UNIDAD
Profundidad sitio	6	Metros
Ancho sitio	4	Metros
Altura sitio	2,3	Metros
Profundidad sitio de trabajo	6	Metros
Ancho sitio de trabajo	4	Metros
Altura sitio de trabajo	0,8	Metros
OBJETO	DESCRIPCION	
1	Ventana	
2	Puertas de salida-entrada al lugar de trabajo	
3	Tablero en acrílico	
4	Pupitres o escritorios personales	
5	Escritorio	

Fuente: Autores.

Luego de realizar la descripción del lugar en estudio, se procede a realizar las mediciones del nivel de iluminación natural mediante el uso de un luxómetro, considerando solo iluminación natural sobre la superficie de trabajo, correspondiente a los escritorios individuales a una altura de 0,8 m sobre el nivel del suelo, se toman mediciones a partir de las 8:00 a.m. hasta las 5:00 p.m., con intervalos de una hora. Dada la cantidad de datos se muestra los obtenidos a las 8:00 a.m., 12:00 m y 4:00 p.m.

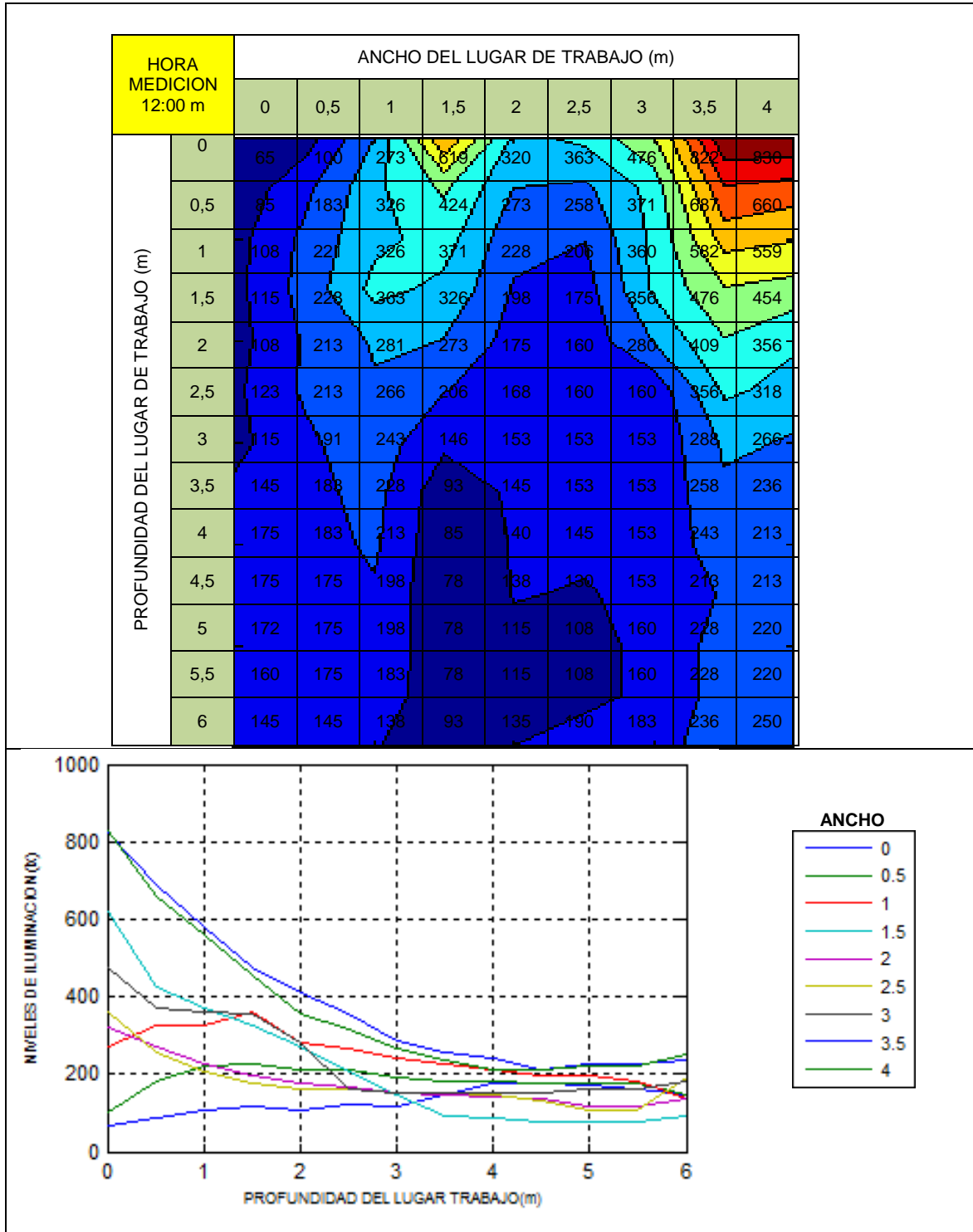
Mediante el uso de la herramienta computacional de MATLAB, se grafican los niveles de iluminación para las diferentes horas del día. En la Tabla 54 se muestran los niveles de iluminación obtenidos en las mediciones junto con las gráficas de nivel de iluminación en función de la profundidad del recinto para cada ancho.

Tabla 54. Niveles de iluminación sobre el plano de trabajo.



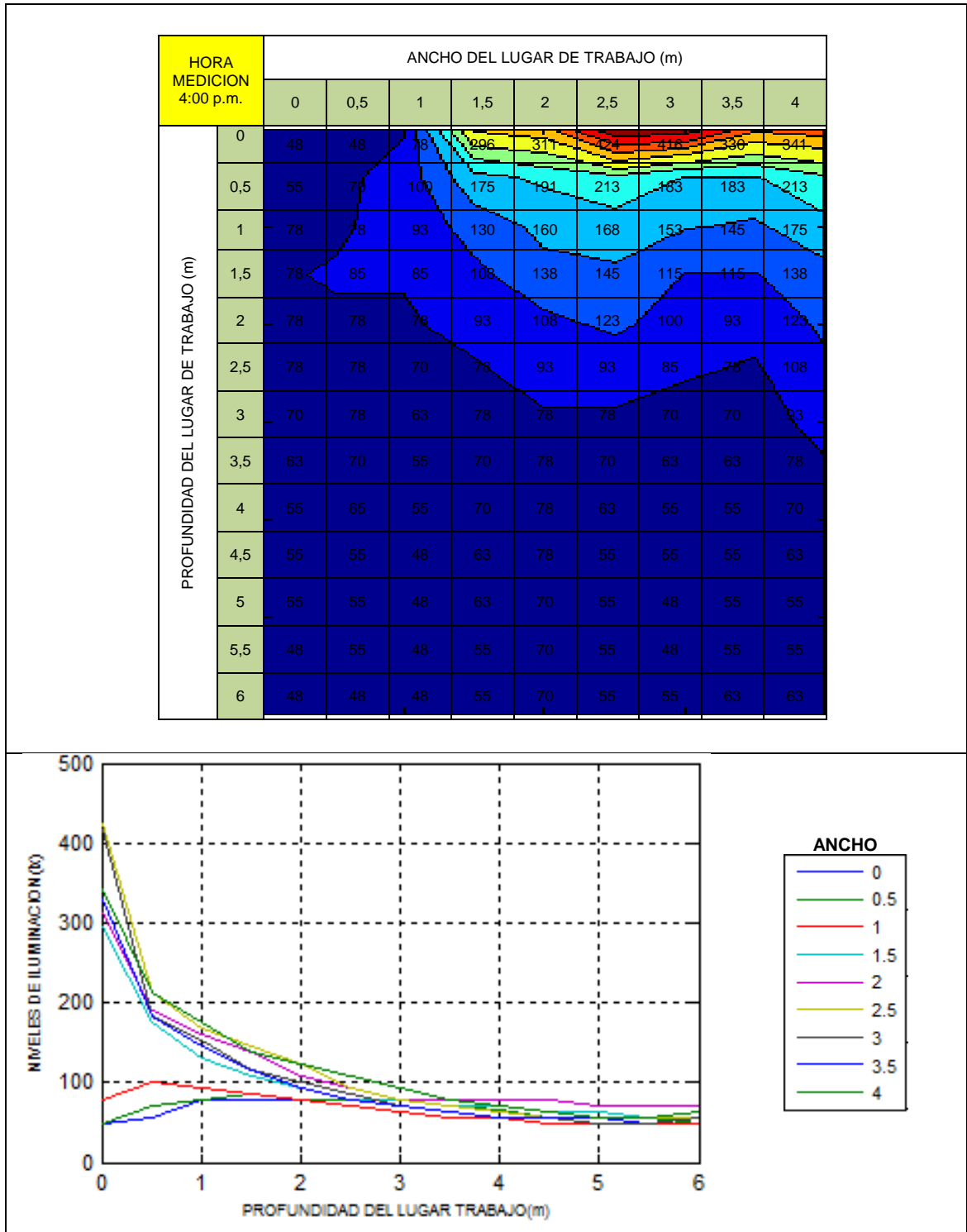
Fuente: Autores.

Tabla 54. (Continuación)



Fuente: Autores.

Tabla 54. (Continuación)



Fuente: Autores.

Simultáneamente, para cada hora se mide el nivel de iluminación exterior (evitando la radiación solar directa), para el caso en estudio se obtienen los datos mostrados en la Tabla 55.

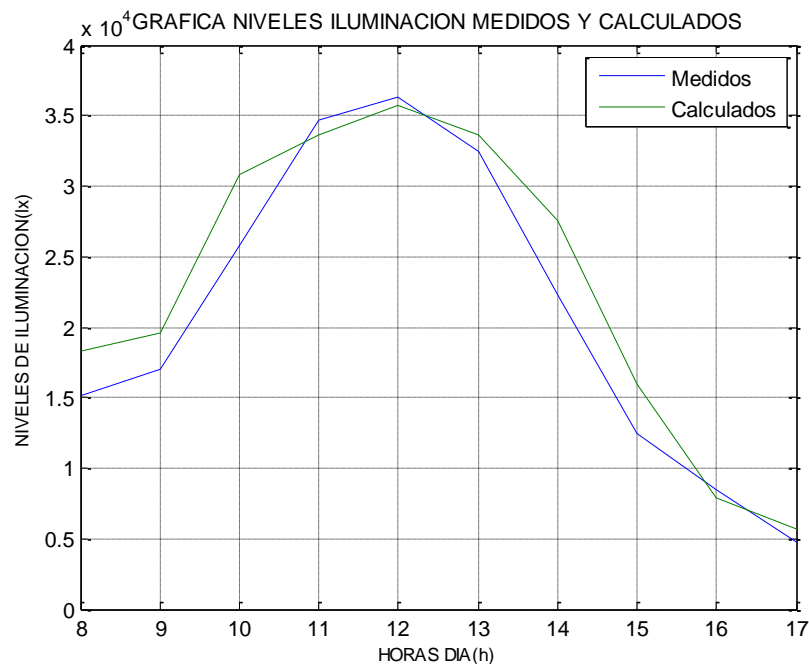
Tabla 55. Niveles de exterior medidos y calculados

ILUMINACIÓN EXTERIOR (LUX)		MEDIDA	CALCULADA	
Horas día	AM	8	15 200	18 331
		9	17 000	19 553
		10	25 789	30 780
		11	34 652	33 674
		12	36 358	35 685
	PM	1	32 459	33 678
		2	22 234	27 564
		3	12 405	15 980
		4	8 472	7 865
		5	4 763	5 679

Fuente: Autores.

El comportamiento de la iluminación exterior en función de las horas del día se muestra gráficamente en la Figura 15.

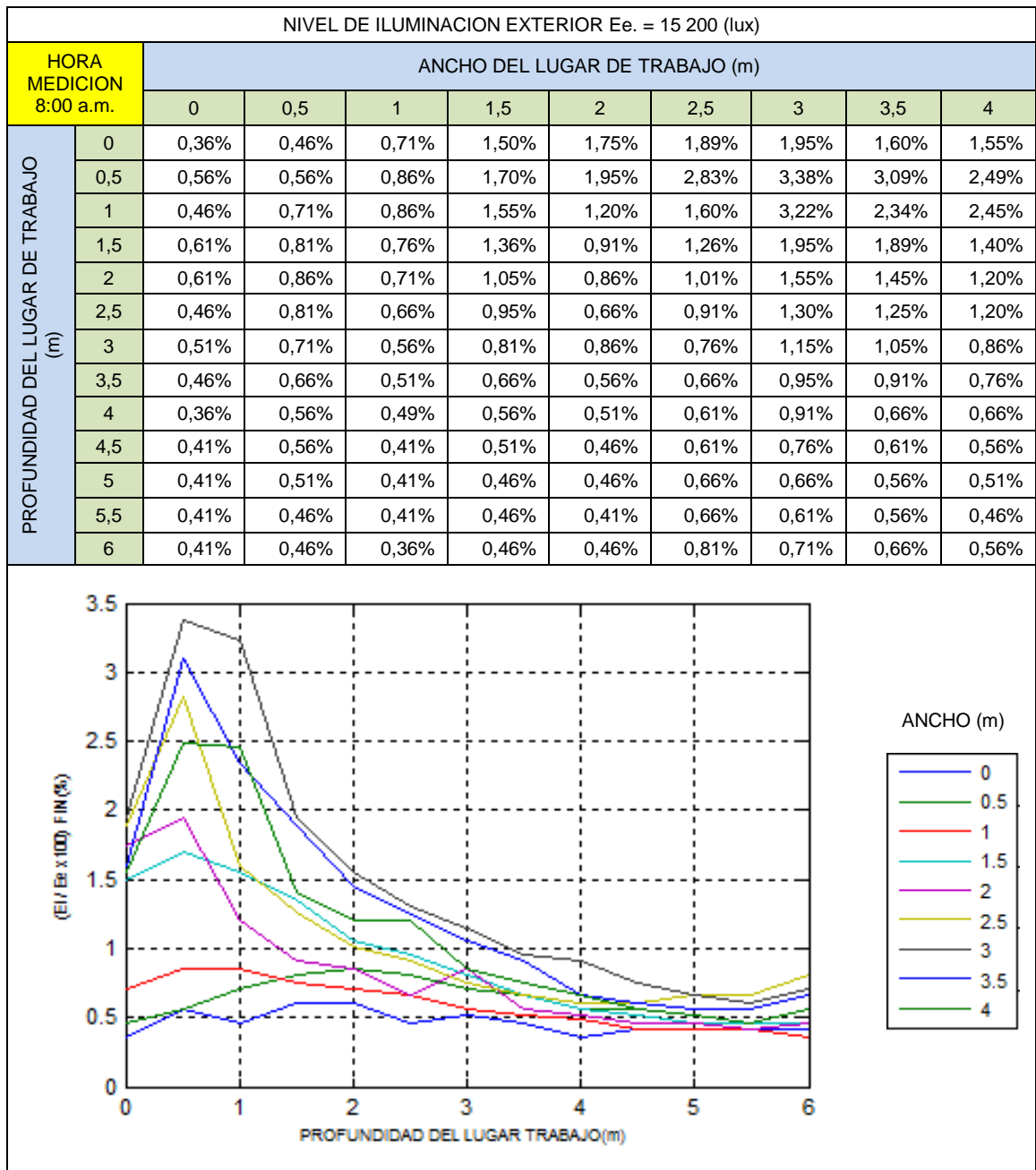
Figura 15. Niveles de iluminación exterior Ee.



Fuente: Autores.

Seguidamente se procede a mostrar las graficas del Nivel de Iluminación Natural correspondiente a la relación E_i/E_e con respecto a la profundidad. La Tabla 56 muestra el FIN en obtenido para las 8 a.m., 12 m y 4 p.m.

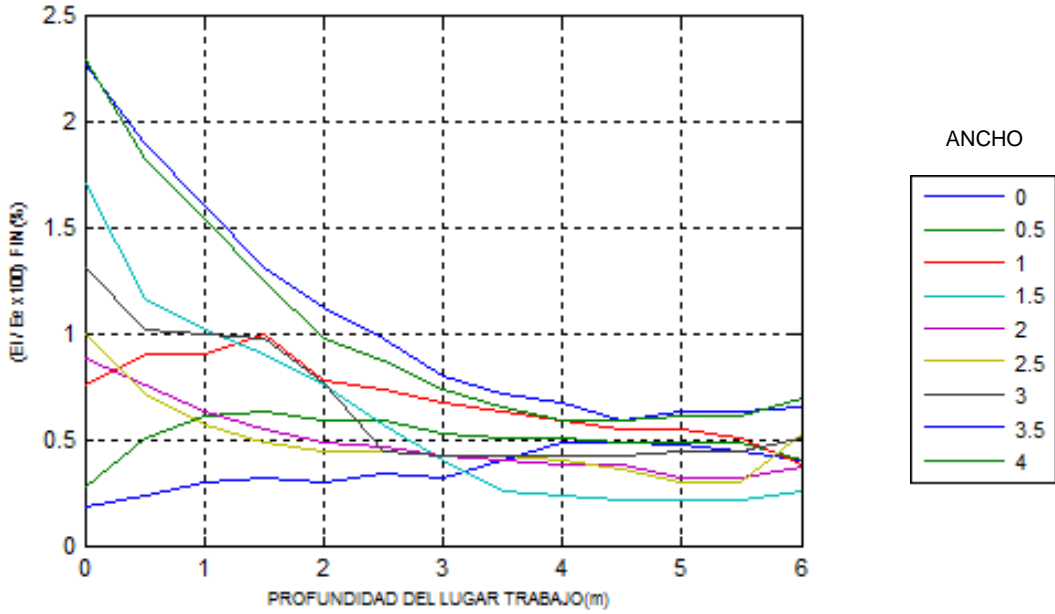
Tabla 56. Graficas del factor de iluminación Natural (FIN) E_i/E_e .



Fuente: Autores.

Tabla 56. (Continuación)

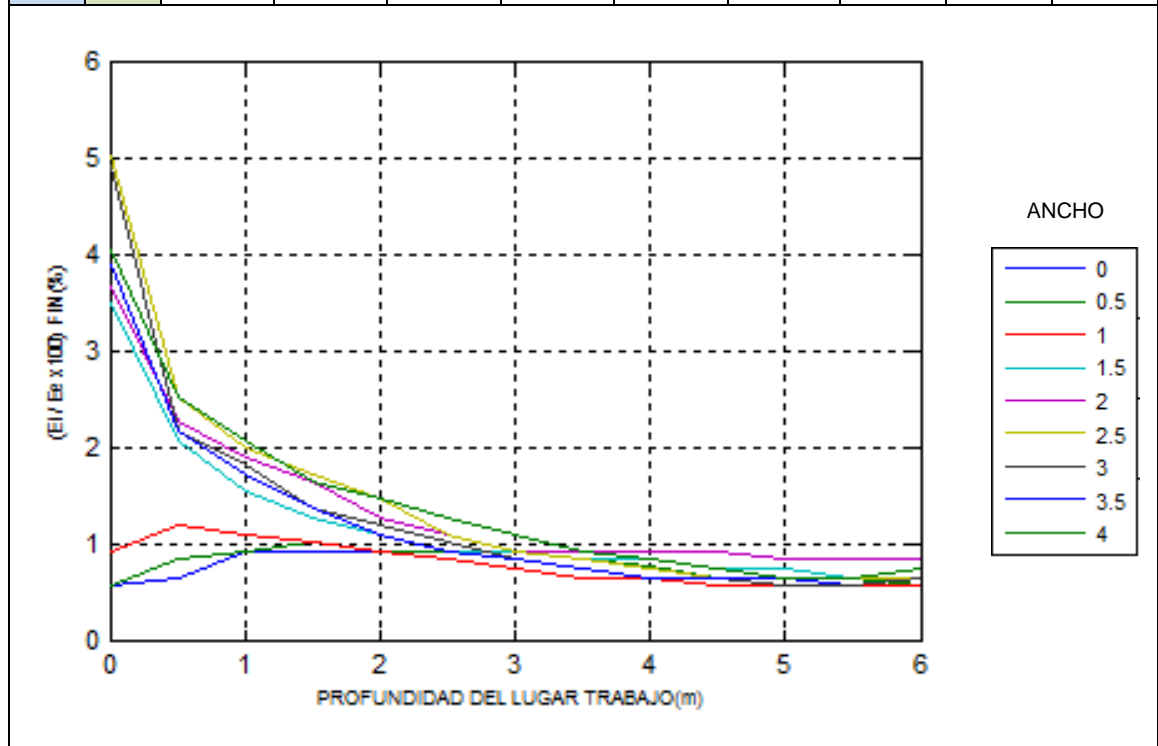
NIVEL DE ILUMINACION EXTERIOR $E_e = 36\ 358$ (lux)										
HORA MEDICION 12:00 m.	ANCHO DEL LUGAR DE TRABAJO (m)									
	0	0,5	1	1,5	2	2,5	3	3,5	4	
PROFUNDIDAD DEL LUGAR DE TRABAJO (m)	0	0,18%	0,28%	0,75%	1,70%	0,88%	1,00%	1,31%	2,26%	2,28%
	0,5	0,23%	0,50%	0,90%	1,17%	0,75%	0,71%	1,02%	1,89%	1,82%
	1	0,30%	0,61%	0,90%	1,02%	0,63%	0,57%	0,99%	1,60%	1,54%
	1,5	0,32%	0,63%	1,00%	0,90%	0,54%	0,48%	0,98%	1,31%	1,25%
	2	0,30%	0,59%	0,77%	0,75%	0,48%	0,44%	0,77%	1,12%	0,98%
	2,5	0,34%	0,59%	0,73%	0,57%	0,46%	0,44%	0,44%	0,98%	0,87%
	3	0,32%	0,53%	0,67%	0,40%	0,42%	0,42%	0,42%	0,79%	0,73%
	3,5	0,40%	0,50%	0,63%	0,26%	0,40%	0,42%	0,42%	0,71%	0,65%
	4	0,48%	0,50%	0,59%	0,23%	0,39%	0,40%	0,42%	0,67%	0,59%
	4,5	0,48%	0,48%	0,54%	0,21%	0,38%	0,36%	0,42%	0,59%	0,59%
	5	0,47%	0,48%	0,54%	0,21%	0,32%	0,30%	0,44%	0,63%	0,61%
	5,5	0,44%	0,48%	0,50%	0,21%	0,32%	0,30%	0,44%	0,63%	0,61%
	6	0,40%	0,40%	0,38%	0,26%	0,37%	0,52%	0,50%	0,65%	0,69%



Fuente: Autores.

