



Universidad de San Carlos de Guatemala
Facultad de Ingeniería
Escuela de Ingeniería Mecánica Eléctrica

**ANÁLISIS Y DISEÑO DEL SISTEMA LUMÍNICO PARA UNA SUBESTACIÓN
EXTERNA, DE ALTA TENSIÓN, CON TECNOLOGÍA LED**

Erick Oswaldo Reyes Klug

Asesorado por el Ing. Gustavo Benigno Orozco Godínez

Guatemala, octubre de 2021

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA



FACULTAD DE INGENIERÍA

**ANÁLISIS Y DISEÑO DEL SISTEMA LUMÍNICO PARA UNA SUBESTACIÓN
EXTERNA, DE ALTA TENSIÓN, CON TECNOLOGÍA LED**

TRABAJO DE GRADUACIÓN

PRESENTADO A LA JUNTA DIRECTIVA DE LA
FACULTAD DE INGENIERÍA

POR

ERICK OSWALDO REYES KLUG

ASESORADO POR EL ING. GUSTAVO BENIGNO OROZCO GODÍNEZ

AL CONFERÍRSELE EL TÍTULO DE

INGENIERO ELECTRICISTA

GUATEMALA, OCTUBRE DE 2021

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA
FACULTAD DE INGENIERÍA



NÓMINA DE JUNTA DIRECTIVA

DECANA	Inga. Aurelia Anabela Cordova Estrada
VOCAL I	Ing. José Francisco Gómez Rivera
VOCAL II	Ing. Mario Renato Escobedo Martínez
VOCAL III	Ing. José Milton de León Bran
VOCAL IV	Br. Kevin Armando Cruz Lorente
VOCAL V	Br. Fernando José Paz González
SECRETARIO	Ing. Hugo Humberto Rivera Pérez

TRIBUNAL QUE PRACTICÓ EL EXAMEN GENERAL PRIVADO

DECANO	Inga. Pedro Antonio Aguilar Polanco
EXAMINADOR	Ing. Marvin Marino Hernández Fernández
EXAMINADOR	Ing. Julio Rolando Barrios Archila
EXAMINADOR	Ing. José Aníbal Silva de los Ángeles
SECRETARIA	Inga. Lesbia Magalí Herrera López

HONORABLE TRIBUNAL EXAMINADOR

En cumplimiento con los preceptos que establece la ley de la Universidad de San Carlos de Guatemala, presento a su consideración mi trabajo de graduación titulado:

ANÁLISIS Y DISEÑO DEL SISTEMA LUMÍNICO PARA UNA SUBESTACIÓN EXTERNA, DE ALTA TENSIÓN, CON TECNOLOGÍA LED

Tema que me fuera asignado por la Dirección de la Escuela de Ingeniería Mecánica Eléctrica, con fecha 27 de septiembre del 2019.

Erick Oswaldo Reyes Klug

Guatemala, 24 de junio de 2021.

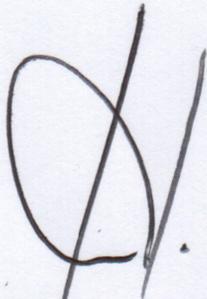
Ingeniero José Aníbal Silva
Coordinador Área de Electrotecnia
Escuela Mecánica Eléctrica
Facultad de Ingeniería
USAC.

Estimado Ingeniero:

De acuerdo con la designación efectuada por la Dirección de Escuela, me permito informarle que he procedido a asesorar el Trabajo de Graduación titulado: **ANALISIS Y DISEÑO DEL SISTEMA LUMINICO PARA UNA SUBESTACION EXTERNA, DE ALTA TENSION, CON TECNOLOGIA LED**, desarrollado por el estudiante ERICK OSWALDO REYES KLUG, carne 2012-12531 y, encontrándolo satisfactorio en su contenido y resultados, me permito dar aprobación al mismo, remitiéndolo a esa Coordinación para el trámite pertinente, en el entendido que el Autor y este Asesor somos responsables del contenido y conclusiones del Trabajo.