Tabla 56. (Continuación)

NIVEL DE ILUMINACION EXTERIOR $E_e = 8\ 472$ (lux)										
HORA MEDICION 4:00 p.m.	ANCHO DEL LUGAR DE TRABAJO (m)									
	0	0,5	1	1,5	2	2,5	3	3,5	4	
PROFUNDIDAD DEL LUGAR DE TRABAJO (m)	0	0,57%	0,57%	0,92%	3,49%	3,67%	5,00%	4,91%	3,90%	4,03%
	0,5	0,65%	0,83%	1,18%	2,07%	2,25%	2,51%	2,16%	2,16%	2,51%
	1	0,92%	0,92%	1,10%	1,53%	1,89%	1,98%	1,81%	1,71%	2,07%
	1,5	0,92%	1,00%	1,00%	1,27%	1,63%	1,71%	1,36%	1,36%	1,63%
	2	0,92%	0,92%	0,92%	1,10%	1,27%	1,45%	1,18%	1,10%	1,45%
	2,5	0,92%	0,92%	0,83%	0,92%	1,10%	1,10%	1,00%	0,92%	1,27%
	3	0,83%	0,92%	0,74%	0,92%	0,92%	0,92%	0,83%	0,83%	1,10%
	3,5	0,74%	0,83%	0,65%	0,83%	0,92%	0,83%	0,74%	0,74%	0,92%
	4	0,65%	0,77%	0,65%	0,83%	0,92%	0,74%	0,65%	0,65%	0,83%
	4,5	0,65%	0,65%	0,57%	0,74%	0,92%	0,65%	0,65%	0,65%	0,74%
	5	0,65%	0,65%	0,57%	0,74%	0,83%	0,65%	0,57%	0,65%	0,65%
	5,5	0,57%	0,65%	0,57%	0,65%	0,83%	0,65%	0,57%	0,65%	0,65%
	6	0,57%	0,57%	0,57%	0,65%	0,83%	0,65%	0,65%	0,74%	0,74%



Fuente: Autores.

De acuerdo con la caracterización del sitio de trabajo mostrado en las gráficas contenidas en la Tabla 54, se realiza una comparación con los niveles de iluminación exigidos por RETILAP según las actividades a realizar en el lugar en estudio, para este caso ejemplo corresponde a un salón de clases dentro de un centro educativo, el Reglamento Técnico de Iluminación y Alumbrado Público recomienda unos niveles de iluminación máximo, medio y mínimo de 750, 500 y 300 luxes respectivamente.

Comparando los datos obtenidos y los niveles de iluminación recomendados se evidencia el aporte de la iluminación natural, la Tabla 57 muestra los porcentajes de aporte de niveles de iluminación con respecto al valor máximo recomendado por RETILAP.

Tabla 57. Aporte de iluminación producto de la luz natural.

NIVELES DE ILUMINACION RECOMENDADOS POR RETILAP		MAXIMO	MEDIO	MINIMO						
		750	500	300						
HORA MEDICION 8:00 a.m.	ANCHO DEL LUGAR DE TRABAJO (m)									
		0	0,5	1	1,5	2	2,5	3	3,5	4
PROFUNDIDAD DEL LUGAR DE TRABAJO (m)	0	7%	9%	14%	30%	35%	38%	39%	32%	31%
	0,5	11%	11%	17%	34%	39%	57%	69%	63%	51%
	1	9%	14%	17%	31%	24%	32%	65%	47%	50%
	1,5	12%	16%	15%	27%	18%	25%	39%	38%	28%
	2	12%	17%	14%	21%	17%	20%	31%	29%	24%
	2,5	9%	16%	13%	19%	13%	18%	26%	25%	24%
	3	10%	14%	11%	16%	17%	15%	23%	21%	17%
	3,5	9%	13%	10%	13%	11%	13%	19%	18%	15%
	4	7%	11%	10%	11%	10%	12%	18%	13%	13%
	4,5	8%	11%	8%	10%	9%	12%	15%	12%	11%
	5	8%	10%	8%	9%	9%	13%	13%	11%	10%
	5,5	8%	9%	8%	9%	8%	13%	12%	11%	9%
6	8%	9%	7%	9%	9%	16%	14%	13%	11%	

Fuente: Autores.

Tabla 57. (Continuación)

NIVELES DE ILUMINACION RECOMENDADOS POR RETILAP		MAXIMO	MEDIO	MINIMO							
		750	500	300							
HORA MEDICION 12:00 a.m.	ANCHO DEL LUGAR DE TRABAJO (m)										
		0	0,5	1	1,5	2	2,5	3	3,5	4	
	PROFUNDIDAD DEL LUGAR DE TRABAJO (m)	0	9%	13%	36%	83%	43%	48%	63%	110%	111%
		0,5	11%	24%	43%	57%	36%	34%	49%	92%	88%
		1	14%	29%	43%	49%	30%	27%	48%	78%	75%
		1,5	15%	30%	48%	43%	26%	23%	47%	63%	61%
		2	14%	28%	37%	36%	23%	21%	37%	55%	47%
		2,5	16%	28%	35%	27%	22%	21%	21%	47%	42%
		3	15%	25%	32%	19%	20%	20%	20%	38%	35%
		3,5	19%	24%	30%	12%	19%	20%	20%	34%	31%
		4	23%	24%	28%	11%	19%	19%	20%	32%	28%
		4,5	23%	23%	26%	10%	18%	17%	20%	28%	28%
		5	23%	23%	26%	10%	15%	14%	21%	30%	29%
5,5		21%	23%	24%	10%	15%	14%	21%	30%	29%	
6	19%	19%	18%	12%	18%	25%	24%	31%	33%		
HORA MEDICION 4:00 a.m.	ANCHO DEL LUGAR DE TRABAJO (m)										
		0	0,5	1	1,5	2	2,5	3	3,5	4	
	PROFUNDIDAD DEL LUGAR DE TRABAJO (m)	0	6%	6%	10%	39%	41%	57%	55%	44%	45%
		0,5	7%	9%	13%	23%	25%	28%	24%	24%	28%
		1	10%	10%	12%	17%	21%	22%	20%	19%	23%
		1,5	10%	11%	11%	14%	18%	19%	15%	15%	18%
		2	10%	10%	10%	12%	14%	16%	13%	12%	16%
		2,5	10%	10%	9%	10%	12%	12%	11%	10%	14%
		3	9%	10%	8%	10%	10%	10%	9%	9%	12%
		3,5	8%	9%	7%	9%	10%	9%	8%	8%	10%
		4	7%	9%	7%	9%	10%	8%	7%	7%	9%
		4,5	7%	7%	6%	8%	10%	7%	7%	7%	8%
		5	7%	7%	6%	8%	9%	7%	6%	7%	7%
5,5		6%	7%	6%	7%	9%	7%	6%	7%	7%	
6	6%	6%	6%	7%	9%	7%	7%	8%	8%		

Fuente: Autores.

Revisando los datos mostrados en la tabla 57, se evidencia que los porcentajes de iluminación natural aportados por la toma de luz instalada en el recinto no son valores de niveles de iluminación significativos, haciéndose necesario la utilización de tecnologías de iluminación artificial para cumplir con los requerimientos lumínicos establecidos por el RETILAP, situación que no contribuye con el ahorro de energía eléctrica. El aporte de iluminación natural al interior del espacio es muy reducido, debido a los obstáculos que presenta el edificio cercanos a la toma de luz y a la configuración de la estructura, se hace necesario la implementación de una tecnología de iluminación natural que transporte la iluminación exterior al interior del espacio, mejorando el aporte de iluminación natural y por tanto contribuyendo con la disminución del uso de iluminación artificial.

Luego de determinar el aporte de iluminación natural con la nueva tecnología se procede a complementar los niveles de iluminación faltantes en el sitio con la implementación de tecnologías de iluminación artificial y de esta forma cumplir con lo exigido por RETILAP.

5. SELECCIÓN DE TECNOLOGÍAS DE ILUMINACIÓN

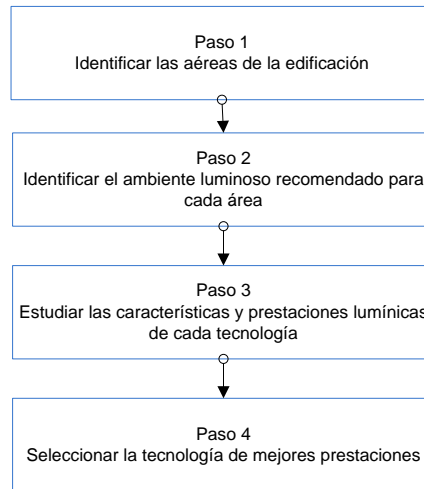
El buen funcionamiento del sistema de iluminación en un edificio depende, entre otros factores, de una buena elección del sistema o de la tecnología de iluminación a utilizar. En cuanto a tecnologías de iluminación natural, se tiene una gran variedad de sistemas que son aplicables en diferentes espacios del edificio según sea la necesidad del local; entre otras, se puede tener: protección al deslumbramiento, disminución del nivel de iluminación en las cercanías de la ventana, incremento de la iluminación al fondo del local, etc.; y en cuanto a la iluminación artificial, factores como: temperatura del color, eficiencia, costo, ahorro de energía, etc.

Este capítulo muestra un procedimiento para la selección de tecnologías de iluminación a emplear en una edificación, teniendo en cuenta sus necesidades y las prestaciones de cada tecnología. Para esto se acude al método de selección multi-criterio de Thomas Saaty llamado Analytic Hierarchy Process AHP, el cual, según el trabajo de investigación⁷ realizado por el ingeniero Daniel Alexander Velazco Capacho, en el cual se expone este método como la mejor alternativa para la solución de problemas multicriterio, multientorno y multiactores, incorporando aspectos tangibles e intangibles inherentes en el proceso de toma de decisiones; como una teoría matemática aplicada a la influencia entre alternativas respecto a un criterio o atributo; y como una filosofía para la toma de decisiones.[23]

La Figura 16 muestra los pasos a seguir para la selección de tecnologías tanto para iluminación natural como para iluminación artificial.

⁷ Trabajo de investigación titulado: Evaluación de alternativas de comunicación para los parámetros de calidad de potencia de media tensión y medidas de los consumos de energía de baja tensión.

Figura 16. Procedimiento para la selección de tecnologías de iluminación.



Fuente: Autores.

5.1 SELECCIÓN DE TECNOLOGÍAS PARA LA ILUMINACIÓN NATURAL

En el desarrollo de un procedimiento para la selección de tecnologías de iluminación natural es indispensable identificar las necesidades de iluminación del edificio y las prestaciones que ofrece cada tecnología siguiendo el procedimiento mostrado en la Figura 12. A continuación se describe cada uno de los pasos recomendados para la selección de tecnologías de iluminación natural.

5.1.1 *Identificación de áreas del edificio*

Según el tipo de construcción, se pueden presentar áreas distantes de las tomas de luz natural convencionales, como por ejemplo sótanos, ó en construcciones en entornos urbanos donde las demás construcciones aledañas no permiten un ingreso significativo de luz natural, se hace necesario implementar estrategias que permitan conducir la iluminación al interior de dichos recintos.

En la mayoría de las construcciones, ya sea de tipo comercial, industrial, de oficinas, educativa o residencial, se hace necesaria la existencia de zonas comunes, sitios de paso, los cuales según su ubicación dentro del edificio se prestan para ser implementada una tecnología de iluminación diferente, por

ejemplo en las áreas de la planta superior se pueden implementar claraboyas, techos translucidos, entre otros. Para las áreas de plantas inferiores alejadas de las fachadas laterales es recomendable sistemas de transporte de luz tales como techos anidólicos cenitales, ductos solares, ductos de fibra óptica entre otras.

5.1.2 Identificación del ambiente luminoso recomendado

A pesar de los requerimientos mínimos de iluminación para las diferentes tareas que se realicen en un área determinada del edificio, la luz natural siempre va a aportar beneficios en cuanto a ahorro de energía y prestaciones lumínicas, como es el alto grado de reproducción cromática evitando el estrés visual y generando ambientes agradables de trabajo. Se recomienda un aprovechamiento máximo de esta fuente lumínica siempre y cuando no se afecte a los ocupantes mediante los rayos directos de luz solar que puedan generar deslumbramiento e incrementos de temperatura dentro del local.

5.1.3 Análisis de características y prestaciones lumínicas de cada tecnología

Para el diseño de un sistema de iluminación es fundamental el conocimiento de las propiedades y características de las tecnologías de iluminación existentes. En iluminación natural es indispensable conocer parámetros, tales como profundidad media de iluminación, protección al deslumbramiento, permite la visión al exterior, emplazamiento en el edificio, entre otras. En el capítulo 2 se describen las principales características de algunas tecnologías de iluminación natural de potencial aplicación en diferentes tipos de construcciones.

5.1.4 Selección de la tecnología

Es un procedimiento que requiere un conocimiento de las características técnicas, de funcionamiento y prestaciones que ofrece cada tecnología en estudio para poder dar una ponderación que muestre la tecnología de mejores prestaciones.

Dentro de los criterios a resaltar en las tecnologías de iluminación natural se destacan: protección al deslumbramiento, permitir el control de la cantidad de luz, permite la vista al exterior, aplicable en techos, aplicable en la fachada, protección a la radiación solar directa, profundidad media de iluminación, mantenimiento y costo.

Para realizar la selección de la tecnología de iluminación natural se acude al método creado por Thomas L Saaty llamado *Proceso Analítico Jerárquico (AHP)*, Su selección se realiza de conformidad al estudio realizado [23], donde muestra a esta herramienta como la mejor opción en proceso de selección tecnológica. A continuación se presenta una breve descripción de este proceso planteado por la metodología de Thomas L Saaty.

Thomas L Saaty plantea cuatro etapas para el desarrollo de su metodología. [23]

1. Modelización: encargada de la construcción de una estructura jerárquica que presente los aspectos relevantes de la situación a resolver.
2. Valoración: Se incorporan las preferencias mediante los juicios en las matrices de comparación. Estas matrices reflejan la dominación relativa de un elemento frente a otro.
3. Priorización y síntesis: esta etapa proporciona las prioridades consideradas en la resolución del problema.
4. Análisis de sensibilidad: Consiste en examinar el grado de sensibilidad del resultado obtenido en una decisión al realizar cambios en las prioridades de los criterios principales del problema.

Para desarrollar las etapas descritas se deben realizar los siguientes pasos:

➤ *Estructuración del problema como una jerarquía:*

Consiste en modelar el problema a resolver como una jerarquía, se puede presentar de forma descendente o de izquierda a derecha, tomando como primer nivel el objetivo, en el nivel inmediatamente inferior se encuentran los criterios, seguidamente se encuentran los sub-criterios si la situación así lo requiere y finalmente se presentan las alternativas con las que se cuenta para resolver la situación.

➤ *Establecimiento de las prioridades entre los criterios*

Consiste en asignar un valor numérico a cada criterio que represente la preferencia del decisor de un criterio frente a otro. Para ello, existen dos estrategias, asignación directa o asignación indirecta. Esta ponderación se muestra en las Tablas 58 y 59.

Tabla 58. Escala de asignación directa.

Valoración cualitativa	Valoración cuantitativa	
	Escala simple	Escala de Saaty
Muy débil	1	1
Débil	2	3
Moderada	3	5
Fuerte	4	7
Muy fuerte	5	9

Fuente: [23].

Tabla 59. Escala fundamental de Saaty.

Escala de Saaty	
1	Igual importancia
2	
3	Importancia moderada del elemento fila sobre el elemento columna.
4	
5	Importancia fuerte del elemento fila sobre el elemento columna.
6	
7	Importancia muy fuerte del elemento fila sobre el elemento columna.
8	
9	Extrema importancia del elemento fila sobre el elemento columna.
1/2	
1/3	Importancia moderada del elemento columna sobre el elemento fila
1/4	
1/5	Importancia fuerte del elemento columna sobre el elemento fila
1/6	
1/7	Importancia muy fuerte del elemento columna sobre el elemento fila
1/8	
1/9	Extrema importancia del elemento columna sobre el elemento fila

Fuente: [23].

El decisor⁸ debe establecer las prioridades para los criterios en comparaciones entre pares, para definir los pesos relativos entre los criterios establecidos por el decisor; los valores de la escala fundamental definidos por Thomas L Saaty representan la relación en la que uno de los elementos domina al otro con respecto al criterio que tienen en común, teniendo en cuenta que el elemento menor tiene el recíproco respecto al mayor; esto se realiza en una matriz cuadrada denominada matriz R [ver tabla 73 del anexo A].

Figura 17. Etapas para el cálculo de consistencia de las prioridades de los criterios y atributos.



Fuente: Autores.

⁸ Llámese decisor al sujeto encargado de realizar la selección de la tecnología (diseñador), basándose en los múltiples criterios técnicos y necesidades expuestas por el usuario (cliente).

➤ *Comprobación de los valores de consistencia*

Si la matriz R fuera completamente consistente (los valores establecidos por el decisor en la matriz R serán congruentes y no se cometan inconsistencias en la asignación de pesos entre criterios), el valor de λ_{max} sería igual a n. teniendo en cuenta que el decisor puede cometer ciertas inconsistencias es conveniente medir el grado de consistencia (IC) expresado como:

$$IC = \frac{\lambda_{max} - n}{n - 1}$$

Este índice de consistencia es utilizado para mejorar la consistencia de los juicios, si se compara con el valor correspondiente del índice de consistencia (razón de consistencia) aleatorio mostrado en la Tabla 60.

Tabla 60. Índice de consistencia aleatorio.

n	1	2	3	4	5	6	7	8
RI	0	0	0.525	0.882	1.115	1.252	1.341	1.404
n	9	10	11	12	13	14	15	16
RI	1.452	1.484	1.513	1.535	1.555	1.570	1.583	1.595

Fuente: [23]

El cociente entre el índice de consistencia y el índice de consistencia aleatorio se obtiene el llamado ratio de consistencia (RC). Si el valor de RC es menor o igual a 0,1 entonces se considera que la matriz R presenta una inconsistencia admisible.

➤ *Establecimiento de las prioridades locales entre los sub-criterios*

Si en la modelización del problema se ha considerado la descomposición en sub criterios se realiza un procedimiento similar al descrito para los criterios.

➤ *Establecimiento de las prioridades locales entre alternativas*

Después de obtener la ponderación para los criterios y sub-criterios se realiza la ponderación de las alternativas y mediante un procedimiento similar, se hace la comparación pareada entre alternativas para luego obtener su ponderación.

➤ *Establecimiento de la prioridades totales asociadas a cada alternativa*

Al obtener los vectores de prioridad de todas las alternativas respecto a cada sub-criterio, se obtiene una matriz que al multiplicarla por el vector de prioridades de los sub-criterios, se obtiene el vector de preferencias de cada alternativa para cada criterio. Luego de obtener tantos vectores de prioridad de las alternativas respecto a los criterios, se construye una matriz que es multiplicada por el vector de prioridades de cada alternativa respecto al objetivo principal.

➤ *Análisis de sensibilidad*

Consiste en realizar variaciones en valor de un peso y observar cómo afecta el resto de los pesos y la priorización de las alternativas.

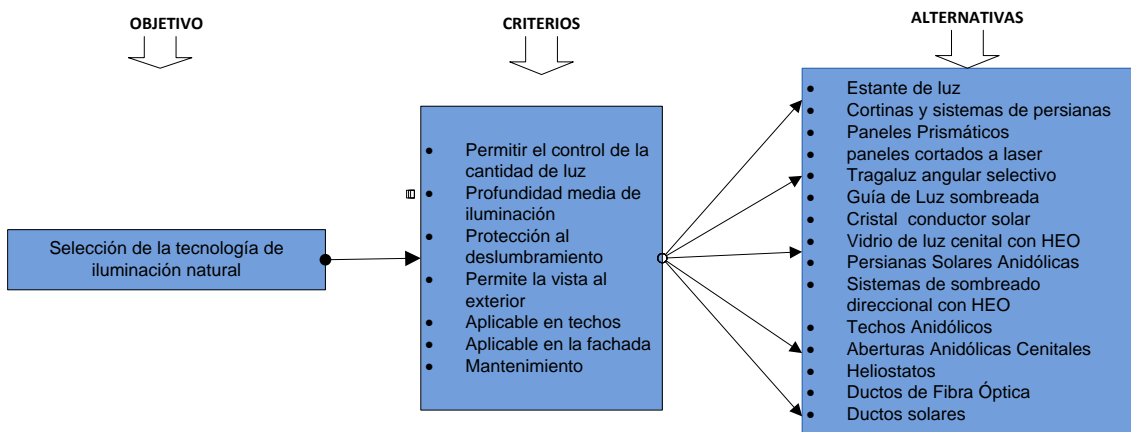
Una vez presentado de forma general el desarrollo del método AHP, se procede a realizar el desarrollo de un ejemplo explicativo consistente en la selección de una tecnología de iluminación natural con mejores prestaciones para ser aplicada al salón LP 214 en el edificio de laboratorios pesados de la Universidad Industrial de Santander.

1. Identificación del objetivo: selección de la tecnología de iluminación natural.
2. Establecimiento de los criterios de selección y alternativas: para las tecnologías de iluminación natural, los aspectos más relevantes en el diseño de un sistema de iluminación, basados en las características de funcionamiento, emplazamiento en el edificio, prestaciones lumínicas, entre

otros, son los siguientes: *Permite control del nivel de luz, Profundidad media de iluminación, Protección al deslumbramiento, aplicable en la fachada, aplicable en techos, permite la vista al exterior, mantenimiento.* Las alternativas con las que se dispone para la solución del objetivo son: *Estante de luz, Cortina y sistema de persianas, Panel prismático, panel cortado a laser, Tragaluz angular selectivo, Guía de luz sombreada, Cristal conductor solar, Vidrio de luz cenital con HEO, Persiana solar anidólica, sistema de sombreado direccional, Techo anidólico, Abertura anidólica cenital, Heliostato, Ducto de fibra óptica, Ducto solar.*

3. Modelización de la estrategia jerárquica: la figura 18 muestra la jerarquización de la situación a resolver.

Figura 18. Modelo jerárquico para la selección de la tecnología de iluminación natural.



Fuente: Autores.

Luego de realizar el procedimiento descrito en el anexo A para la selección de tecnologías de iluminación natural, se muestra en la Tabla 61 el ranking obtenido para las tecnologías de iluminación natural de mejores prestaciones para ser aplicadas en el área de trabajo en estudio.

Tabla 61. Ranking obtenido para las tecnologías de iluminación natural.

TECNOLOGÍA	FIN a 3 metros de profundidad	PONDERACIÓN	PUESTO
Estantes de luz	1,2 %	0,675	6
Cortina y sistema de persianas	1,5 %	0,493	13
Panel prismático	1,2 %	0,421	15
panel cortado a laser	2 %	0,572	10
Tragaluz angular selectivo	N/D	0,701	5
Guía de luz sombreada	N/D	0,780	4
Cristal conductor solar	2,2 %	0,549	12
Vidrio de luz cenital con HEO	0,9 %	0,551	11
Persiana solar anidólica	N/D*	0,574	9
sistema de sombreado direccional	N/D	0,611	8
Techo anidólico	N/D	0,810	1
Abertura anidólica cenital	N/D	0,651	7
Heliostato	N/D	0,474	14
Ducto de fibra óptica	N/D	0,781	3
Ducto solar	N/D	0,782	2

*N/D no disponible.

Fuente: Autores.

5.2 SELECCIÓN DE TECNOLOGÍA PARA LA ILUMINACIÓN ARTIFICIAL

La selección de la tecnología de iluminación artificial se realiza en función de las necesidades del local a iluminar. Para el ejemplo que se va a desarrollar, se seleccionará la tecnología de iluminación para la iluminación de las zonas comunes y pasillos de una edificación.

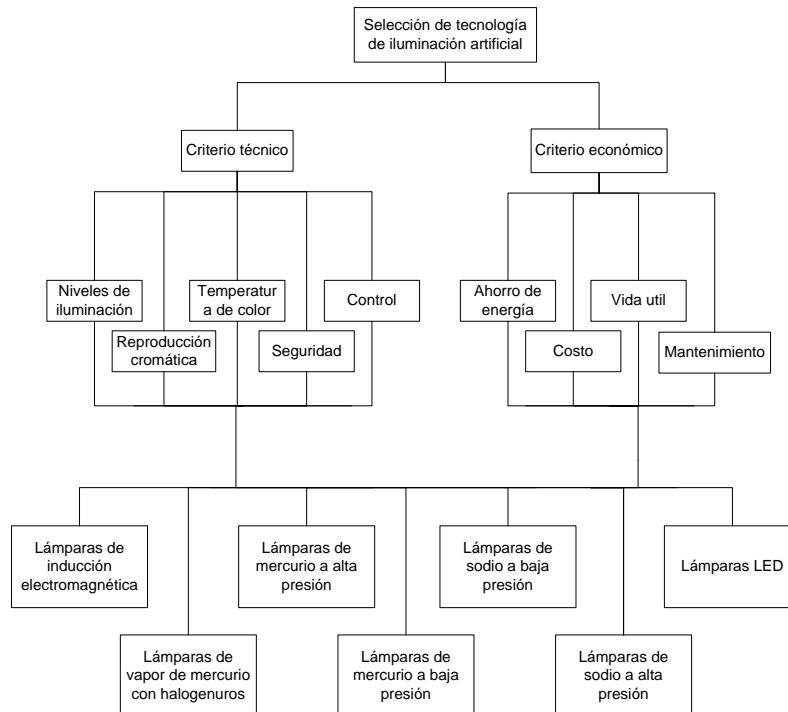
1. Selección del objetivo: El objetivo de esta propuesta es la selección de alternativas de iluminación artificial para zonas comunes y pasillos de una edificación del sector terciario.
2. Establecimiento de los criterios de selección y alternativas: las tecnologías de iluminación artificial se deben elegir por sus características luminotécnicas y por su eficiencia luminosa. Según lo anterior se plantean los siguientes criterios generales, los cuales a su vez se subdividen en varios sub-criterios, a saber:

- a. Criterio Técnico: niveles de iluminación, reproducción cromática, temperatura de color, seguridad, control.
- b. Criterio Económico: ahorro de energía, costo, vida útil, mantenimiento.

Para lo cual, serán analizadas de forma ilustrativa todas las tecnologías de iluminación natural como alternativa de solución a pesar de ser evidente la no aplicabilidad de algunas: lámpara de inducción electromagnética, lámpara de mercurio a alta presión, lámpara de mercurio de baja presión, lámpara de vapor de mercurio con halógenos, lámpara de sodio a baja presión, lámpara de sodio de alta presión, lámparas LED.

- 3. Modelización de la estrategia jerárquica: la Figura 19 muestra la jerarquización de la situación a resolver.

Figura 19. Modelo jerárquico para la selección de la tecnología de iluminación artificial.



Fuente: Autores.

Luego de realizar el procedimiento descrito en el anexo B para la selección de tecnologías de iluminación artificial, se muestra en la Tabla 62 el ranking obtenido.

Tabla 62. Ranking obtenido para las tecnologías de iluminación artificial.

TECNOLOGIA	EFICIENCIA MÍNIMA [lm/W]	CRITERIO MODELO	PUESTO
Lámpara de inducción electromagnética	60	0,528	5
Lámpara de mercurio de alta presión.	35	0,573	4
Lámpara de mercurio de baja presión	68	0,608	2
Lámpara de vapor de mercurio con halógenos	72	0,587	3
Lámpara de sodio a baja presión.		0,474	6
Lámpara de sodio de alta presión	70	0,445	7
Lámparas LED		0,660	1

Fuente: Autores.

6. IDENTIFICACIÓN DE PROTOCOLOS INMÓTICOS DE MEJORES PRESTACIONES PARA SISTEMAS DE ILUMINACIÓN MIXTOS (NATURAL-ARTIFICIAL).

En este capítulo se realiza una descripción de protocolos de comunicación utilizados comercialmente en el campo de la domótica, con base en sus características técnicas, en relación a su desempeño en sistemas de iluminación.

En la actualidad, se busca integrar la automatización, la informática y nuevas tecnologías de la información, para ser aplicadas en el desarrollo de tareas comunes o monótonas en una edificación, y así, mejorar las condiciones de vida de los ocupantes y contribuyendo con el uso racional de la energía.

A continuación se dan algunos términos propios de la integración de dichas tecnologías.

➤ *Domótica*

En términos generales, la Domótica se define como la tecnología encargada de desarrollar e implantar la automatización de las instalaciones habituales en una vivienda o edificio [24]. La palabra domótica, proviene de la unión de la palabra “domo” y del sufijo “tica”. La palabra “domo” proviene del latín *dumus*, que significa casa, y el sufijo “tica”, que proviene de la automática, robótica o “tic” de tecnologías de la información y de la comunicación y “a” de automatización [25].

➤ *Inmótica*

Por inmótica se entiende la incorporación al equipamiento de edificios de uso terciario o industrial (oficinas, edificios corporativos, hoteleros, empresariales y similares), de sistemas de gestión técnica automatizada de las instalaciones, con el objetivo de reducir el consumo de energía, aumentar el confort y la seguridad de los mismos [25], [26].

➤ *Urbótica*

Se entiende por urbótica al conjunto servicios e instalaciones públicas que se encuentran automatizadas con el fin de mejorar las gestión energética, la seguridad, el bienestar o confort y las comunicaciones de todos los usuarios de estos servicios públicos. Se podría definir como la *integración de la tecnología en el diseño inteligente de una ciudad [25]*.

➤ *Protocolo de comunicación*

Es el formato con el que se realiza el envío y la recepción de la información desde dispositivos y elementos de control de un sistema automatizado, de tal forma que se pueda intercambiar la información [27]. Proporciona las reglas para comunicarse, organizando, agrupando o seleccionando la información de forma legible entre los dispositivos interconectados.

Según su estandarización, los protocolos pueden ser:

- Propietario: Son desarrollados por las empresas, las cuales fabrican los dispositivos capaces de comunicarse entre sí [11].
- Estándar: Son protocolos existentes, los cuales los diferentes fabricantes de instrumentos los utilizan para desarrollar dispositivos compatibles con estos [11].

6.1 GENERALIDADES SOBRE PROTOCOLOS INMÓTICOS

En este estudio se analizan los protocolos con mejores prestaciones para el sistema de iluminación tales como: Lonwors, EIB, BatiBus, EHS, KNX, X10, Hometronic, Jini, Modbus, Zigbee, Cbus, UpnP.

La Tabla 63 presenta la comparación de los protocolos de comunicación en función de las características que se describen a continuación.

✚ *Tipos de protocolo:*

Se refiere a la clasificación según su estandarización (propietario o estándar).

✚ *Medio de comunicación:*

Se entiende como medio de transmisión o comunicación al soporte físico por el cual circulan los datos, los más usuales son: red eléctrica (corrientes portadoras, PL), par trenzado, radio frecuencia (RF), infra rojo (IR) y fibra óptica entre otros.

✚ *Velocidad de transmisión:*

En un sistema inmótico, los diferentes elementos deben intercambiar información entre sí a través de un medio de transmisión, la velocidad a la que se transmite los datos entre los elementos se denomina velocidad de transmisión y se mide en bytes por segundo (bps).

✚ *Topología:*

La topología de la red se define como la distribución física de los elementos de control respecto al medio de comunicación. Las topologías más frecuentes son: bus, anillo, estrella, árbol entre otras.

✚ *Alcance:*

Hace referencia a la distancia máxima de transmisión de información entre el transmisor y el receptor.

✚ *Número de dispositivos:*

Se refiere a la cantidad de elementos que puede soportar la red de comunicación inmótica.

Tabla 63 Comparación de protocolos para sistemas inmóticos.

TECNOLOGÍA	TIPO DE PROTOCOLO	CARACTERÍSTICAS TÉCNICAS					GENERALIDADES
		MEDIO DE COMUNICACIÓN	VELOCIDAD DE TRANSMISIÓN	TOPOLOGÍA	ALCANCE	Nº DE DISPOSITIVOS	
Lonworks	estándar	Par trenzado	78 kbps (Módulos TAC). 1,25 Mbps (backbone).	Topología BUS: Una topología definida para distancias largas. Topología libre: Distancias cortas.	<2,2 km	En topología BUS, 64 dispositivos	Es una tecnología para la gestión técnica y el control de las instalaciones. Presenta un control distribuido y descentralizado, permitiendo distribuir la "inteligencia" entre sensores y actuadores. Aplicable en instalaciones del sector terciario. No es una arquitectura jerárquica.
		Ethernet TCP/IP	10 Mb/s - 10 Gb/s			Determinada por la red IP	
		Línea eléctrica	4,8 kbps		Varía en función del entorno	Varía en función del entorno	
		Telefonía:	TAC Xenta 901. 9,6 kbps		Definido por la red	64-128	
			Echelon SLTA-10 56 kbps				
		Onda radiales:	CTI Network Combiner 56kbps		<2,3 km		
			UltraCom DataW 4,8 kbps				
Milab 4,8 kbps							
		Fibra óptica, Raytheon	1,25 Mbps				
		Infrarrojo, Elpas	78 kbps				
		Coaxial	9,6-128 kbit/s				
X10	estándar	Línea eléctrica	60 bps	Sistema descentralizado	Depende de la atenuación por la red y del ruido que se pueda presentar.	256 dispositivos	No necesita una programación, sólo configuración, de fácil manejo, bajo costo
EIB	estándar	Par trenzado	9 600 bps	Sistema descentralizado, una línea de bus, que a su vez puede disponer hasta de 15 áreas unidas por una línea principal.	Distancia máxima entre dispositivos 700 m	Máximo 14 440 dispositivos	Es un sistema estándar europeo, desde 1999 se fusionó con los sistemas BatiBus y EHS formando el estándar Konnex o KNX
		PL (Power Line)	24 kbps				
		Ethernet	10 Mbits				
Europa Home Sistem. EHS	Estándar abierto	Radio frecuencia					Está basada en una topología de niveles OSI (Open Standard Interconexion)
		PL, por modulación FSK	2,4 kbps				
		TP0	4,8 kbps				
		TP1/coaxial	9,6 kbps				
		TP2	64 kbps				
RF	1,1 kbps						
IR	1,2 kbps						

Tabla 63. (Continuación)

TECNOLOGÍA	TIPO DE PROTOCOLO	CARACTERÍSTICAS TÉCNICAS					GENERALIDADES
		MEDIO DE COMUNICACIÓN	VELOCIDAD DE TRANSMISIÓN	TOPOLOGÍA	ALCANCE	Nº DE DISPOSITIVOS	
BatiBus	Estándar	Alámbrico	4,8 kbps	Control distribuido			Se fusionó con EIB y EHS para formar KNX
KNX		TP1 EIB	9,6 kbps		Entre la fuente y un dispositivo 350 m		Nace con el objeto de crear un único estándar europeo para la automatización de las viviendas y oficinas y crear un único estándar para la domótica e inmótica que cubra todas las necesidades y requisitos de las instalaciones profesionales y residenciales de ámbito europeo
		TP0 BatiBus					
		Ondas Portadoras (PL 100) EIB			Entre dos dispositivos 700 m		
		PL 132 EHS	1,2 kbps				
		Radio frecuencia EIB. RF	16 384 bps		Hasta 300 m en Campo abierto		
		Ethernet EIB .net	10 Mbps		200 m		
Hometronic - honeywell		Wireless	400 MHz	Centralizada	Máxima distancia del transmisor al receptor 30 m		
ZigBee (HomeRF Lite)	Estándar	Inalámbrico (RF)	20 kB/s a 250 kB/s		10 m a 75 m	Hasta 255 dispositivos	ZigBee es una alianza, sin ánimo de lucro, de 25 empresas, la mayoría de ellas fabricantes de semiconductores, con el objetivo de patrocinar el desarrollo e implantación de una tecnología inalámbrica de bajo costo.
Jini	Propietario			Totalmente distribuida			Jini ha sido desarrollado por Sun Microsystems, no está teniendo el éxito que se esperaba de ella, debido a los derechos sobre el Java y su máquina virtual

Tabla 63. (Continuación)

TECNOLOGÍA	TIPO DE PROTOCOLO	CARACTERÍSTICAS TÉCNICAS					GENERALIDADES
		MEDIO DE COMUNICACIÓN	VELOCIDAD DE TRANSMISIÓN	TOPOLOGÍA	ALCANCE	Nº DE DISPOSITIVOS	
MODBUS	Estándar	Bus semidúplex (half duplex) (RS-485 o fibra óptica) o dúplex (RS-422, BC 0-20mA o fibra óptica)	Desde 75 bps a 19,2 kbps	Maestro esclavo	Depende del nivel físico, puede alcanzar hasta 1 200m sin repetidores	63 dispositivos esclavos por cada estación maestra	Debido a su simplicidad y especificación abierta, es utilizado por diferentes fabricantes. Su protocolo especifica formato de trama (ASCII ó RTU), secuencia y control de errores
CBus	Estándar	Par trenzado	10 kbps	Distribuida	152 m	Depende de la atenuación por la red y del ruido que se pueda presentar.	Al igual que los dispositivos EIB, los dispositivos CEBus tienen grabada desde el proceso de fabricación una dirección física (4 000 millones de posibilidades) que los identifican de forma unívoca en una instalación domótica. Utiliza un lenguaje común orientado a objetos (estándar EIA-600) llamado CAL (Common Appliance Lenguaje).
		Radio Frecuencia	10 kbps		100 m		
		PL	1 Mbps				
		Cable coaxial	7,5 kbps		45,7 m		
		Fibra óptica	2 Gbps				
TCP/IP	Estándar	Par trenzado	10 Mbps a 100 Mbps		1 km		
		Cable coaxial					
		Fibra óptica					

Fuente: Autores.

6.2 DESCRIPCIÓN DE PROTOCOLOS DE COMUNICACIÓN SEGÚN SUS PRESTACIONES PARA LA ILUMINACIÓN DE ESPACIOS INTERIORES

Para realizar selección del protocolo de comunicación se acude nuevamente al método creado por Thomas L Saaty llamado *Proceso Analítico Jerárquico (AHP)* y se realiza un procedimiento similar al mencionado en el numeral 5.1.4.

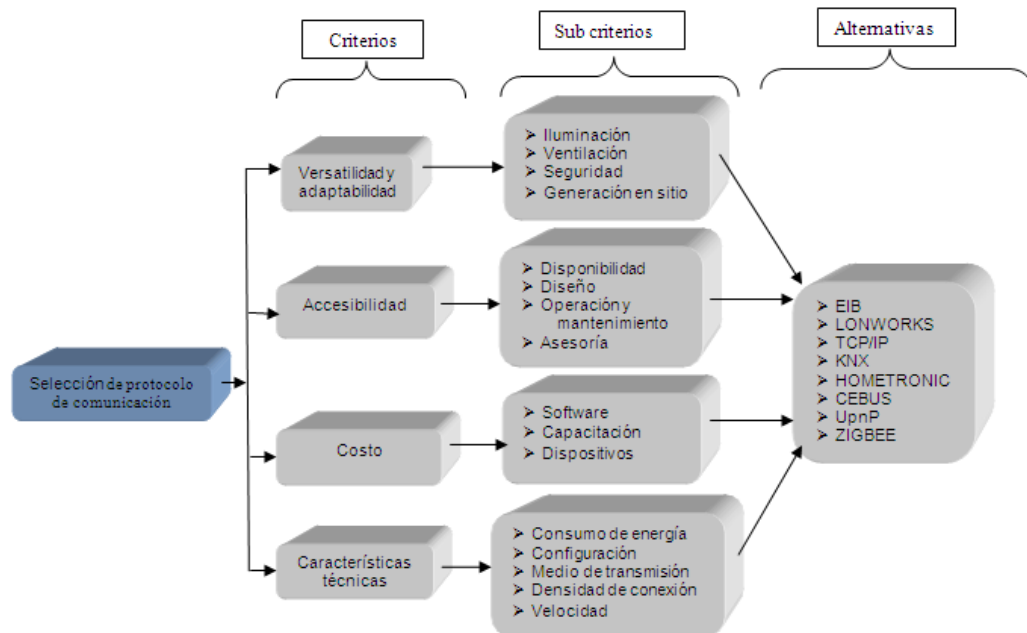
- A. Definición del objetivo: identificar el protocolo de comunicación inmótico con mejores prestaciones para ser implementado en la automatización de un sistema de iluminación mixto (natural y artificial).
 - B. Establecimiento de los criterios de selección y alternativas: Para realizar el análisis de los protocolos con mejores prestaciones para los sistemas de iluminación, se consideraron cuatro criterios fundamentales, versatilidad y adaptabilidad, accesibilidad, costo y características técnicas.
- ❖ **Versatilidad y adaptabilidad:** hace referencia a la facilidad de adaptación a diferentes sistemas de control, permitiendo la compatibilidad de gran variedad de elementos para control de diferentes aplicaciones como son: seguridad, ventilación, generación de energía en sitio (bicicletas estáticas) e iluminación, la cual va a ser el principal factor de selección en este trabajo.
 - ❖ **Accesibilidad:** Se enfatiza en qué tan accesible se encuentra en el mercado nacional, con respecto a servicio técnico y asesoría.
 - ❖ **Costo:** Da una idea de qué tan costoso es implementar la tecnología en comparación con las tecnologías de prestaciones similares.

❖ **Características técnicas:** Se refiere a principales características técnicas como son: consumo de energía, configuración, medio de transmisión, densidad de conexión y velocidad de transmisión [11].

C. Modelización de la estrategia jerárquica:

La Figura 20 expone la jerarquización de la situación a resolver exponiendo los criterios, sub criterios más relevantes a tener en cuenta en la elección de una tecnología de comunicación.

Figura 20. Modelo jerárquico para la selección de protocolos de comunicación en sistemas de iluminación natural y artificial.



Fuente: Autores.

Luego de realizar el procedimiento descrito en el anexo C, como un ejemplo para la selección de protocolos de comunicación, se muestra en la Tabla 64 un posible ranking.

Tabla 64. Ranking obtenido para los protocolos de comunicación.

Protocolo	TOTAL	Puesto
EIB	0,948	1
LONWORKS	0,921	3
TCP/IP	0,893	5
KNX	0,926	2
Hometronic	0,876	6
CEBUS	0,764	8
UpnP	0,777	7
ZIGBEE	0,618	9
MODBUS	0,912	4

Fuente: Autores.