Agradeciendo la atención a la presente, me es grato suscribirme, deseándole éxitos en sus labores.

Atentamente,



Ing. Gustavo Benigno Orozco Godínez.
Colegiado 1,879
ASESOR

ING. GUSTAVO B. OROZCO
COLEGIADO 1879



REF. EIME 120.2021.

5 DE AGOSTO 2021.

Señor Director

Ing. Armando Alonso Rivera Carrillo

Escuela de Ingeniería Mecánica Eléctrica

Facultad de Ingeniería, USAC.

Señor Director:

Me permito dar aprobación al trabajo de Graduación titulado: ANÁLISIS Y DISEÑO DEL SISTEMA LUMÍNICO PARA UNA SUBESTACIÓN EXTERNA, DE ALTA TENSIÓN, CON TECNOLOGÍA LED, del estudiante, Erick Oswaldo Reyes Klug, que cumple con los requisitos establecidos para tal fin.

Sin otro particular, aprovecho la oportunidad para saludarle.

Atentamente,
ID Y ENSEÑAD A TODOS

Ing. José Anibal Silva de los Angeles
Coordinador de Electrotécnica

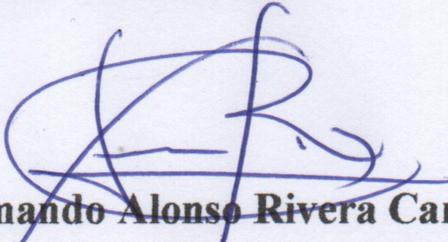


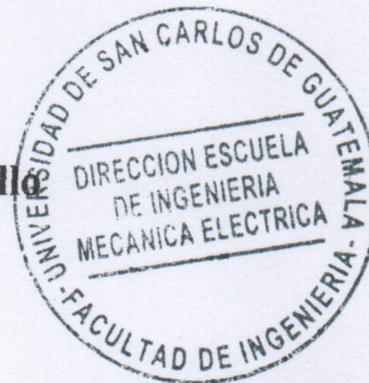
sro



REF. EIME 125. 2021.

El Director de la Escuela de Ingeniería Mecánica Eléctrica, después de conocer el dictamen del Asesor, con el Visto Bueno del Coordinador de Área, al trabajo de Graduación del estudiante; ERICK OSWALDO REYES KLUG titulado: ANÁLISIS Y DISEÑO DEL SISTEMA LUMÍNICO PARA UNA SUBESTACIÓN EXTERNA, DE ALTA TENSION, CON TECNOLOGÍA LED, procede a la autorización del mismo.


Ing. Armando Alonso Rivera Carrillo



GUATEMALA, 24 DE AGOSTO 2,021.



USAC
TRICENTENARIA
Universidad de San Carlos de Guatemala

Decanato
Facultad de Ingeniería
24189101 - 24189102
secretariadecanato@ingenieria.usac.edu.gt

DTG. 554-2021

La Decana de la Facultad de Ingeniería de la Universidad de San Carlos de Guatemala, luego de conocer la aprobación por parte del Director de la Escuela de Ingeniería Mecánica Eléctrica, al Trabajo de Graduación titulado: **ANÁLISIS Y DISEÑO DEL SISTEMA LUMÍNICO PARA UNA SUBESTACIÓN EXTERNA, DE ALTA TENSIÓN, CON TECNOLOGÍA LED**, presentado por el estudiante universitario: **Erick Oswaldo Reyes Klug**, y después de haber culminado las revisiones previas bajo la responsabilidad de las instancias correspondientes, autoriza la impresión del mismo.