7. ESTRATEGIAS DE DISEÑO PARA LA AUTOMATIZACIÓN DE SISTEMAS DE ILUMINACIÓN

La automatización en los sistemas de iluminación busca generar un alto desempeño lumínico y energético, y producir confort y ambiente agradable disminuyendo la fatiga en sus usuarios a partir de la utilización de dispositivos electrónicos para controlar niveles de iluminación graduales o continuos.

En este capítulo se presenta la propuesta de una estrategia para realizar la automatización del sistema de iluminación de una edificación.

7.1 GENERALIDADES EN UN SISTEMA DE CONTROL

Para la realización de un sistema de iluminación automatizado, es indispensable algunas consideraciones tales como: elementos sensores, arquitectura del sistema de control, entre otros.

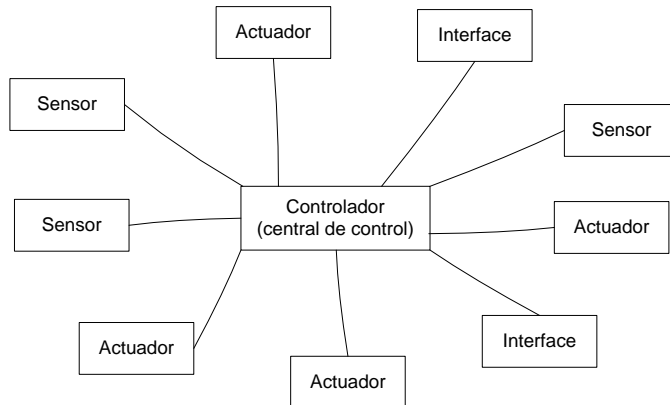
7.1.1 *Arquitectura de un sistema automatizado*

Se le denomina arquitectura a la estructura de la red del sistema de control, la clasificación se realiza en función de la ubicación de la unidad de mando o controlador. Los tipos de arquitectura existentes para un sistema de control son: centralizada, descentralizada, distribuida y mixta como se describe a continuación [11].

➤ *Arquitectura centralizada:*

Está compuesta por un controlador encargado de recibir y enviar información a los actuadores, interfaces con el usuario, sensores y sistemas interconectados. Básicamente, es un sistema con una única unidad de mando o control, encargada de dirigir todo el proceso de automatización. Su principal desventaja es la difícil modificación y ampliación del sistema. Su esquema se muestra en la Figura 21.

Figura 21. Configuración de una arquitectura centralizada.

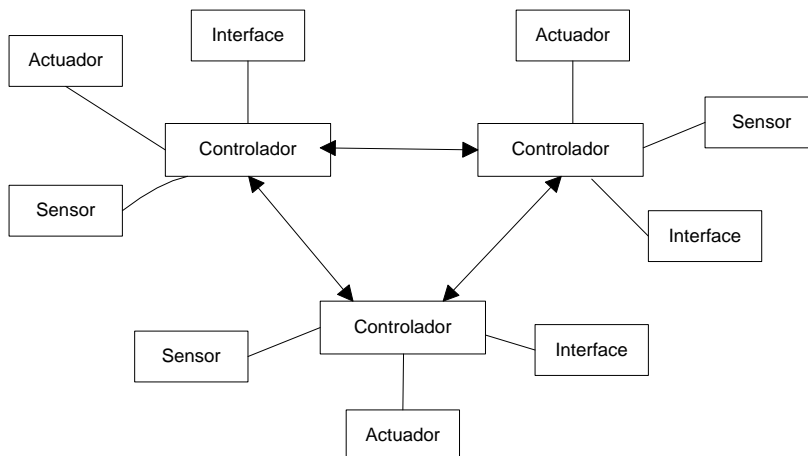


Fuente: Autores.

➤ *Arquitectura descentralizada*

Cuenta con varias unidades de control independientes, conectadas entre sí y con los dispositivos bajo su control. Pueden encontrarse dispositivos que cuentan con un sistema de control integrado permitiendo su propia autorregulación. Sus características fundamentales son su elevada flexibilidad a la integración con diferentes dispositivos. Su configuración se muestra en la Figura 22.

Figura 22. Configuración de la arquitectura descentralizada.

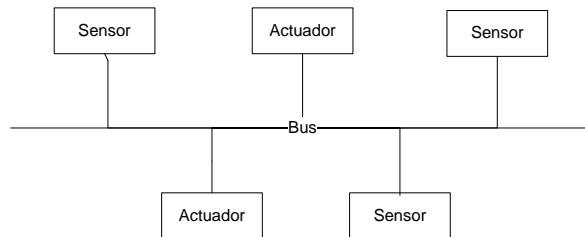


Fuente: Autores.

➤ *Arquitectura distribuida*

En esta configuración cada sensor y actuador es también un controlador capaz de actuar y enviar información al sistema. Todas las acciones de control son generadas de forma local por todo el sistema. Su configuración se muestra en la Figura 23.

Figura 23. Configuración de la arquitectura distribuida.

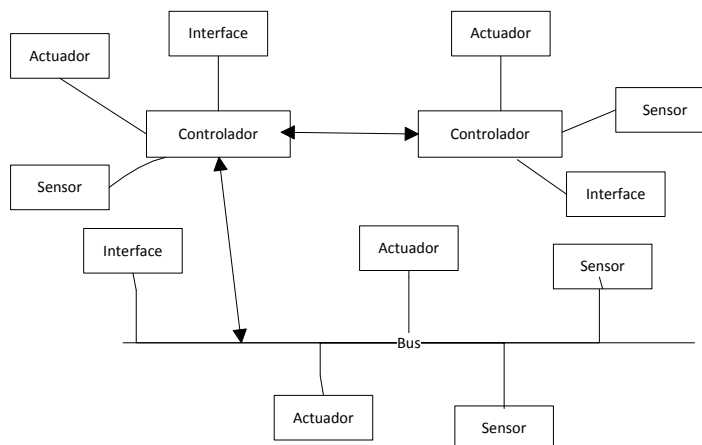


Fuente: Autores.

➤ *Arquitectura mixta*

En esta configuración se combinan las arquitecturas de los sistemas centralizados, descentralizados y distribuidos. A la vez que puede disponer de un controlador central o varios controladores descentralizados, los dispositivos de interfaces, sensores y actuadores pueden también ser controladores, su configuración se muestra en la Figura 24.

Figura 24. Configuración de la arquitectura mixta.



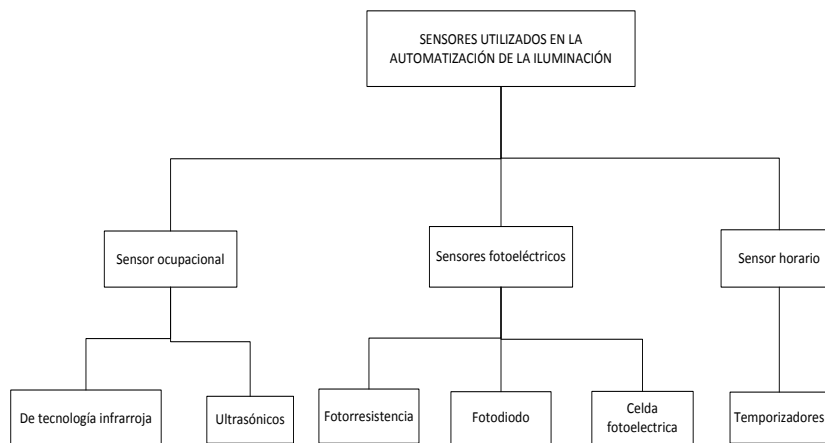
Fuente: Autores.

7.1.2 Elementos sensores

El objetivo fundamental de un sensor es evaluar las condiciones de los ambientes por medio de la medición de las variables físicas en estudio, como por ejemplo, el nivel de luminosidad, presencia o ausencia de ocupantes, entre otros.

Los tipos de sensores más comunes en un sistema de iluminación son los mostrados en la Figura 25.

Figura 25. Clasificación de los sensores para la automatización de la iluminación.





Fuente: Autores.

En la figura 21 se muestra la clasificación los sensores en tres grupos fundamentales: ocupacional (detector de presencia), fotoeléctricos (detectores de iluminación) y los sensores horarios o temporizadores, que integrados en sistema de iluminación permiten niveles de iluminación adecuados y ahorros considerables de energía eléctrica. Las Tablas 65 y 66 describen las tecnologías utilizadas por los diferentes sensores y su modo de detección de la variable a medir.

Tabla 65. Descripción de las tecnologías para los sensores ocupacionales.

Detector de presencia
Es un dispositivo que detecta la presencia de personas en el local, basado en esto se realiza la acción de control evitando las pérdidas producidas por el llamado "Derroche por Factor Ocupacional (Dfo)", que consiste en la cuantificación del valor de la energía eléctrica consumida por las lámparas que se encuentran encendidas en ausencia de usuarios. El tipo de control con estos sensores es de tipo ON/OFF [11].

Tabla 65. (Continuación)

<p>De tecnología infra roja</p>	<p>Son conocidos como sensores infrarrojos pasivos PIR, se les denomina pasivos ya que no emiten ningún rayo. Su funcionamiento se basa en la detección de la radiación calórica de un cuerpo, cuando el cuerpo ingresa en el campo de acción del sensor y tiene una temperatura diferente a la del medio, se produce el accionamiento del sensor. Para incrementar el ángulo de operación utilizan lentes de Fresnel, los cuales enfocan la radiación emitida por los cuerpos sobre el elemento sensor, cubriendo una mayor área de operación [7].</p>	 <p>Tomado de [36]</p>
<p>Ultrasónicos</p>	<p>Su principio de funcionamiento se basa en el efecto Doppler. La señal ultrasónica de un emisor es reflejada por los objetos del local y recibida por uno o más receptores, permitiendo la detección del movimiento mediante los cambios en el tiempo de regreso de la señal, producidos por la interrupción del curso normal de la onda.</p>	 <p>Tomado de [36]</p>

Fuente: Autores.

Tabla 66. Descripción de las tecnologías para los sensores fotoeléctricos y horarios.

<p style="text-align: center;">Detectores de iluminación</p>	
<p>Algunos están formados por elementos fotosensibles colimados por una lente enfocada sobre el área de interés (plano de trabajo) o si es necesario enfocar un área de mayor tamaño, es recomendable la utilización de un lente de Fresnel. Integrados en un sistema de control permiten variar el flujo luminoso de un sistema de iluminación en función de la iluminancia detectada. Existen varias tecnologías de estos dispositivos. Entre otras están:</p>	
<p>Fotorresistencia</p>	<p>Es un dispositivo cuya resistencia eléctrica disminuye con el incremento de luz incidente. Puede variar su valor de resistencia desde unos 50 Ω hasta el orden de los M Ω ohmios al estar en oscuridad.</p>
<p>Fotodiodo</p>	<p>Es un dispositivo semiconductor de unión PN sensible a la luz. Está polarizado inversamente, por tal motivo producirá una corriente al ser excitado por la luz. En ausencia total de luz se puede presentar una corriente residual entre las terminales del diodo.</p>
<p>Celda fotoeléctrica</p>	<p>Permite transformar energía lumínica en energía eléctrica mediante el efecto fotovoltaico (absorbe fotones y produce electrones).</p>
<p style="text-align: center;">Sensor horario</p>	
<p>Son interruptores horarios programables. Se puede realizar una programación en forma diaria, semanal, mensual o anual, incluir días en los cuales la edificación no está en uso. Son indicados para locales con bajo patrón de ocupación y además que sea conocido el horario de ocupación (aulas de clase, oficinas). A pesar de ser posible el encendido de las luces por medio del temporizador, es recomendable dejar esta tarea a los ocupantes del recinto.</p>	

Fuente: [11]

Cabe resaltar que la instalación de los sensores requiere un periodo de ajuste a cada local en particular. La tabla 67 describe algunas consideraciones a tener en cuenta en la instalación y ajuste de los sensores.

Tabla 67. Consideraciones en la instalación de sensores.

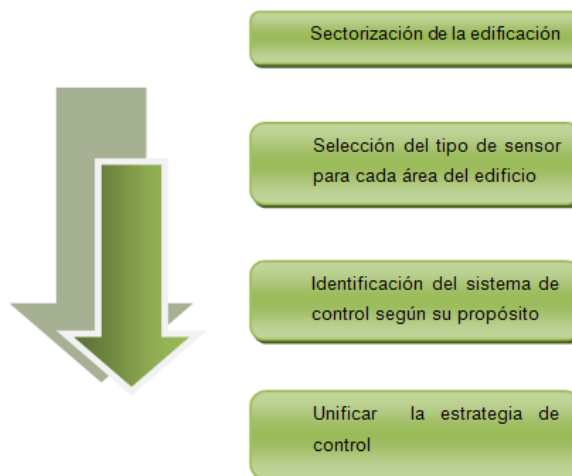
Tiempo de retardo	La acción de control producto de las mediciones de cualquier tipo de sensor debe guardar un tiempo de retardo con el fin de evitar alteraciones y cambios bruscos o muy frecuentes en el ambiente luminoso del local. Un tiempo prudencial podría estar entre 5 y 10 minutos.
De tipo fotoeléctrico	La comparación entre el nivel de iluminación en el plano de trabajo y los niveles de iluminación establecidos por las normas para realizar las diferentes tareas, permite conocer la cantidad de luz que debe aportar el sistema de luz artificial. La ubicación del sensor es un factor importante con el fin de evitar accionamientos innecesarios debido a reflejos u otras interrupciones. Algunas fuentes de perturbación son: fuentes de luz brillando directamente sobre él, luz reflejada o apuntado a una superficie brillante, que esté enfocado a una ventana o que el sensor esté bloqueado por algún objeto.
De tipo ocupacional	El área barrida por los sensores debe limitarse a los espacios bajo control. Es indispensable evitar que dentro del área de barrido no se encuentren elementos de alta reflectancia o que presenten cambios rápidos de temperatura (calefactores, aire acondicionado, ventanales etc.)
Temporizadores	Es recomendable utilizar un apagado escalonado de las luminarias del local, esto será una señal de alerta para los usuarios que muy pronto se apagará el sistema de iluminación. Cabe señalar que ante cambios en el horario de uso se puede pasar al control manual del sistema.

Fuente: [11]

7.2 GUÍA PARA EL DISEÑO DE UNA ESTRATEGIA DE AUTOMATIZACIÓN DE UN SISTEMA DE ILUMINACIÓN

Esta guía ofrece al diseñador de un sistema de iluminación mixto, los pasos a seguir para formular una estrategia de control para el sistema de iluminación de una edificación. La Figura 26 muestra un procedimiento que permite la planeación de la estrategia de control.

Figura 26. Procedimiento para la formulación de la estrategia de control.



Fuente: Autores.

7.2.1 Sectorización de la edificación

En una edificación se realizan gran variedad de actividades que requieren de diferentes niveles de iluminación, elementos de toma de datos (sensores) y diferentes tecnologías de iluminación (natural y artificial). Para ello, una adecuada distribución del sistema de control permite tener independencia en los sistemas automatizados, garantizando su correcta operación.

Un concepto que recoge esta estrategia es el llamado *Principio de Modularidad*, que consiste en la instalación de módulos básicos de iluminación escalonados que forman un sistema más complejo. Permite la independencia de las luminarias o diferentes actuadores, permitiendo el control individual o agrupando en filas y columnas las luminarias, luces de decoración, etc. Su estructura se muestra en la Tabla 68.

Tabla 68. Estructura del principio de modularidad.

Unidad de mando	Permite el control del sistema de iluminación mediante la detección del movimiento, regulación del flujo luminoso en función de la iluminación en el plano de trabajo, temporizadores e interruptores.
Unidad operativa	Esta se basa en una unidad de mando distribuida que proporciona funciones de control local, con la posibilidad de reconfiguración, permitiendo adaptarse a los diseños específicos proyectados para cada área del edificio.
Unidad de comunicación	Contempla lo relacionado a líneas de transmisión de datos. Pueden integrar el sistema de iluminación con los demás sistemas automatizados del edificio como es el sistema de climatización, seguridad y demás sistemas domóticos implementados.

Fuente: [12].

7.2.2 Selección del tipo de sensor según área

El adecuado funcionamiento de un sistema de control depende en gran medida de una estratégica selección del tipo de sensor a implementar según la labor a realizar y la cantidad de ocupantes [37]. La Tabla 69 muestra la recomendación de los sensores más apropiados según la tarea a desarrollar y el número de ocupantes.

Tabla 69. Recomendación en la elección de sensores en función de la labor y el número de ocupantes

Tipo de ocupación	Cantidad de ocupantes	Sensor horario	Sensor ocupacional	Sensor fotoeléctrico
Variable	Muchos	***	*	*
Variable	Uno o dos	*	**	*
Horario Intermitente	Muchos	***	*	*
Continua	Muchos	***	Solo en áreas localizadas	***
Continua	Uno o dos	*	Solo en áreas localizadas	**
Horario Intermitente	Uno o dos	---	***	**
Eventual	Cualquiera	***	***	---

*Muy recomendado ***; Aceptable **: No recomendable *: No aplica --*

Fuente: [11].

La Tabla 70 indica los tipos de sensores recomendados para ser implementados en función del espacio a controlar.

Tabla 70. Sensores ocupacionales recomendados en función del espacio a controlar.

Tipo de local	Sensor PIR	Sensor ultrasónico	PIR + ultrasónico
Oficinas con cerramientos	***	*	***
Bodegas	***	*	***
Baños	*	***	***
Con techos altos	***	*	*
Aulas de clase	***	*	***
Salas de reuniones	*	***	**
Con generadores de calor	*	**	***
Cocinas	*	***	***
Pasillos poco transitados	***	***	***
Oficinas individuales	*	**	***

*Muy recomendado ***; Aceptable **: No recomendable *: No aplica --*

Fuente: [11].

7.2.3 Identificación del sistema de control según propósito

Cada sensor por separado se encarga de permitir el control de la iluminación desde un punto de vista diferente; básicamente, se clasifican en dos tipos, detección del nivel de iluminación y detectores de presencia. Se pueden identificar básicamente tres propósitos fundamentales, que conllevan a un uso eficiente de la iluminación y proporcionar un ambiente luminoso óptimo para el usuario. Estos propósitos son:

➤ *Protección al deslumbramiento:*

Está basado en la utilización de sensores de nivel de iluminación situados en la cercanía de la abertura de toma de luz, que, al identificar un nivel de iluminación superior al nivel recomendado, produce una señal de activación del sistema de protección, ya sea el despliegue de un toldo protector, o el accionamiento del sistema de persianas, reduciendo la cantidad de luz y generando protección al ojo humano del deslumbramiento. Para la implementación de los sistemas de protección solar activados por este tipo de sensores es necesario tener varias consideraciones, las cuales se muestran en la Tabla 71.

Tabla 71. Consideraciones para la selección de sistemas de protección solar.

Orientación de la toma de luz	Tomas de luz enfocada al oriente o al occidente están sometidas a radiación solar directa con ángulos de elevación solar muy bajos en la mañana y en la tarde. Las ubicadas al sur (latitud norte) y la ubicadas a norte (latitud sur) se hace necesaria la protección solar ya que están sometidas a radiación solar la mayor parte del día, al igual que las tomas de luz horizontales (claraboyas, techos translucidos).
Obstáculos naturales o arquitectónicos	Pueden existir árboles, edificaciones o cualquier otra estructura que impida la radiación directa sobre la toma de luz, no siendo necesario un dispositivo adicional de protección.
Ubicación geográfica del edificio	Las edificaciones en la zona tropical cuentan con altos ángulos de elevación solar, lo cual hace necesario sistemas de protección de pocas dimensiones (estantes solares, toldos, etc.) y poco rango de adaptabilidad, con lo que no cuentan las edificaciones más cercanas a las zonas polares que presentan ángulos de elevación solar muy bajos con alto grado de penetración al interior del local.

Fuente: Autores.

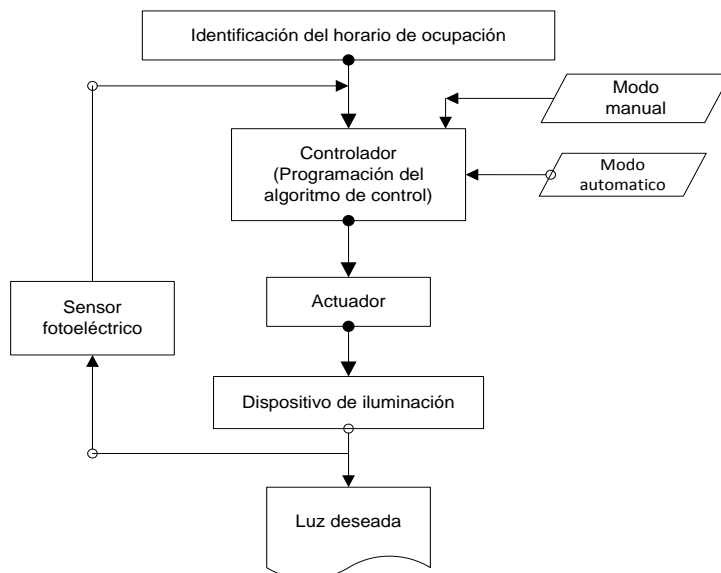
➤ *Control del derroche por factor ocupacional (Dfo)*

Mediante la implementación de temporizadores, sensores ultrasónicos o infrarrojos pasivos se evita el derroche por factor ocupacional (Dfo) [11]. A continuación se describe el esquema de funcionamiento para cada sensor con el objetivo de controlar el Dfo.

➤ *Sistema temporizado:*

Un sistema temporizado consiste en la activación y desactivación del sistema de iluminación a una hora determinada, según sea la ocupación del edificio. Para evitar apagones repentinos, es necesario que se emita una señal de alerta con el fin de dar aviso a los ocupantes que pronto se apagará el sistema de iluminación. En el caso en que se vaya a permanecer un tiempo extra en el recinto se debe poder reprogramar un tiempo adicional o pasar a modo manual. Puede ser implementado en cualquier tipo de recinto en el que se cuente con un horario fijo de ocupación o en sistemas de alumbrado decorativo. La Figura 27 muestra un esquema de un sistema de control de iluminación temporizado.

Figura 27. Esquema para un sistema temporizado.

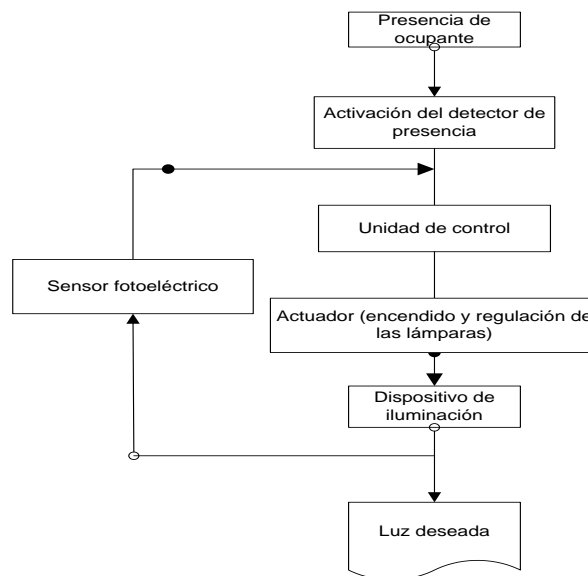


Fuente: Autores.

➤ *Sensores ocupacionales:*

Al ser dispositivos de activación, es necesario complementarlos con los sensores fotoeléctricos para obtener la regulación de la iluminación y cumplir con los requerimientos lumínicos de cada recinto. La Figura 28 muestra un esquema de funcionamiento para el control por medio de detectores de presencia.

Figura 28. Esquema para un sistema detector de presencia.



Fuente: Autores.

➤ *Optimización del ambiente lumínico:*

Se basa en la automatización por medio de sensores fotoeléctricos encargados de medir el nivel de iluminación en el recinto y basado en esta medición se toma la acción de control sobre el dispositivo emisor de luz para variar el flujo luminoso emitido o para la modificación de los dispositivos de protección a la radiación solar.

En un proyecto de iluminación se deben tener en cuenta los niveles de iluminación requeridos en cada tarea a desarrollar, las condiciones visuales de quienes las desarrollan y el tiempo de permanencia, garantizando que no se presenten problemas de fatiga visual.

Para la visión humana pueden ser tolerables variaciones en los niveles de iluminación hasta de 1:3. Las relaciones de 1:1.5 son casi imperceptibles. La Tabla 73 muestra los niveles de iluminación recomendados, adecuados para diferentes escenarios o tareas.

Tabla 72. Niveles de iluminación adecuados.

Relación de nivel			Recomendación
1/1.5	1/2	1/3	
3000 lux			Quirófanos (localizado)
1000 lux	1000 lux	1000 lux	Tareas muy finas
750 lux			Tareas finas
500 lux	500 lux		Dibujo
300 lux		300 lux	Lectura
220 lux	220 lux		Estancia
150 lux			Almacenaje
100 lux	100 lux	100 lux	Circulaciones
75 lux			
50 lux	50 lux		
30 lux		30 lux	Zonas de paso
22 lux	22 lux		
15 lux			
10 lux	10 lux	10 lux	Alumbrado público

Fuente: [8].

El Reglamento Técnico de Iluminación y Alumbrado Público RETILAP presenta una amplia lista de niveles de iluminación exigibles en diferentes áreas y actividades; especificando la tarea a desarrollar, índice UGR⁹, niveles de iluminancia mínimo, medio y máximo¹⁰.

7.2.4 Unificación estratégica de control para sistemas de iluminación mixtos.

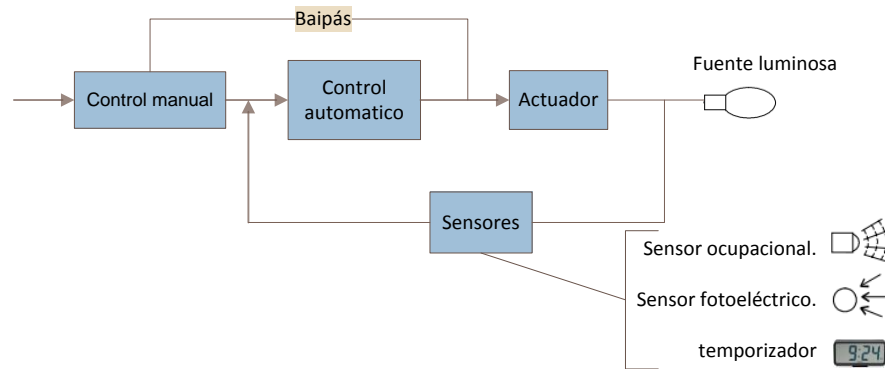
Como ya se mencionó, para un correcto funcionamiento del sistema de control en iluminación, es necesario implementar en conjunto los sensores ocupacionales, fotoeléctricos y temporizadores, si las condiciones o el tipo de recinto lo permite como se muestra en las Tablas 70 y 71, para así garantizar el cumplimiento de los

⁹ UGR: Índice de Deslumbramiento Unificado.

¹⁰ Disponible en: El Reglamento Técnico de Iluminación y Alumbrado Público RETILAP, Tabla 440.1.

propósitos expuestos en el numeral 7.2.3. La Figura 29 muestra el esquema general de un sistema de control de iluminación.

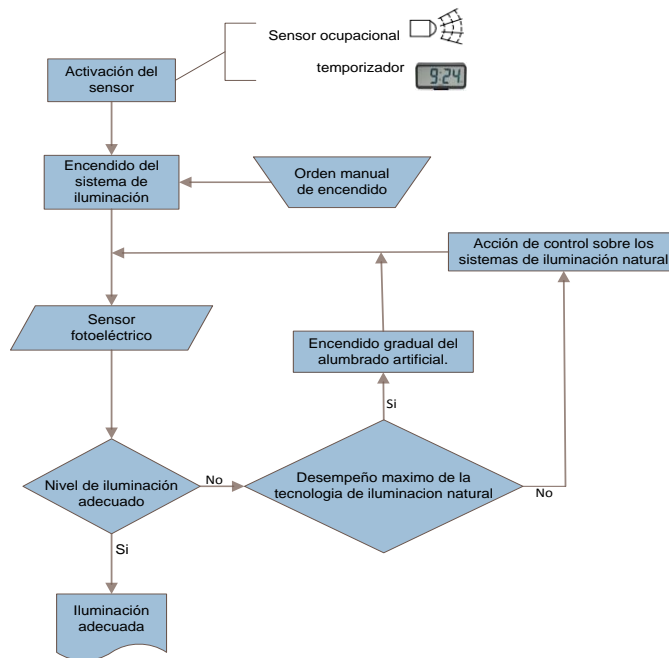
Figura 29. Diagrama de bloques para un sistema de control de iluminación.



Fuente: [11].

La Figura 30 muestra el diagrama de flujo del sistema de control en función de las señales de los tres tipos de sensores utilizados para sistemas de iluminación.

Figura 30. Diagrama de flujo del funcionamiento del sistema control para iluminación.



Fuente: Autores.

8. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

A continuación se presentan las conclusiones, resultados y recomendaciones referentes al trabajo de investigación realizado.

8.1 RESULTADOS Y CONCLUSIONES

✓ Metodología y presentación del documento.

La metodología a partir de la cual se afrontó la realización del presente trabajo, facilita el entendimiento de las etapas a seguir en la realización de un proyecto de diseño de sistemas de iluminación mixto, partiendo del reconocimiento de las tecnologías de iluminación natural y artificial, pasando por la evaluación del desempeño lumínico de dichas tecnologías, el proceso de selección de la estrategia tecnológica, el lenguaje de comunicación a utilizar, y por último, el planteamiento de la estrategia de integración y control del sistema de iluminación. Dentro de las múltiples ventajas que ofrece la implementación de tecnologías de iluminación natural y la automatización del sistema de iluminación, se encuentran: el potencial ahorro energético y financiero, la disminución en los costos de sostenimiento de la edificación, debido al aprovechamiento de luz natural, y gestión de iluminación artificial según horarios y ocupación de los espacios. Asimismo, se tendrá el aseguramiento de condiciones lumínicas de confort visual para los usuarios según los requerimientos particulares.

✓ Descripción del funcionamiento de tecnologías de iluminación natural y artificial.

Con la realización de este trabajo se llevó a cabo una recopilación de información referente a las diferentes tecnologías de iluminación, tanto natural como artificial, ya que gran parte de la información existente sobre tecnologías de iluminación se encuentra dispersa y fragmentada. Este trabajo permitirá al diseñador acceder de

forma práctica y rápida a la información que describe las principales características de dichas tecnologías de iluminación.

✓ **Procedimiento para evaluar el desempeño lumínico en espacios interiores de tecnologías de iluminación natural.**

Se desarrolló una propuesta metodológica que permite al diseñador de sistemas de iluminación natural, identificar el potencial de iluminación natural en el exterior de la fachada. Partiendo de dichos datos obtener el potencial lumínico al interior de la edificación, planteando dos estrategias que permiten realizar un análisis por separado del desempeño lumínico de las tecnologías de iluminación natural, ya sea en edificaciones existentes o en edificaciones en fase de diseño.

El diseñador de un sistema de iluminación natural debe tener en cuenta varios aspectos al momento de implementar tecnologías de iluminación natural, tales como: la elección del lugar, orientación, forma y dimensiones del edificio, influencia de las construcciones aledañas, superficies del suelo que lo rodea, selección de la toma de luz natural, entre otros, que garanticen una adecuada operación del sistema.

Un procedimiento para realizar el diseño de un sistema de iluminación natural comienza con la medición del nivel de iluminación sobre la superficie de trabajo, seguido de la medición del potencial de iluminación sobre la fachada exterior, determinación de la curva del factor de iluminación natural, calcular la matriz del nivel de iluminación sobre el plano de trabajo, comparar las curvas FIN obtenida y la publicada y por último, evaluar el ahorro energético generado por la tecnología.

El aprovechamiento de la luz natural en el sistema de iluminación de una edificación no debe desencadenar en problemas de sobrecalentamiento debido al ingreso de rayos directos de luz solar o exceder en la utilización de superficies acristaladas que puedan interferir en la privacidad de los ocupantes.

La obtención del nivel de iluminación en el exterior de la edificación puede ser realizada mediante la utilización de instrumentos de medición o mediante la

implementación de métodos matemáticos que permiten calcular las diferentes componentes de luz natural, tanto en superficies horizontales como en superficies inclinadas, para posteriormente ser calculada la fracción de luz dirigida al interior de la edificación.

El desarrollo de herramientas computacionales para el análisis y simulación de sistemas de iluminación es muy amplio y ha sido un factor fundamental para el diseño de sistemas de iluminación artificial, sin embargo, en la actualidad el desarrollo de herramientas para la realización de estudios relacionados con las prestaciones lumínicas de tecnologías de iluminación natural no es tan amplio.

✓ **Procedimiento para la selección de tecnologías de iluminación.**

La definición de los criterios de selección de las tecnologías de iluminación, tanto natural como artificial depende directamente del diseñador, quien es la persona más idónea para tomar este tipo de decisiones, basándose en las necesidades y requerimientos de cada área. Una herramienta valiosa para la toma de este tipo de decisiones es el método de selección multicriterio creado por Thomas L Saaty, el cual facilita la toma de una decisión bajo múltiples criterios basándose en la jerarquización de los criterios y alternativas de solución.

De la buena elección de la tecnología de iluminación, sea natural o artificial, depende el correcto funcionamiento del sistema de iluminación de una edificación, identificando los requerimientos lumínicos de cada área, para así implementar la tecnología que ofrezca las mejores prestaciones.

✓ **Identificación de protocolos domóticos de mejores prestaciones para sistemas de iluminación mixtos.**

Se planteó un ejemplo de selección de tecnologías de iluminación natural y artificial basado en la implementación del método de selección multi-criterio creado por Thomas L. Saaty, indicándose un procedimiento que parte desde la ponderación de los sub-criterios y criterios mediante una comparación pareada

entre cada uno de estos, para finalmente obtener la tecnología que brinde las mejores prestaciones para la automatización de un sistema de iluminación mixto.

Una fase esencial en el diseño de un edificio automatizado es la selección de la tecnología de comunicación que permita la interacción entre los elementos que conforman la red de automatización. Son varios los criterios a tener en cuenta en la selección de esta tecnología como por ejemplo: costo, disponibilidad, adaptabilidad a componentes de diferentes fabricantes, etc. Es por esto que la elección de una tecnología abierta es una buena opción para ser implementada en un sistema inmótico.

✓ **Guía para el diseño de estrategias de automatización de los sistemas de iluminación mixtos.**

Se planteó un procedimiento que permite la planeación de la estrategia de control para el sistema de iluminación de una edificación, partiendo de la sectorización de la edificación según la tarea que se vaya a desarrollar en ella, seguidamente se realiza la selección del tipo de sensor a utilizar para cada área, identificación del sistema de control según su propósito, ya sea protección al deslumbramiento, control de derroche por factor ocupacional, entre otros, para finalmente juntar en una estrategia de control.

Las recomendaciones sobre los niveles de iluminación adecuados presentes en las diferentes normativas que regulan los sistemas de iluminación, es uno de los factores que hacen que se creen estrategias de automatización y control en los sistemas de iluminación que garanticen dichos niveles y por ende brindar los requerimientos lumínicos requeridos para cada actividad mientras se está contribuyendo con el ahorro de energía eléctrica destinada a iluminación.

La estrategia de control requerida para la integración e implementación de los diferentes dispositivos sensores, actuadores y controladores hace que un sistema de control de la iluminación desempeñe su labor de forma adecuada, evitando que

se presenten problemas de encendido o apagado de lámparas producto del accionamiento del sistema debido a señales de ruido recibidas por los sensores.

Una integración adecuada de los elementos sensores de tipo ocupacional, ópticos o de temporización permite garantizar un adecuado uso del sistema de iluminación sin que se lleguen a presentar pérdidas de energía eléctrica producto, por ejemplo, del derroche por factor ocupacional o excesos en el nivel de iluminación en algunas áreas.

8.2 RECOMENDACIONES

Se invita a la creación o fortalecimiento de un grupo de investigación integrado por estudiantes y profesionales en las áreas de electrónica, sistemas y afines que tenga como objetivo el estudio e implementación de aplicaciones domóticas e inmóticas, así como el desarrollo de herramientas computacionales que contribuyan al análisis y diseño de sistemas de iluminación natural.

Se considera pertinente la realización de un estudio detallado, con fines académicos e ilustrativos, correspondiente al diseño de un prototipo de sistema de iluminación mixto, el cual permita la implementación experimental de gran variedad de las tecnologías de iluminación natural con el objetivo de obtener información de su desempeño lumínico, curvas de factor de iluminación natural, entre otros, en la región tropical, ya que la mayoría de los estudios son realizados en zonas de altas latitudes.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] http://www.consumer.es/web/es/medio_ambiente/urbano/2005/10/20/146299.php (última consulta enero del 2011).
- [2] <http://espaciosolar.blogspot.com/2009/09/eficiencia-energetica-en-edificios-de.html> (última consulta enero del 2011).
- [3] Una mejor iluminación reduciría el consumo energético. Disponible en: <http://news.soliclima.com/noticias/electricidad/una-mejor-iluminacion-reduciria-el-consumo-energetico-en-torno-a-un-40/forum/> (última consulta marzo del 2011).
- [4] Edificios verdes. Disponible en: http://www.bierzosostenible.com/media/uploads/tema_mes/TMnoviembre.pdf. (Última consulta septiembre del 2011).
- [5] Construcciones del presente para garantizar el futuro. Disponible en: http://www.arpsura.com/index.php?option=com_content&task=view&id=1803&Itemid=174. (última consulta septiembre del 2011).
- [6] DEPARTMENT OF HOUSING AND URBAN DEVELOPMENT. ECOWISE. Edificios verdes. Disponible en: http://portal.hud.gov/hudportal/documents/huddoc?id=DOC_10644.pdf (última consulta 20 de septiembre 2011).
- [7] IILSEN México. Universidad Nacional Autónoma de México, Centro de Investigación Energética, Coordinación de Planeación Energética - Nuevas energías renovables: una alternativa energética sustentable para México (análisis y propuesta). Disponible en: http://xml.cie.unam.mx/xml/se/pe/NUEVAS_ENERG_RENOV.pdf (última consulta junio del 2011).
- [8] MONROY, Manuel Martín; RAMOS TRUJILLO, Matías; SANTANA RODRIGEZ, Roberto y CORRAL TORRES, Isabel. Calidad ambiental en edificación para las palmas de gran canaria. Islas Canarias, manuales de diseño ICARO. Manual de iluminación. Disponible en: <http://es.scribd.com/doc/17307495/Lighting-Handbook-Manual-de-iluminacion-ICARO> (última consulta febrero del 2011).
- [9] LEÓN, Adrian Javier. LIGHTING. Atlantic International University Honolulu, Hawaii, 2007.

- [10] INTERNATIONAL ENERGY AGENCY. ENERGY CONSERVATION IN BUILDINGS AND COMMUNITY SYSTEM PROGRAMABLE. Daylight in buildings – a source book on day lighting system and components. Disponible en: <http://gaia.lbl.gov/iea21/ieadownload.htm> (última consulta enero del 2011).
- [11] DEPARTAMENTO DE LUMINOTÉCNIA LUZ Y VISIÓN DE LA UNT. Manual de Iluminación Eficiente ELI Argentina. Editorial de la Universidad Tecnológica Nacional U.T.N. – Argentina. Disponible en: <http://es.scribd.com/doc/25106417/Lighting-Handbook-Manual-de-Iluminacion-Eficiente-ELI> (última consulta enero del 2011).
- [12] COMITÉ ESPAÑOL DE ILUMINACIÓN (CEI), INSTITUTO PARA LA DIVERSIFICACIÓN Y AHORRO DE LA ENERGÍA (IDAE). Guía técnica. Aprovechamiento de la luz natural en la iluminación de edificios. Disponible en: <http://es.scribd.com/doc/5201816/Lighting-Handbook-Guia-Iluminacion-Luz-Natural-Oficinas> (última consulta febrero del 2011).
- [13] GUTIÉRREZ MANDUJANO, María de Lourdes. Aprovechamiento eficiente de luz diurna en las aulas tipo CAPFCE de la Universidad de colima, campus Coquimatlán. Disponible en: http://digeset.ucol.mx/tesis_posgrado/Pdf/Maria_de_Lourdes_Gutierrez_Mandujano.pdf.
- [14] <http://www.espaciosolar.com/heliostatos.htm> (última consulta noviembre 2011).
- [15] MINISTERIO DE MINAS Y ENERGÍA, Colombia. Reglamento técnico de iluminación y alumbrado público RETILAP.
- [16] GESCOM. Lámparas de inducción electromagnética. Disponible en: http://www.gescomchile.com/files/gescom_100215_iem_-_alta_eficacia_luminica-6.pdf (última consulta febrero del 2011).
- [17] DEPARTAMENTO DE LUMINOTÉCNIA LUZ Y VISIÓN DE LA UNT. Manual de Iluminación Eficiente ELI Argentina. Fuentes luminosas. Editorial de la Universidad Tecnológica Nacional U.T.N. – Argentina. Disponible en: <http://www1.herrera.unt.edu.ar/faceyt/dllyv/publicaciones/manual-de-iluminacion-eficiente-eli/> (última consulta enero del 2011).

[18] UNIDAD DE PLANEACIÓN MINERO ENERGÉTICA, INSTITUTO DE HIDROLOGÍA, METEOROLOGÍA Y ESTUDIOS AMBIENTALES. Colombia. Atlas de radiación solar de Colombia. Disponible en: www.upme.gov.co/Docs/Atlas_Radiacion_Solar/0-Primera_Parte.pdf (última consulta enero del 2011).

[19] LLANOS MORA, López. RAMÍREZ SANTIGOSA, Lourdes. Caracterización, medida y evaluación de la radiación solar. Universidad internacional de Andalucía. Disponible en: <http://ocw.unia.es/ciencias-de-la-ingenieria/caracterizacion-y-evaluacion-de-la-radiacion-solar>
Link: Download this course (última consulta octubre del 2011).

[20] SOLARTRONIC S.A. Radiación global, directa y difusa, en superficies horizontales e inclinadas para la republica de mexico, 2003. Disponible en: <http://www.solartronic.com/download/radiacion.pdf> (última consulta enero del 2011).

[21] [http://www.iluminet.com.mx/seleccion-de-software-de-diseno-de-iluminación/](http://www.iluminet.com.mx/seleccion-de-software-de-diseno-de-iluminacion/) (última consulta agosto del 2011).

[22] PROYECTO REGIONAL, SANTIAGO DE CHILE. INFORMACIÓN SOBRE TIERRAS Y AGUAS PARA UN DESARROLLO AGRÍCOLA SOSTENIBLE. El AHP (proceso analítico jerárquico) y su aplicación para determinar los usos de las tierras – en el caso de Brasil”. Año 2000. Disponible en: http://download.polytechnic.edu.na/pub4/download.sourceforge.net/pub/sourceforge/m/project/me/metrochocicano/eManuales/2_AHP.pdf (última consulta enero del 2011).

[23] VELAZCO CAPACHO, Daniel Alexander. Trabajo de investigación de maestría. Evaluación de alternativas de comunicación para los parámetros de calidad de potencia de media tensión y medidas de los consumos de energía de baja tensión. Biblioteca UIS.

[24] <http://www.domotiksite.com> (última consulta enero 2011)

[25] <http://estudioti.blogspot.com/2010/09/domotica-inmotica-urbotica-definicion.html> (última consulta enero 2011)

[26] <http://www.guia-urbana.com/calidad-de-vida/concepto-de-inmotica.php> (última consulta enero 2011).

[27] ALVARADO PÉREZ, Jhon Dairo, BARAJAS GUAVA, Cesar. “Estudio técnico de potenciales aplicaciones domóticas en seguridad para el edificio eléctrica II”. Universidad Industrial de Santander. Colombia. Biblioteca UIS

[28] Página oficial. www.ingecasa.com, sistema EIB. (última consulta febrero 2011).

[29] Siemens INSTABUS EIB, gamma wave. Disponible en: <http://domotica.dis.ulpgc.es/DyCE/Instabus03.pdf> (última consulta enero 2011).

[30] www.domodesk.com (última consulta mayo 2011)

[31] LONUSERS ESPAÑA. Introducción a la tecnología LONWORKS. Disponible en: http://www.lonmark.es/Ator_User/media/documentos/DOCUMENTOS%20%C3%89CNICOS/Introducci%C3%B3n%20Tecnolog%C3%ADa%20LonWorks.pdf (última consulta marzo del 2011).

[32] INGENIERÍA DE SISTEMAS Y AUTOMÁTICA (ISA). Sistema LONWORKS. Disponible en: <http://isa.uniovi.es/docencia/AutomEdificios/presenta%20AldeE%2008-09.pdf> (última consulta febrero del 2011).

[33] INFANTES DÍAS, Juan Antonio. Descripción de x-10. Departamento lenguajes y ciencias de la computación, universidad de Málaga 2009. Disponible en: <http://forja.rediris.es/frs/download.php/1088/X10.pdf>

[34] <http://ingecasa.com/sistema%20eib.pdf> (última consulta julio de 2011)

[35] <http://pictronico.com/sensores/pir> (última consulta 12 julio de 2011).

[36] <http://www.bticino.com.mx/productos.asp?lonidcategoria=41> (última consulta 12 julio de 2011).

[37] ORTIZ YÁÑES, Rubén. El control eléctrico en los sistemas de edificios inteligentes. Disponible en: <http://www.slideshare.net/jhonny6969/edificios-inteligentes-y-su-control> (última consulta abril del 2011).

[38] <http://knxforum.com/articulos> (última consulta enero del 2011).

[39] <http://www.espaciosolar.com/tubo-de-luz-flat-top.htm> (última consulta noviembre del 2010)

- [40] ANDREW W, Charleson. La estructura como arquitectura. 2005. Disponible en: http://books.google.com.co/books?id=KO4BisNIYTQC&pg=PA4&lpg=PA4&dq=ANDREW+W,+Charleson.+La+estructura+como+arquitectura.+2005.&source=bl&ots=EEnOEP74iw&sig=TUIAd0oKWvDsGRbVtqP9Z96tgE&hl=es&ei=FtPCTrHoF4eFtge3oPDSQ&sa=X&oi=book_result&ct=result&resnum=1&sqi=2&ved=0CBkQ6AEwAA#v=onepage&q&f=false (última consulta febrero del 2011).
- [41] <http://www.ingenieroambiental.com/3008/CENTRALES%20TERMOSOLARES.pdf> (última consulta agosto 2011)
- [42] FLAMENT, Michel. Técnicas de planeación estratégica, métodos multi-criterio. Septiembre del 2007. Disponible en: [http://www.fing.edu.uy/iimpi/academica/grado/proyecto/MetodosMulticriterio-Flament\(2008\).pdf](http://www.fing.edu.uy/iimpi/academica/grado/proyecto/MetodosMulticriterio-Flament(2008).pdf) (última consulta abril del 2011).
- [43] TAPIA MARTÍNEZ, Dante Israel. Tesis maestro en ciencias área telemática, Desarrollo e implementación de un sistema domótico en un hogar del estado de colima. Disponible en: [http://digeset.uco.mx/tesis_posgrado/Pdf/Dante Israel Tapia Martinez.pdf](http://digeset.uco.mx/tesis_posgrado/Pdf/Dante%20Israel%20Tapia%20Martinez.pdf) (última consulta marzo del 2011).
- [44] ORGHIDAN, Radu. Domótica. Universidad de Girona. España. Disponible en: <http://eia.udg.es/~radu/downloads/Domotica.pdf>
- [45] Página oficial de VELUX, disponible en <http://www.viz.velux.com/> (última consulta noviembre del 2011).
- [46] Página oficial de sol-arq, disponible en <http://www.sol-arq.com/> (última consulta noviembre del 2011).
- [47] Página de consulta [http://perusolar.org/17-spes-ponencias/08-Biomasa/PreciadoOlveraOscarUlises/Preciado Olvera Oscar Ulises.pdf](http://perusolar.org/17-spes-ponencias/08-Biomasa/PreciadoOlveraOscarUlises/Preciado%20Olvera%20Oscar%20Ulises.pdf) (última consulta noviembre de 2011).
- [48] Página oficial de <http://www.daysim.com/> (última consulta noviembre de 2011).
- [49] Página oficial de <http://www.solarspot.org/> (última consulta noviembre de 2011).

ANEXOS

ANEXO A. ASIGNACIÓN DE LAS PRIORIDADES DE LOS CRITERIOS DE SELECCIÓN DE LA TECNOLOGÍA DE ILUMINACIÓN NATURAL.

A continuación se procede a realizar la asignación de las prioridades entre los criterios, realizar la comprobación de la consistencia en las asignaciones y posteriormente realizar la asignación técnica de cada criterio para cada alternativa. La Tabla 74 muestra el desarrollo de la selección de la tecnología de iluminación natural mediante la utilización del método de selección multi-criterio AHP, el algoritmo para el desarrollo de este método de selección es realizado sobre la plataforma de EXCEL, como una manera de ilustrar el procedimiento a seguir para obtener la selección de tecnologías.

Para la asignación de los pesos en la matriz R, teniendo en cuenta la ubicación y comportamiento de la luz natural al interior del salón LP 214, el cual se tomó como modelo para dicha aplicación, se percibe la importancia y la necesidad de un aporte de luz natural de forma cenital en las áreas alejadas de la ventana. Con tales argumentos se procede a asignar los valores (escala de Saaty, tabla 59) de peso comparativo entre los múltiples sub-criterios.

Tabla 73. Selección de la tecnología de iluminación natural utilizando el método AHP.

Elaboración de la matriz de valores asignados por el decisor para los atributos técnicos.								
CNL	Permite control del nivel de luz	Asignación para la matriz (R)						
PMI	Profundidad media de iluminación	CNL	PMI	PD	VE	AT	AF	M
PD	Protección al deslumbramiento	1	1/7	1/2	2	1/7	2	1/2
VE	Permite la vista al exterior	7	1	7	7	2	7	3
AT	Aplicable en techos	2	1/7	1	1/2	1/5	1	2
AF	Aplicable en la fachada	1/2	1/7	2	1	1/2	1	2
M	Mantenimiento	7	1/2	5	2	1	1/5	2
		1/2	1/7	1	1	5	1	1
		2	1/3	1/2	1/2	1/2	1	1

Los recuadros sombreados son el recíproco de las preferencias asignadas por parte del decisor, teniendo en cuenta que se toma el nivel de importancia del elemento fila sobre el elemento columna. Los atributos técnicos de la diagonal principal tienen definido el valor 1.

Tabla 74. (Continuación)

Normalización de la matriz asignada por el decisor (R).							
Matriz normalizada							
	CNL	PMI	PD	VE	AT	AF	M
CNL	0,050	0,059	0,029	0,143	0,015	0,152	0,043
CNL	0,350	0,416	0,412	0,500	0,214	0,530	0,261
CNL	0,100	0,059	0,059	0,036	0,021	0,076	0,174
CNL	0,025	0,059	0,118	0,071	0,054	0,076	0,174
CNL	0,350	0,208	0,294	0,143	0,107	0,015	0,174
CNL	0,025	0,059	0,059	0,071	0,535	0,076	0,087
CNL	0,100	0,139	0,029	0,036	0,054	0,076	0,087
<p>La normalización se calcula tomando el elemento a normalizar (cada una de los valores de la matriz) y dividiéndolo entre la suma de la columna a la cual pertenece.</p>							
Cálculo del vector de pesos para los criterios de selección							
W		X	λ				
Vector de pesos		R*W	X/W				
CNL	0,08	0,327	4,657				
PMI	0,38	1,97	5,158				
PD	0,08	0,312	4,153				
VE	0,08	0,322	3,912				
AT	0,18	1,223	6,633				
AF	0,13	0,247	1,897				
M	0,07	0,347	4,672				
Total	1,000						
<p>Al realizar el cálculo de cada peso, se obtienen los resultados para CNL, PMI, PD, VE, AT, AF, M. Este valor se calcula promediando las filas de la matriz anterior y tomando el promedio ponderado para criterio. Según estos cálculos el porcentaje para cada uno es el siguiente:</p>							
Vector de pesos							
CNL	8%						
PMI	38%						
PD	8%						
VE	8%						
AT	18%						
AF	13%						
M	7%						
Total	100%						
Obtención del valor propio único, índice de consistencia, índice de consistencia aleatorio y la razón de consistencia de los atributos técnicos.							
Lambda Máximo		λmax	6,633				
Índice de consistencia		IC	-0,06				
Índice de aleatoriedad		n	7				
		IA	1,32				
Razón de consistencia		RC	-0,05				
<p>El cálculo de la razón de consistencia corresponde a 0,05, producto de la división entre el índice de consistencia calculado y el índice de consistencia aleatorio. Si la razón de consistencia es mayor a 0,10 entonces las asignaciones del decisor son inconsistentes.</p>							

Tabla 74. (Continuación)

Ingreso de los valores de los atributos técnicos								
1: Limitado desarrollo para el parámetro en el diseño 2: Desarrollo moderado para el parámetro en el diseño 3: Altísimo desarrollo para el parámetro en el diseño								
Tecnología		CNL	PMI	PD	VE	AT	AF	M
1	Estantes de luz	3	2	3	3	1	3	2
2	Cortinas y sistemas de persianas	3	1	3	1	1	3	2
3	Paneles prismáticos	1	1	2	1	1	3	2
4	paneles cortados a laser	2	2	2	1	1	3	2
5	Tragaluz angular selectivo	1	3	3	1	3	1	2
6	Guía de luz sombreada	2	3	3	3	1	3	2
7	Cristal conductor solar	1	2	2	1	1	3	2
8	Vidrio de luz cenital con HEO	1	2	1	2	1	3	2
9	<i>Persianas solares anidólicas</i>	1	2	3	1	1	3	2
10	<i>sistemas de sombreado direccional</i>	2	2	3	1	3	3	1
11	<i>Techos anidólicos</i>	2	3	2	3	3	3	2
12	<i>Aberturas anidólicas cenitales</i>	1	3	1	1	3	1	2
13	<i>Heliostatos</i>	2	1	1	3	2	2	2
14	<i>Ductos de fibra óptica</i>	3	3	1	2	3	3	2
15	<i>Ductos solares</i>	2	3	2	3	3	2	2
	<i>Máximo valor</i>	3	3	3	3	3	3	2

El diseñador del sistema de iluminación, luego de tener la información de las características técnicas de cada una de las alternativas, da una ponderación que cuantifica el desarrollo de cada uno de los criterios para cada una de las alternativas tecnológicas con las que se cuente.

Tabla 74. (Continuación)

Normalización de la matriz del análisis técnico								
Tecnología		CNL	PMI	PD	VE	AT	AF	M
1	Estantes de luz	1,000	0,667	1,000	1,000	0,333	1,000	1,000
2	Cortinas y sistemas de persianas	1,000	0,333	1,000	0,333	0,333	1,000	1,000
3	Paneles prismáticos	0,333	0,333	0,667	0,333	0,333	1,000	1,000
4	paneles cortados a laser	0,667	0,667	0,667	0,333	0,333	1,000	1,000
5	Tragaluz angular selectivo	0,333	1,000	1,000	0,333	1,000	0,333	1,000
6	Guía de luz sombreada	0,667	1,000	1,000	1,000	0,333	1,000	1,000
7	Cristal conductor solar	0,333	0,667	0,667	0,333	0,333	1,000	1,000
8	Vidrio de luz cenital con HEO	0,333	0,667	0,333	0,667	0,333	1,000	1,000
9	<i>Persianas solares anidólicas</i>	0,33333	0,666666667	1	0,33333	0,33333	1	1
10	<i>sistemas de sombreado direccional</i>	0,66667	0,666666667	1	0,33333	1	1	0,5
11	<i>Techos anidólicos</i>	0,66667	1	0,66667	1	1	1	1
12	<i>Aberturas anidólicas cenitales</i>	0,33333	1	0,33333	0,33333	1	0,33333333	1
13	<i>Heliostatos</i>	0,66667	0,333333333	0,33333	1	0,66667	0,66666667	1
14	<i>Ductos de fibra óptica</i>	1	1	0,33333	0,66667	1	1	1
15	<i>Ductos solares</i>	0,66667	1	0,66667	1	1	0,66666667	1

Esta ponderación se realiza tomando cada elemento de la matriz de atributos técnicos y dividiéndolo en el valor máximo presente en la columna a la cual pertenece.

Posiciones obtenidas para cada tecnología		
Tecnología	Ponderación	Puesto
Estantes de luz	0,675	6
Cortina y sistema de persianas	0,493	13
Panel prismático	0,421	15
panel cortado a laser	0,572	10
Tragaluz angular selectivo	0,701	5
Guía de luz sombreada	0,780	4
Cristal conductor solar	0,549	12
Vidrio de luz cenital con HEO	0,551	11
Persiana solar anidólica	0,574	9
sistema de sombreado direccional	0,611	8
Techo anidólico	0,810	1
Abertura anidólica cenital	0,651	7
Heliostato	0,474	14
Ducto de fibra óptica	0,781	3
Ducto solar	0,782	2

Según los valores ingresados por el decisor en la matriz de atributos técnicos para cada criterio y multiplicada por el vector de peso para cada criterio se obtiene el ranking o el puesto para cada tecnología.

Para el ejemplo que se desarrolló la metodología, se obtuvo como primera opción la implementación de un techo anidólico cenital y como segunda opción ductos solares.



ANEXO B: ASIGNACION DE LAS PRIORIDADES DE LOS CRITERIOS DE SELECCIÓN PARA LAS TECNOLOGÍAS DE ILUMINACIÓN ARTIFICIAL.

En las Tablas 75 y 76 se presenta la asignación de prioridades para cada sub-criterio. Cabe resaltar que la valoración de los criterios depende del diseñador, quien es la persona idónea para referirse a las necesidades y ubicación del área a iluminar.

Tabla 74. Ponderación para los sub-criterios que conforman el CRITERIO TÉCNICO.

Elaboración de la matriz de valores asignados por el decisor para los ATRIBUTOS TÉCNICOS.																																															
NI	Nivel de Iluminación																																														
RC	Reproducción Cromatográfica																																														
TC	Temperatura de Color																																														
S	Seguridad																																														
C	Control																																														
		Asignación de las ponderaciones dadas por el decisor																																													
		NI	RC	TC	S	C																																									
NI		1	1	2	3	2																																									
RC		1	1	2	3	1																																									
TC		1/2	1/2	1	2	1																																									
S		1/3	1/3	1/2	1	1/2																																									
C		1/2	1	1	2	1																																									
<p>En los recuadros sombreados se deben asignar las preferencias por parte del decisor, teniendo en cuenta que se toma el nivel de importancia del elemento fila sobre el elemento columna. Los atributos técnicos de la diagonal principal tienen definido el valor 1. Las preferencias de los elementos columna sobre las filas es el recíproco del asignado por el decisor.</p>																																															
Normalización de la matriz asignada para los atributos técnicos por el decisor.																																															
<table border="1"> <thead> <tr> <th colspan="6">Matriz normalizada</th> </tr> <tr> <th></th> <th>NI</th> <th>RC</th> <th>TC</th> <th>S</th> <th>C</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>NI</td> <td>0.300</td> <td>0.261</td> <td>0.308</td> <td>0.273</td> <td>0.364</td> </tr> <tr> <td>RC</td> <td>0.300</td> <td>0.261</td> <td>0.308</td> <td>0.273</td> <td>0.182</td> </tr> <tr> <td>TC</td> <td>0.150</td> <td>0.130</td> <td>0.154</td> <td>0.182</td> <td>0.182</td> </tr> <tr> <td>S</td> <td>0.100</td> <td>0.087</td> <td>0.077</td> <td>0.091</td> <td>0.091</td> </tr> <tr> <td>C</td> <td>0.150</td> <td>0.261</td> <td>0.154</td> <td>0.182</td> <td>0.182</td> </tr> </tbody> </table>						Matriz normalizada							NI	RC	TC	S	C	NI	0.300	0.261	0.308	0.273	0.364	RC	0.300	0.261	0.308	0.273	0.182	TC	0.150	0.130	0.154	0.182	0.182	S	0.100	0.087	0.077	0.091	0.091	C	0.150	0.261	0.154	0.182	0.182
Matriz normalizada																																															
	NI	RC	TC	S	C																																										
NI	0.300	0.261	0.308	0.273	0.364																																										
RC	0.300	0.261	0.308	0.273	0.182																																										
TC	0.150	0.130	0.154	0.182	0.182																																										
S	0.100	0.087	0.077	0.091	0.091																																										
C	0.150	0.261	0.154	0.182	0.182																																										
<p>La normalización se calcula tomando el elemento a normalizar y dividiéndolo entre la suma de la columna a la cual pertenece.</p>																																															

Tabla 75. (Continuación)

Cálculo del vector de pesos de los atributos técnicos.																																																																												
	W	X	λ		Al realizar el cálculo de cada peso, se obtienen los resultados para NI, RC, TC, S, C. Este valor se calcula promediando las filas de la matriz anterior.																																																																							
	Vector de pesos	R*W	X/W																																																																									
NI	0.301	1.24	5.062																																																																									
RC	0.265	1.33	5.056																																																																									
T	0.160	0.806	5.053																																																																									
	0.089	0.450	5.052																																																																									
C	0.186	0.939	5.055		<table border="1" style="width: 100%; border-collapse: collapse;"> <thead> <tr> <th colspan="2" style="text-align: center;">Ponderación</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>NI</td> <td style="text-align: center;">30,1%</td> </tr> <tr> <td>RC</td> <td style="text-align: center;">25.65%</td> </tr> <tr> <td>TC</td> <td style="text-align: center;">16%</td> </tr> <tr> <td>S</td> <td style="text-align: center;">8,9%</td> </tr> <tr> <td>C</td> <td style="text-align: center;">18,6%</td> </tr> <tr> <td>Total</td> <td style="text-align: center;">100%</td> </tr> </tbody> </table>		Ponderación		NI	30,1%	RC	25.65%	TC	16%	S	8,9%	C	18,6%	Total	100%																																																								
Ponderación																																																																												
NI	30,1%																																																																											
RC	25.65%																																																																											
TC	16%																																																																											
S	8,9%																																																																											
C	18,6%																																																																											
Total	100%																																																																											
Obtención de los valores propios individuales, índice de consistencia, índice de consistencia aleatorio y razón de consistencia de la matriz de los atributos técnicos.																																																																												
<table border="1" style="width: 100%; border-collapse: collapse;"> <tbody> <tr> <td>Lambda Máximo</td> <td>λ_{max}</td> <td style="text-align: center;">5,062</td> </tr> <tr> <td>Índice de Consistencia</td> <td>IC</td> <td style="text-align: center;">0,015</td> </tr> <tr> <td rowspan="2">Índice de aleatoriedad</td> <td>n</td> <td style="text-align: center;">5</td> </tr> <tr> <td>IA</td> <td style="text-align: center;">1,12</td> </tr> <tr> <td>Razón de consistencia</td> <td>RC</td> <td style="text-align: center;">0,013</td> </tr> </tbody> </table>				Lambda Máximo	λ_{max}	5,062	Índice de Consistencia	IC	0,015	Índice de aleatoriedad	n	5	IA	1,12	Razón de consistencia	RC	0,013	El cálculo de la razón de consistencia corresponde a 0,013, debido a que es la división entre el índice de consistencia calculado y el índice de consistencia aleatorio. Si la razón de consistencia es mayor a 0,10 entonces las asignaciones del decisor son inconsistentes.																																																										
Lambda Máximo	λ_{max}	5,062																																																																										
Índice de Consistencia	IC	0,015																																																																										
Índice de aleatoriedad	n	5																																																																										
	IA	1,12																																																																										
Razón de consistencia	RC	0,013																																																																										
Análisis técnico																																																																												
<table border="1" style="width: 100%; border-collapse: collapse;"> <thead> <tr> <th colspan="7" style="text-align: left; padding: 5px;"> 1: Limita desarrollo del parámetro en el diseño 2: Desarrollo moderado del parámetro en el diseño 3: Altísimo desarrollo del parámetro en el diseño </th> </tr> <tr> <th colspan="2" style="text-align: left;">Tecnología de iluminación Artificial</th> <th>NI</th> <th>RC</th> <th>TC</th> <th>S</th> <th>C</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td style="text-align: center;">1</td> <td>Lámpara de inducción electromagnética</td> <td style="text-align: center;">2</td> <td style="text-align: center;">1</td> <td style="text-align: center;">1</td> <td style="text-align: center;">2</td> <td style="text-align: center;">2</td> </tr> <tr> <td style="text-align: center;">2</td> <td>Lámpara de mercurio a alta presión</td> <td style="text-align: center;">2</td> <td style="text-align: center;">1</td> <td style="text-align: center;">2</td> <td style="text-align: center;">2</td> <td style="text-align: center;">2</td> </tr> <tr> <td style="text-align: center;">3</td> <td>Lámpara de mercurio de baja presión</td> <td style="text-align: center;">2</td> <td style="text-align: center;">2</td> <td style="text-align: center;">2</td> <td style="text-align: center;">2</td> <td style="text-align: center;">1</td> </tr> <tr> <td style="text-align: center;">4</td> <td>Lámpara de vapor de mercurio con alógenos</td> <td style="text-align: center;">2</td> <td style="text-align: center;">2</td> <td style="text-align: center;">1</td> <td style="text-align: center;">1</td> <td style="text-align: center;">2</td> </tr> <tr> <td style="text-align: center;">5</td> <td>Lámpara de sodio a baja presión</td> <td style="text-align: center;">2</td> <td style="text-align: center;">1</td> <td style="text-align: center;">1</td> <td style="text-align: center;">2</td> <td style="text-align: center;">1</td> </tr> <tr> <td style="text-align: center;">6</td> <td>Lámpara de sodio de alta presión</td> <td style="text-align: center;">2</td> <td style="text-align: center;">1</td> <td style="text-align: center;">1</td> <td style="text-align: center;">1</td> <td style="text-align: center;">1</td> </tr> <tr> <td style="text-align: center;">7</td> <td>Lámparas LED</td> <td style="text-align: center;">2</td> <td style="text-align: center;">1</td> <td style="text-align: center;">2</td> <td style="text-align: center;">3</td> <td style="text-align: center;">2</td> </tr> <tr> <td colspan="2" style="text-align: right;">Máximo Valor</td> <td style="text-align: center;">2</td> <td style="text-align: center;">2</td> <td style="text-align: center;">2</td> <td style="text-align: center;">3</td> <td style="text-align: center;">2</td> </tr> </tbody> </table>							1: Limita desarrollo del parámetro en el diseño 2: Desarrollo moderado del parámetro en el diseño 3: Altísimo desarrollo del parámetro en el diseño							Tecnología de iluminación Artificial		NI	RC	TC	S	C	1	Lámpara de inducción electromagnética	2	1	1	2	2	2	Lámpara de mercurio a alta presión	2	1	2	2	2	3	Lámpara de mercurio de baja presión	2	2	2	2	1	4	Lámpara de vapor de mercurio con alógenos	2	2	1	1	2	5	Lámpara de sodio a baja presión	2	1	1	2	1	6	Lámpara de sodio de alta presión	2	1	1	1	1	7	Lámparas LED	2	1	2	3	2	Máximo Valor		2	2	2	3	2
1: Limita desarrollo del parámetro en el diseño 2: Desarrollo moderado del parámetro en el diseño 3: Altísimo desarrollo del parámetro en el diseño																																																																												
Tecnología de iluminación Artificial		NI	RC	TC	S	C																																																																						
1	Lámpara de inducción electromagnética	2	1	1	2	2																																																																						
2	Lámpara de mercurio a alta presión	2	1	2	2	2																																																																						
3	Lámpara de mercurio de baja presión	2	2	2	2	1																																																																						
4	Lámpara de vapor de mercurio con alógenos	2	2	1	1	2																																																																						
5	Lámpara de sodio a baja presión	2	1	1	2	1																																																																						
6	Lámpara de sodio de alta presión	2	1	1	1	1																																																																						
7	Lámparas LED	2	1	2	3	2																																																																						
Máximo Valor		2	2	2	3	2																																																																						

Tabla 74. (Continuación)

NORMALIZACIÓN						
Tecnología		NI	RC	TC	S	C
1	Lámpara de inducción electromagnética	1,000	0,500	0,500	0,667	1,000
2	Lámpara de mercurio a alta presión	1,000	0,500	1,000	0,667	1,000
3	Lámpara de mercurio de baja presión	1,000	1,000	1,000	0,667	0,500
4	Lámpara de vapor de mercurio con alógenos	1,000	1,000	0,500	0,333	1,000
5	Lámpara de sodio a baja presión	1,000	0,500	0,500	0,667	0,500
6	Lámpara de sodio de alta presión	1,000	0,500	0,500	0,333	0,500
7	Lámparas LED	1,000	0,500	1,000	1,000	1,000

Ranking según el criterio técnico		
Tecnología	Crit. Técnico	Puesto
Lámpara de inducción electromagnética	0,758	5
Lámpara de mercurio a alta presión	0,838	4
Lámpara de mercurio de baja presión	0,877	1
Lámpara de vapor de mercurio con alógenos	0,861	3
Lámpara de sodio a baja presión	0,665	6
Lámpara de sodio de alta presión	0,636	7
Lámparas LED	0,868	2



Tabla 75. Ponderación para los sub-criterios que conforman el CRITERIO ECONÓMICO.

Elaboración de la matriz de valores asignados por el decisor para los CRITERIOS ECONÓMICOS

AE	Ahorro de Energía
CO	Costo
VU	Vida Útil
MAN	Mantenimiento

R	AE	CO	VU	MAN
AE	1	1	1	2
CO	1	1	1	2
VU	1	1	1	2
MAN	1/2	1/2	1/2	1

En los recuadros sombreados se deben asignar las preferencias por parte del decisor, teniendo en cuenta que se toma el nivel de importancia del elemento fila sobre el elemento columna. Los criterios de la diagonal principal tienen definido el valor 1. Las preferencias de los elementos columna sobre las filas es el recíproco del asignado por el decisor.

Normalización de la matriz asignada para los criterios de selección por el decisor.

Matriz Normalizada R (MNR)				
R	AE	CO	VU	MAN
AE	0.286	0.286	0.286	0.286
CO	0.286	0.286	0.286	0.286
VU	0.286	0.286	0.286	0.286
MAN	0.143	0.143	0.143	0.143

La normalización de la matriz R se realiza tomando cada elemento de la matriz y dividiéndolo en la suma de la columna a la cual pertenece.

Cálculo del vector de pesos de los criterios de selección.

W		X	λ	Ponderación	
Vector de pesos		R*W	X/W		
AE	0.286	1.143	4.000	AE	28,6%
CO	0.286	1.143	4.000	CO	28,6%
VU	0.286	1.143	4.000	VU	28,6%
MAN	0.143	0.571	4.000	MAN	14,3%

Obtención del valor propio único, índice de consistencia, índice de consistencia aleatorio y la razón de consistencia de los criterios de selección.

Lambda Máximo	λ_{max}	4.000
Índice de Consistencia	IC	0.000
Índice de aleatoriedad	n	4
	IA	0.9
Razón de consistencia	RC	0.000

Tabla 76. (Continuación)

Análisis técnico					
1: Nivel bajo de importancia 2: Nivel medio de importancia 3: Nivel alto de importancia					
Tecnología		AE	CO	VU	MAN
1	Lámpara de inducción electromagnética	1	1	1	2
2	Lámpara de mercurio a alta presión	1	1	1	1
3	Lámpara de mercurio de baja presión	2	1	1	1
4	Lámpara de vapor de mercurio con alógenos	1	1	1	1
5	Lámpara de sodio a baja presión	1	1	1	3
6	Lámpara de sodio de alta presión	1	1	1	1
7	Lámparas LED	3	2	3	3
Máximo Valor		3	2	3	3
NORMALIZACIÓN					
Tecnología		AE	CO	VU	MAN
1	Lámpara de inducción electromagnética	0,333	0,500	0,333	0,667
2	Lámpara de mercurio a alta presión	0,333	0,500	0,333	0,333
3	Lámpara de mercurio de baja presión	0,667	0,500	0,333	0,333
4	Lámpara de vapor de mercurio con alógenos	0,333	0,500	0,333	0,333
5	Lámpara de sodio a baja presión	0,333	0,500	0,333	1,000
6	Lámpara de sodio de alta presión	0,333	0,500	0,333	0,333
7	Lámparas LED	1,000	1,000	1,000	1,000
Ranking según el criterio económico					
Tecnología		Crit. Económico	Puesto		
Lámpara de inducción electromagnética		0,429	4		
Lámpara de mercurio a alta presión		0,381	5		
Lámpara de mercurio de baja presión		0,476	2		
Lámpara de vapor de mercurio con alógenos		0,381	5		
Lámpara de sodio a baja presión		0,476	2		
Lámpara de sodio de alta presión		0,381	5		
Lámparas LED		1,000	1		

Tabla 76. Ponderación para los criterios que conforman el modelo.

Elaboración de la matriz de valores asignados por el decisor para LOS PARÁMETROS DEL MODELO																		
	<table border="1" style="margin-left: auto; margin-right: auto;"> <tr><td>CT</td><td>Criterio Técnico</td></tr> <tr><td>CE</td><td>Criterio Económico</td></tr> </table>	CT	Criterio Técnico	CE	Criterio Económico	<table border="1" style="margin-left: auto; margin-right: auto;"> <tr><td colspan="3">Asignación para la matriz R</td></tr> <tr><td>R</td><td>CT</td><td>CE</td></tr> <tr><td>CT</td><td style="text-align: center;">1</td><td style="text-align: center;">5</td></tr> <tr><td>CE</td><td style="text-align: center;">1/5</td><td style="text-align: center;">1</td></tr> </table>	Asignación para la matriz R			R	CT	CE	CT	1	5	CE	1/5	1
CT	Criterio Técnico																	
CE	Criterio Económico																	
Asignación para la matriz R																		
R	CT	CE																
CT	1	5																
CE	1/5	1																
<p>En los recuadros sombreados se deben asignar las preferencias por parte del decisor, teniendo en cuenta que se toma el nivel de importancia del elemento fila sobre el elemento columna. Los criterios de la diagonal principal tienen definido el valor 1. Las preferencias de los elementos columna sobre las filas es el recíproco del asignado por el decisor.</p>																		
Normalización de la matriz asignada para los criterios de selección por el decisor.																		
	<table border="1" style="margin-left: auto; margin-right: auto;"> <tr><td colspan="3">Matriz normalizada</td></tr> <tr><td>R</td><td>CT</td><td>CE</td></tr> <tr><td>CT</td><td style="text-align: center;">0.833</td><td style="text-align: center;">0.833</td></tr> <tr><td>CE</td><td style="text-align: center;">0.182</td><td style="text-align: center;">0.167</td></tr> </table>	Matriz normalizada			R	CT	CE	CT	0.833	0.833	CE	0.182	0.167	<p>La normalización se calcula tomando el elemento a normalizar y dividiéndolo entre la suma de la columna a la cual pertenece.</p>				
Matriz normalizada																		
R	CT	CE																
CT	0.833	0.833																
CE	0.182	0.167																
Cálculo del vector de pesos de los criterios de selección.																		
	<table border="1" style="margin-left: auto; margin-right: auto;"> <tr><td colspan="2">W</td><td>X</td><td>λ</td></tr> <tr><td colspan="2">Vector de pesos</td><td>R*W</td><td>X/W</td></tr> <tr><td>CT</td><td style="text-align: center;">0,556</td><td style="text-align: center;">1.111</td><td style="text-align: center;">2,000</td></tr> <tr><td>CE</td><td style="text-align: center;">0,111</td><td style="text-align: center;">0.222</td><td style="text-align: center;">2,000</td></tr> </table>	W		X	λ	Vector de pesos		R*W	X/W	CT	0,556	1.111	2,000	CE	0,111	0.222	2,000	
W		X	λ															
Vector de pesos		R*W	X/W															
CT	0,556	1.111	2,000															
CE	0,111	0.222	2,000															
Obtención del valor propio único, índice de consistencia, índice de consistencia aleatorio y la razón de consistencia de los criterios de selección.																		
	<table border="1" style="margin-left: auto; margin-right: auto;"> <tr><td>Lambda Máximo</td><td>λ_{max}</td><td style="text-align: center;">3.015</td></tr> <tr><td>Índice de Consistencia</td><td>IC</td><td style="text-align: center;">2,000</td></tr> <tr><td rowspan="2">Índice de aleatoriedad</td><td>n</td><td style="text-align: center;">2</td></tr> <tr><td>IA</td><td style="text-align: center;">0.58</td></tr> <tr><td>Razón de consistencia</td><td>RC</td><td style="text-align: center;">0.013</td></tr> </table>	Lambda Máximo	λ_{max}	3.015	Índice de Consistencia	IC	2,000	Índice de aleatoriedad	n	2	IA	0.58	Razón de consistencia	RC	0.013			
Lambda Máximo	λ_{max}	3.015																
Índice de Consistencia	IC	2,000																
Índice de aleatoriedad	n	2																
	IA	0.58																
Razón de consistencia	RC	0.013																

Tabla 77. (Continuación)

Análisis técnico																																							
<table border="1"> <thead> <tr> <th colspan="2">Tecnología</th> <th>CT</th> <th>CE</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>1</td> <td>Lámpara de inducción electromagnética</td> <td>0,758</td> <td>0,429</td> </tr> <tr> <td>2</td> <td>Lámpara de mercurio a alta presión</td> <td>0,838</td> <td>0,381</td> </tr> <tr> <td>3</td> <td>Lámpara de mercurio de baja presión</td> <td>0,877</td> <td>0,476</td> </tr> <tr> <td>4</td> <td>Lámpara de vapor de mercurio con alógenos</td> <td>0,861</td> <td>0,381</td> </tr> <tr> <td>5</td> <td>Lámpara de sodio a baja presión</td> <td>0,665</td> <td>0,476</td> </tr> <tr> <td>6</td> <td>Lámpara de sodio de alta presión</td> <td>0,636</td> <td>0,381</td> </tr> <tr> <td>7</td> <td>Lámparas LED</td> <td>0,868</td> <td>1,000</td> </tr> <tr> <td colspan="2">Máximo Valor</td> <td>0,877</td> <td>1</td> </tr> </tbody> </table>				Tecnología		CT	CE	1	Lámpara de inducción electromagnética	0,758	0,429	2	Lámpara de mercurio a alta presión	0,838	0,381	3	Lámpara de mercurio de baja presión	0,877	0,476	4	Lámpara de vapor de mercurio con alógenos	0,861	0,381	5	Lámpara de sodio a baja presión	0,665	0,476	6	Lámpara de sodio de alta presión	0,636	0,381	7	Lámparas LED	0,868	1,000	Máximo Valor		0,877	1
Tecnología		CT	CE																																				
1	Lámpara de inducción electromagnética	0,758	0,429																																				
2	Lámpara de mercurio a alta presión	0,838	0,381																																				
3	Lámpara de mercurio de baja presión	0,877	0,476																																				
4	Lámpara de vapor de mercurio con alógenos	0,861	0,381																																				
5	Lámpara de sodio a baja presión	0,665	0,476																																				
6	Lámpara de sodio de alta presión	0,636	0,381																																				
7	Lámparas LED	0,868	1,000																																				
Máximo Valor		0,877	1																																				
Normalización																																							
<table border="1"> <thead> <tr> <th colspan="4">Normalización</th> </tr> <tr> <th colspan="2">Tecnología</th> <th>CT</th> <th>CE</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>1</td> <td>Lámpara de inducción electromagnética</td> <td>0,864</td> <td>0,429</td> </tr> <tr> <td>2</td> <td>Lámpara de mercurio a alta presión</td> <td>0,955</td> <td>0,381</td> </tr> <tr> <td>3</td> <td>Lámpara de mercurio de baja presión</td> <td>1,000</td> <td>0,476</td> </tr> <tr> <td>4</td> <td>Lámpara de vapor de mercurio con alógenos</td> <td>0,981</td> <td>0,381</td> </tr> <tr> <td>5</td> <td>Lámpara de sodio a baja presión</td> <td>0,758</td> <td>0,476</td> </tr> <tr> <td>6</td> <td>Lámpara de sodio de alta presión</td> <td>0,724</td> <td>0,381</td> </tr> <tr> <td>7</td> <td>Lámparas LED</td> <td>0,989</td> <td>1,000</td> </tr> </tbody> </table>				Normalización				Tecnología		CT	CE	1	Lámpara de inducción electromagnética	0,864	0,429	2	Lámpara de mercurio a alta presión	0,955	0,381	3	Lámpara de mercurio de baja presión	1,000	0,476	4	Lámpara de vapor de mercurio con alógenos	0,981	0,381	5	Lámpara de sodio a baja presión	0,758	0,476	6	Lámpara de sodio de alta presión	0,724	0,381	7	Lámparas LED	0,989	1,000
Normalización																																							
Tecnología		CT	CE																																				
1	Lámpara de inducción electromagnética	0,864	0,429																																				
2	Lámpara de mercurio a alta presión	0,955	0,381																																				
3	Lámpara de mercurio de baja presión	1,000	0,476																																				
4	Lámpara de vapor de mercurio con alógenos	0,981	0,381																																				
5	Lámpara de sodio a baja presión	0,758	0,476																																				
6	Lámpara de sodio de alta presión	0,724	0,381																																				
7	Lámparas LED	0,989	1,000																																				
Ranking de alternativas																																							
<table border="1"> <thead> <tr> <th>Tecnología</th> <th>Crit. Modelo</th> <th>Puesto</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>Lámpara de inducción electromagnética</td> <td>0,528</td> <td>5</td> </tr> <tr> <td>Lámpara de mercurio a alta presión</td> <td>0,573</td> <td>4</td> </tr> <tr> <td>Lámpara de mercurio de baja presión</td> <td>0,608</td> <td>2</td> </tr> <tr> <td>Lámpara de vapor de mercurio con alógenos</td> <td>0,587</td> <td>3</td> </tr> <tr> <td>Lámpara de sodio a baja presión</td> <td>0,474</td> <td>6</td> </tr> <tr> <td>Lámpara de sodio de alta presión</td> <td>0,445</td> <td>7</td> </tr> <tr> <td>Lámparas LED</td> <td>0,660</td> <td>1</td> </tr> </tbody> </table>				Tecnología	Crit. Modelo	Puesto	Lámpara de inducción electromagnética	0,528	5	Lámpara de mercurio a alta presión	0,573	4	Lámpara de mercurio de baja presión	0,608	2	Lámpara de vapor de mercurio con alógenos	0,587	3	Lámpara de sodio a baja presión	0,474	6	Lámpara de sodio de alta presión	0,445	7	Lámparas LED	0,660	1												
Tecnología	Crit. Modelo	Puesto																																					
Lámpara de inducción electromagnética	0,528	5																																					
Lámpara de mercurio a alta presión	0,573	4																																					
Lámpara de mercurio de baja presión	0,608	2																																					
Lámpara de vapor de mercurio con alógenos	0,587	3																																					
Lámpara de sodio a baja presión	0,474	6																																					
Lámpara de sodio de alta presión	0,445	7																																					
Lámparas LED	0,660	1																																					

Finalmente se presenta el escalafón con las posiciones alcanzadas por cada tecnología, siendo la número 1 la alternativa con mejores prestaciones según los criterios y sub-criterios seleccionados.

Según el análisis realizado para este ejemplo de un procedimiento de selección de tecnologías de iluminación artificial, mediante la aplicación del método de selección multi-criterio AHP se tiene como resultado, que la mejor alternativa, según los criterios de características técnicas y económico, para el sistema de iluminación artificial son las lámparas LED, la cual obtuvo el puesto número uno para este ejemplo, y como segunda opción se tienen las lámparas de mercurio de baja presión.

ANEXO C: ASIGNACIÓN DE LOS CRITERIOS DE SELECCIÓN PARA LOS PROTOCOLOS DE COMUNICACIÓN CON MEJORES PRESTACIONES

A continuación se procede a realizar la priorización de los criterios de selección tomando el primer criterio identificado como Versatilidad y adaptabilidad.

Tabla 77. Ponderación para los sub-criterios que conforman el criterio Versatilidad y adaptabilidad.

Versatilidad y adaptabilidad																																																																											
<table border="1"> <tr><td>I</td><td>Iluminación</td></tr> <tr><td>V</td><td>Ventilación</td></tr> <tr><td>S</td><td>Seguridad</td></tr> <tr><td>GS</td><td>Generación en sitio</td></tr> </table>	I	Iluminación	V	Ventilación	S	Seguridad	GS	Generación en sitio	Asignación para la matriz (R)				Matriz normalizada																																																														
	I	Iluminación																																																																									
	V	Ventilación																																																																									
	S	Seguridad																																																																									
	GS	Generación en sitio																																																																									
		R	I	V	S	GS	MNR	I	V	S	GS																																																																
		I	1	2	1	2	I	0,333	0,444	0,286	0,286																																																																
		V	1/2	1	1	2	V	0,167	0,222	0,286	0,286																																																																
		S	1	1	1	2	S	0,333	0,222	0,286	0,286																																																																
		GS	1/2	1/2	1/2	1	GS	0,167	0,111	0,143	0,143																																																																
							Total	1,000	1,000	1,000	1,000																																																																
Obtención del valor propio único, índice de consistencia, índice de consistencia aleatorio y la razón de consistencia de los criterios de selección.																																																																											
<table border="1"> <tr><td>Lambda Máximo</td><td>λmax</td><td>4,094</td></tr> <tr><td>Índice de consistencia</td><td>IC</td><td>0,031</td></tr> <tr><td rowspan="2">Índice de aleatoriedad</td><td>n</td><td>4</td></tr> <tr><td>IA</td><td>0,90</td></tr> <tr><td>Razón de consistencia</td><td>RC</td><td>0,035</td></tr> </table>				Lambda Máximo	λmax	4,094	Índice de consistencia	IC	0,031	Índice de aleatoriedad	n	4	IA	0,90	Razón de consistencia	RC	0,035	<table border="1"> <tr><td colspan="2">Vector de pesos</td><td>Ponderación</td></tr> <tr><td>I</td><td>0,337</td><td>33,7%</td></tr> <tr><td>V</td><td>0,240</td><td>20%</td></tr> <tr><td>S</td><td>0,282</td><td>28,2%</td></tr> <tr><td>GS</td><td>0,141</td><td>14,1%</td></tr> <tr><td>Total</td><td>1,000</td><td>100%</td></tr> </table>		Vector de pesos		Ponderación	I	0,337	33,7%	V	0,240	20%	S	0,282	28,2%	GS	0,141	14,1%	Total	1,000	100%																																						
Lambda Máximo	λmax	4,094																																																																									
Índice de consistencia	IC	0,031																																																																									
Índice de aleatoriedad	n	4																																																																									
	IA	0,90																																																																									
Razón de consistencia	RC	0,035																																																																									
Vector de pesos		Ponderación																																																																									
I	0,337	33,7%																																																																									
V	0,240	20%																																																																									
S	0,282	28,2%																																																																									
GS	0,141	14,1%																																																																									
Total	1,000	100%																																																																									
ANÁLISIS TÉCNICO																																																																											
1: Limitada desarrollo del parámetro en el diseño 2: Desarrollo moderado del parámetro en el diseño 3: Altísimo desarrollo del parámetro en el diseño					<table border="1"> <thead> <tr> <th colspan="6">NORMALIZACIÓN</th> </tr> <tr> <th colspan="2">Protocolo</th> <th>I</th> <th>V</th> <th>S</th> <th>GS</th> </tr> </thead> <tbody> <tr><td>1</td><td>EIB</td><td>1,000</td><td>1,000</td><td>1,000</td><td>1,000</td></tr> <tr><td>2</td><td>LONWORKS</td><td>0,667</td><td>1,000</td><td>1,000</td><td>1,000</td></tr> <tr><td>3</td><td>TCP/IP</td><td>0,667</td><td>0,500</td><td>1,000</td><td>1,000</td></tr> <tr><td>4</td><td>KNX</td><td>1,000</td><td>0,500</td><td>1,000</td><td>1,000</td></tr> <tr><td>5</td><td>Hometronic</td><td>0,667</td><td>0,500</td><td>1,000</td><td>1,000</td></tr> <tr><td>6</td><td>CEBUS</td><td>0,333</td><td>0,500</td><td>0,500</td><td>1,000</td></tr> <tr><td>7</td><td>UpnP</td><td>0,333</td><td>0,500</td><td>1,000</td><td>1,000</td></tr> <tr><td>8</td><td>ZIGBEE</td><td>0,333</td><td>0,500</td><td>0,500</td><td>1,000</td></tr> <tr><td>9</td><td>MODBUS</td><td>0,667</td><td>0,500</td><td>1,000</td><td>1,000</td></tr> </tbody> </table>					NORMALIZACIÓN						Protocolo		I	V	S	GS	1	EIB	1,000	1,000	1,000	1,000	2	LONWORKS	0,667	1,000	1,000	1,000	3	TCP/IP	0,667	0,500	1,000	1,000	4	KNX	1,000	0,500	1,000	1,000	5	Hometronic	0,667	0,500	1,000	1,000	6	CEBUS	0,333	0,500	0,500	1,000	7	UpnP	0,333	0,500	1,000	1,000	8	ZIGBEE	0,333	0,500	0,500	1,000	9	MODBUS	0,667	0,500	1,000	1,000
NORMALIZACIÓN																																																																											
Protocolo		I	V	S	GS																																																																						
1	EIB	1,000	1,000	1,000	1,000																																																																						
2	LONWORKS	0,667	1,000	1,000	1,000																																																																						
3	TCP/IP	0,667	0,500	1,000	1,000																																																																						
4	KNX	1,000	0,500	1,000	1,000																																																																						
5	Hometronic	0,667	0,500	1,000	1,000																																																																						
6	CEBUS	0,333	0,500	0,500	1,000																																																																						
7	UpnP	0,333	0,500	1,000	1,000																																																																						
8	ZIGBEE	0,333	0,500	0,500	1,000																																																																						
9	MODBUS	0,667	0,500	1,000	1,000																																																																						
<table border="1"> <thead> <tr> <th>Protocolo</th> <th>I</th> <th>V</th> <th>S</th> <th>GS</th> </tr> </thead> <tbody> <tr><td>1</td><td>EIB</td><td>3</td><td>2</td><td>2</td><td>1</td></tr> <tr><td>2</td><td>LONWORKS</td><td>2</td><td>2</td><td>2</td><td>1</td></tr> <tr><td>3</td><td>TCP/IP</td><td>2</td><td>1</td><td>2</td><td>1</td></tr> <tr><td>4</td><td>KNX</td><td>3</td><td>1</td><td>2</td><td>1</td></tr> <tr><td>5</td><td>Hometronic</td><td>2</td><td>1</td><td>2</td><td>1</td></tr> <tr><td>6</td><td>CEBUS</td><td>1</td><td>1</td><td>1</td><td>1</td></tr> <tr><td>7</td><td>UpnP</td><td>1</td><td>1</td><td>2</td><td>1</td></tr> <tr><td>8</td><td>ZIGBEE</td><td>1</td><td>1</td><td>1</td><td>1</td></tr> <tr><td>9</td><td>MODBUS</td><td>2</td><td>1</td><td>2</td><td>1</td></tr> <tr><td></td><td>Máximo valor</td><td>3</td><td>2</td><td>2</td><td>1</td></tr> </tbody> </table>		Protocolo	I	V	S	GS	1	EIB	3	2	2	1	2	LONWORKS	2	2	2	1	3	TCP/IP	2	1	2	1	4	KNX	3	1	2	1	5	Hometronic	2	1	2	1	6	CEBUS	1	1	1	1	7	UpnP	1	1	2	1	8	ZIGBEE	1	1	1	1	9	MODBUS	2	1	2	1		Máximo valor	3	2	2	1									
Protocolo	I	V	S	GS																																																																							
1	EIB	3	2	2	1																																																																						
2	LONWORKS	2	2	2	1																																																																						
3	TCP/IP	2	1	2	1																																																																						
4	KNX	3	1	2	1																																																																						
5	Hometronic	2	1	2	1																																																																						
6	CEBUS	1	1	1	1																																																																						
7	UpnP	1	1	2	1																																																																						
8	ZIGBEE	1	1	1	1																																																																						
9	MODBUS	2	1	2	1																																																																						
	Máximo valor	3	2	2	1																																																																						

Tabla 78. (Continuación)

Jerarquización			
Protocolo	V&A	Puesto	Jerarquización según el criterio Versatilidad y adaptabilidad.
EIB	1,000	1	
LONWORKS	0,888	2	
TCP/IP	0,768	4	
KNX	0,880	3	
Hometronic	0,768	4	
CEBUS	0,514	8	
UpnP	0,655	7	
ZIGBEE	0,514	8	
MODBUS	0,768	4	

Tabla 78. Ponderación para los sub-criterios que conforman los criterios de accesibilidad.

FACILIDAD & ACCESIBILIDAD (F&A)											
D	Disponibilidad	Asignación para la matriz (R)					Matriz normalizada R (MNR)				
Dñ	Diseño	R	I	V	S	GS	MNR	D	Dñ	O&M	A
O&M	Operación & Mantenimiento	I	1	2	3	1	D	0,353	0,500	0,375	0,222
A	Asesoría	V	1/2	1	2	2	Dñ	0,176	0,250	0,250	0,444
		S	1/3	1/2	1	1/2	O&M	0,118	0,125	0,125	0,111
		GS	1	1/2	2	1	A	0,353	0,125	0,250	0,222
							Total	1,000	1,000	1,000	1,000
Obtención del valor propio único, índice de consistencia, índice de consistencia aleatorio y la razón de consistencia de los criterios de selección.											
Lambda Máximo	λ_{max}	4,196	Vector de peso				Ponderación				
Índice de consistencia	IC	0,065	D	0,363		36,3%					
Índice de aleatoriedad	n	4	Dñ	0,280		28%					
	IA	0,9	O&M	0,120		12%					
Razón de consistencia	RC	0,073	A	0,238		23,8%					
			Total	1,000		100%					
ANÁLISIS TÉCNICO											
1: Nivel alto de dificultad 2: Nivel moderado de dificultad 3: Nivel bajo de dificultad					NORMALIZACIÓN						
Protocolo	D	Dñ	O&M	A	Protocolo	D	Dñ	O&M	A		
1 EIB	3	2	2	3	1 EIB	1,000	0,667	0,667	1,000		
2 LONWORKS	2	3	2	2	2 LONWORKS	0,667	1,000	0,667	0,667		
3 TCP/IP	3	2	2	2	3 TCP/IP	1,000	0,667	0,667	0,667		
4 KNX	3	2	2	3	4 KNX	1,000	0,667	0,667	1,000		
5 Hometronic	3	2	2	2	5 Hometronic	1,000	0,667	0,667	0,667		
6 CEBUS	2	3	2	2	6 CEBUS	0,667	1,000	0,667	0,667		
7 UpnP	2	2	2	2	7 UpnP	0,667	0,667	0,667	0,667		
8 ZIGBEE	2	2	2	1	8 ZIGBEE	0,667	0,667	0,667	0,333		
9 MODBUS	3	2	3	2	9 MODBUS	1,000	0,667	1,000	0,667		
Máximo valor	3	3	3	3							

Tabla 79. (Continuación)

Jerarquización			
Protocolo	F&A	Puesto	Jerarquización según el criterio Facilidad y accesibilidad.
EIB	0,826	2	
LONWORKS	0,747	6	
TCP/IP	0,779	4	
KNX	0,826	2	
Hometronic	0,779	4	
CEBUS	0,747	6	
UpnP	0,667	8	
ZIGBEE	0,620	9	
MODBUS	0,873	1	

Tabla 79. Ponderación para los sub-criterios que conforman los criterios de accesibilidad.

COSTO (C)											
So	Software		Asignación para la matriz (R)				Matriz normalizada R (MNR)				
Ca	Capacitación		R	So	Ca	Di	MNR	So	Ca	Di	
Di	Dispositivos		So	1	2	1/2	So	0,286	0,400	0,250	
		Ca	1/2	1	1/2	Ca	0,143	0,200	0,250		
		Di	2	2	1	Di	0,571	0,400	0,500		
						Total	0,000	0,000	0,000		

Obtención del valor propio único, índice de consistencia, índice de consistencia aleatorio y la razón de consistencia de los criterios de selección.

Lambda Máximo	λmax	3,078		<i>Vector de pesos</i>	<i>Ponderación</i>	
Índice de consistencia	IC	0,039		So	,312	31,2%
Índice de aleatoriedad	n	3		Ca	0,198	19,8%
	IA	0,58		Di	0,490	49%
Razón de consistencia	RC	0,067		Total	1,00	100%

ANÁLISIS TÉCNICO

1: Costo alto 2: Costo medio 3: Costo bajo		NORMALIZACIÓN																																																																																				
<table border="1" style="width: 100%; border-collapse: collapse;"> <thead> <tr> <th>Protocolo</th><th>So</th><th>Ca</th><th>Di</th></tr> </thead> <tbody> <tr><td>1 EIB</td><td>2</td><td>2</td><td>2</td></tr> <tr><td>2 LONWORKS</td><td>2</td><td>2</td><td>3</td></tr> <tr><td>3 TCP/IP</td><td>2</td><td>2</td><td>3</td></tr> <tr><td>4 KNX</td><td>2</td><td>2</td><td>2</td></tr> <tr><td>5 Hometronic</td><td>2</td><td>2</td><td>3</td></tr> <tr><td>6 CEBUS</td><td>2</td><td>2</td><td>3</td></tr> <tr><td>7 UpnP</td><td>2</td><td>2</td><td>2</td></tr> <tr><td>8 ZIGBEE</td><td>1</td><td>1</td><td>2</td></tr> <tr><td>9 MODBUS</td><td>2</td><td>3</td><td>2</td></tr> <tr><td><i>Máximo valor</i></td><td>2</td><td>3</td><td>3</td></tr> </tbody> </table>	Protocolo	So	Ca	Di	1 EIB	2	2	2	2 LONWORKS	2	2	3	3 TCP/IP	2	2	3	4 KNX	2	2	2	5 Hometronic	2	2	3	6 CEBUS	2	2	3	7 UpnP	2	2	2	8 ZIGBEE	1	1	2	9 MODBUS	2	3	2	<i>Máximo valor</i>	2	3	3		<table border="1" style="width: 100%; border-collapse: collapse;"> <thead> <tr> <th>Protocolo</th><th>So</th><th>Ca</th><th>Di</th></tr> </thead> <tbody> <tr><td>1 EIB</td><td>1,000</td><td>0,667</td><td>0,667</td></tr> <tr><td>2 LONWORKS</td><td>1,000</td><td>0,667</td><td>1,000</td></tr> <tr><td>3 TCP/IP</td><td>1,000</td><td>0,667</td><td>1,000</td></tr> <tr><td>4 KNX</td><td>1,000</td><td>0,667</td><td>0,667</td></tr> <tr><td>5 Hometronic</td><td>1,000</td><td>0,667</td><td>1,000</td></tr> <tr><td>6 CEBUS</td><td>1,000</td><td>0,667</td><td>1,000</td></tr> <tr><td>7 UpnP</td><td>1,000</td><td>0,667</td><td>0,667</td></tr> <tr><td>8 ZIGBEE</td><td>0,500</td><td>0,333</td><td>0,667</td></tr> <tr><td>9 MODBUS</td><td>1,000</td><td>1,000</td><td>0,667</td></tr> </tbody> </table>	Protocolo	So	Ca	Di	1 EIB	1,000	0,667	0,667	2 LONWORKS	1,000	0,667	1,000	3 TCP/IP	1,000	0,667	1,000	4 KNX	1,000	0,667	0,667	5 Hometronic	1,000	0,667	1,000	6 CEBUS	1,000	0,667	1,000	7 UpnP	1,000	0,667	0,667	8 ZIGBEE	0,500	0,333	0,667	9 MODBUS	1,000	1,000	0,667
Protocolo	So	Ca	Di																																																																																			
1 EIB	2	2	2																																																																																			
2 LONWORKS	2	2	3																																																																																			
3 TCP/IP	2	2	3																																																																																			
4 KNX	2	2	2																																																																																			
5 Hometronic	2	2	3																																																																																			
6 CEBUS	2	2	3																																																																																			
7 UpnP	2	2	2																																																																																			
8 ZIGBEE	1	1	2																																																																																			
9 MODBUS	2	3	2																																																																																			
<i>Máximo valor</i>	2	3	3																																																																																			
Protocolo	So	Ca	Di																																																																																			
1 EIB	1,000	0,667	0,667																																																																																			
2 LONWORKS	1,000	0,667	1,000																																																																																			
3 TCP/IP	1,000	0,667	1,000																																																																																			
4 KNX	1,000	0,667	0,667																																																																																			
5 Hometronic	1,000	0,667	1,000																																																																																			
6 CEBUS	1,000	0,667	1,000																																																																																			
7 UpnP	1,000	0,667	0,667																																																																																			
8 ZIGBEE	0,500	0,333	0,667																																																																																			
9 MODBUS	1,000	1,000	0,667																																																																																			

Tabla 80. (Continuación)

Jerarquización			
Protocolo	C	Puesto	Jerarquización según el criterio Costo.
EIB	0,685	6	
LONWORKS	0,779	1	
TCP/IP	0,779	1	
KNX	0,685	6	
Hometronic	0,779	1	
CEBUS	0,779	1	
UpnP	0,685	6	
ZIGBEE	0,437	9	
MODBUS	0,765	5	

Tabla 80. Ponderación para los sub-criterios que conforman los criterios de características técnicas.

CARACTERÍSTICAS TÉCNICAS (CT)													
Ce	Consumo de energía	Asignación para la matriz (R)					Matriz normalizada R (MNR)						
Co	Configuración	R	Ce	Co	Mt	Dc	Ve	MNR	Ce	Co	Mt	Dc	Ve
Mt	Medio de transmisión	Ce	1	3	2	1	2	Ce	0,300	0,400	0,286	0,250	0,286
Dc	Densidad de conexión	Co	1/3	1	2	1/2	1	Co	0,100	0,133	0,286	0,125	0,143
Ve	Velocidad	Mt	1/2	1/2	1	1	1	Mt	0,150	0,067	0,143	0,250	0,143
		Dc	1	2	1	1	2	Dc	0,300	0,267	0,143	0,250	0,286
		Ve	1/2	1	1	1/2	1	Ve	0,150	0,133	0,143	0,125	0,143
								Total	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000

Obtención del valor propio único, índice de consistencia, índice de consistencia aleatorio y la razón de consistencia de los criterios de selección.

Lambda Máximo	λ_{max}	5,272		<i>Vector de pesos</i>	<i>Ponderación</i>	
Índice de consistencia	IC	0,068		Ce	0,304	30,4%
Índice de aleatoriedad	n	5		Co	0,157	15,7%
	IA	1,12		Mt	0,150	15%
Razón de consistencia	RC	0,061		Dc	0,249	24,9%
					Ve	0,139
				Total	1,000	100%

ANÁLISIS TÉCNICO

ANÁLISIS TÉCNICO							NORMALIZACIÓN						
1: Bajo 2: Medio 3: Alto							Protocolo	D	Dñ	O&M			
1	EIB	2	3	3	3	3	1	EIB	0,667	1,000	1,000	1,000	1,000
2	LONWORKS	2	3	3	3	3	2	LONWORKS	0,667	1,000	1,000	1,000	1,000
3	TCP/IP	3	3	2	3	3	3	TCP/IP	1,000	1,000	0,667	1,000	1,000
4	KNX	3	3	3	3	3	4	KNX	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000
5	Hometronic	2	2	3	3	3	5	Hometronic	0,667	0,667	1,000	1,000	1,000
6	CEBUS	2	3	1	2	1	6	CEBUS	0,667	1,000	0,333	0,667	0,333
7	UpnP	3	1	3	1	1	7	UpnP	1,000	0,333	1,000	0,333	0,333
8	ZIGBEE	2	3	2	3	2	8	ZIGBEE	0,667	1,000	0,667	1,000	0,667
9	MODBUS	2	3	3	3	3	9	MODBUS	0,667	1,000	1,000	1,000	1,000
	<i>Máximo valor</i>	3	3	3	3	3							

Tabla 81. (Continuación)

Jerarquización		
Protocolo	CT	Puesto
EIB	0,747	3
LONWORKS	0,747	3
TCP/IP	0,765	2
KNX	0,859	1
Hometronic	0,667	7
CEBUS	0,559	9
UpnP	0,699	6
ZIGBEE	0,653	8
MODBUS	0,747	3

Jerarquización según el criterio características técnicas.

Tabla 81. Ponderación para los sub-criterios que conforman los criterios del modelo.

PARÁMETROS DEL MODELO											
V&A	Versatilidad & Adaptabilidad	Asignación para la matriz (R)			Matriz normalizada R (MNR)						
F&A	Facilidad & Accesibilidad	R	V&A	F&A	C	CT	MNR	V&A	F&A	C	CT
C	Costo	V&A	1	1/2	2	1/3	V&A	0,154	0,125	0,286	0,143
CT	Características técnicas	F&A	2	1	2	1/2	F&A	0,308	0,250	0,286	0,214
		C	1/2	1/2	1	1/2	C	0,077	0,125	0,143	0,214
		CT	3	2	2	1	CT	0,462	0,500	0,286	0,429
							Total	1,000	1,000	1,000	1,000

Obtención del valor propio único, índice de consistencia, índice de consistencia aleatorio y la razón de consistencia de los criterios de selección.

Lambda Máximo	λ_{max}	4,196	Vector de pesos	Ponderación	
Índice de consistencia	IC	0,065	V&A	0,177	17,7%
Índice de aleatoriedad	n	4	F&A	0,264	26,4%
	IA	0,90	C	0,140	14%
Razón de consistencia	RC	0,073	CT	0,419	41,9%
			Total	1,000	100%

ANÁLISIS TÉCNICO

		NORMALIZACIÓN					
		Protocolo	V&A	F&A	C	CT	
1:	Limitada desarrollo del parámetro en el diseño	1	EIB	1,000	1,000	0,879	0,869
2:	Desarrollo moderado del parámetro en el diseño	2	LONWORKS	0,888	0,904	1,000	0,869
3:	Altísimo desarrollo del parámetro en el diseño	3	TCP/IP	0,768	0,943	1,000	0,891
		4	KNX	0,880	1,000	0,879	1,000
		5	Hometronic	0,768	0,943	1,000	0,776
		6	CEBUS	0,514	0,904	1,000	0,651
		7	UpnP	0,655	0,807	0,879	0,814
		8	ZIGBEE	0,514	0,750	0,560	0,760
		9	MODBUS	0,768	1,057	0,982	0,869
			Máximo valor	1,000	0,826	0,779	0,859

Tabla 82. (Continuación)

Jerarquización		
Protocolo	TOTAL	Puesto
EIB	0,948	1
LONWORKS	0,921	3
TCP/IP	0,893	5
KNX	0,926	2
Hometronic	0,876	6
CEBUS	0,764	8
UpnP	0,777	7
ZIGBEE	0,618	9
MODBUS	0,912	4

Jerarquización final.

Como se muestra al final de la Tabla 81, los protocolos recomendados para automatizar un sistema de iluminación son, en primer lugar el protocolo EIB, como segunda opción el protocolo KNX, a pesar que la tecnología KNX fusionó los protocolos EHS, BatiBus y EIB se puede analizar cada uno de estos por separado según la aplicación y en tercer lugar se encuentra el protocolo LONWORKS