IMPRÍMASE:


Inga. Anabela Cordova Estrada
Decana



Guatemala, octubre de 2021

AACE/cc

ACTO QUE DEDICO A:

- Dios** Por concederme salud y la fortaleza necesaria cuando la meta solía desvanecerse, por lo que pongo este trabajo en tus manos y que sea de bendición para quien lo necesite.
- Mis padres** Silvia Edelmira Klug y Luis Oswaldo Reyes. Por inculcarme los valores que me han formado como persona y aprender de ustedes a ser mejor cada día. En especial a ti madre por siempre demostrarme tu amor y apoyo durante mi vida, este triunfo va dedicado a ti.
- Familia Reyes Klug** Mi familia. Por ser parte principal en mi formación como persona y cada uno ser un ejemplo de vida y superación profesional.
- Mi asesor** Gustavo Benigno Orozco. Por su amistad y contribución con su experiencia y tiempo en la realización de esta investigación.
- Mis catedráticos** Quienes con su ejemplo, sabiduría y arduo trabajo me brindaron la preparación académica para mi formación como profesional.

AGRADECIMIENTOS A:

**Universidad de San
Carlos de Guatemala**

Por ser una casa de estudios que siempre recordaré y representaré con orgullo.

Facultad de Ingeniería

Al personal administrativo y docente por su labor diario en mejorar y comprometerse con la educación de buenos profesionales.

Mis amigos de la Facultad

Erick Argueta y Renato Díaz, quienes en equipo fuimos creciendo como profesionales superando todos los obstáculos que se nos presentaron.

Mis amigos

Oscar Pérez y Víctor Godoy, por su apoyo incondicional y estar presentes dando apoyo en todo logro alcanzado.

Andrea Samayoa

Por brindarme su apoyo, comprensión y alentarme a seguir adelante en todo momento incluso en los momentos más difíciles.

ÍNDICE GENERAL

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES.....	VII
LISTA DE SÍMBOLOS	XIII
GLOSARIO	XV
RESUMEN.....	XVII
OBJETIVOS.....	XIX
INTRODUCCIÓN.....	XXI
1. SUBESTACIÓN ELÉCTRICA Y LOS PRINCIPIOS DE SU ILUMINACIÓN.....	1
1.1. Subestación eléctrica: definición	2
1.2. Elementos principales de una subestación.....	3
1.2.1. Equipos de tablero.....	3
1.2.1.1. Fusibles	3
1.2.1.2. Relevadores de protección	4
1.2.1.3. Medidores.....	4
1.2.2. Equipo primario.....	4
1.2.2.1. Transformador de corriente	5
1.2.2.2. Transformador de potencial	5
1.2.2.3. Interruptor de potencia.....	5
1.2.2.4. Transformador	6
1.2.2.5. Seccionador.....	7
1.2.2.6. Pararrayo.....	7
1.2.2.7. Reactor	7
1.2.2.8. Barrajes	8
1.2.3. Servicios auxiliares	8

1.2.4.	Red de tierras.....	10
1.3.	Principios generales de la iluminación	11
1.3.1.	Definición: la luz	12
1.3.2.	Características de la luz	12
1.3.2.1.	Refracción	13
1.3.2.2.	Dispersión	15
1.3.2.3.	Reflexión	16
1.3.2.4.	Flujo luminoso	17
1.3.2.5.	Rendimiento o eficacia luminosa.....	18
1.3.2.6.	Intensidad luminosa	18
1.3.2.7.	Iluminancia	19
1.3.2.8.	Luminancia	20
1.3.2.9.	Deslumbramiento	21
1.3.3.	Tipos de iluminación.....	23
1.3.3.1.	Iluminación general	24
1.3.3.2.	Iluminación general localizada	24
1.3.3.3.	Iluminación suplementaria.....	24
1.3.3.4.	Iluminación exterior	25
2.	CRITERIOS PARA LA SELECCIÓN DE LUMINARIAS.....	27
2.1.	Tipos de iluminación.....	27
2.1.1.	Iluminación directa	28
2.1.2.	Iluminación indirecta.....	28
2.1.3.	Iluminación semidirecta	28
2.1.4.	Iluminación difusa o mixta	29
2.1.5.	Iluminación semi-indirecta	29
2.2.	Condiciones de servicio	29
2.2.1.	Interior	30
2.2.2.	Exterior	31

2.3.	Tipos de luminarias	32
2.3.1.	Lámparas incandescentes	32
2.3.2.	Lámparas halógenas de tungsteno.....	34
2.3.3.	Lámparas fluorescentes	36
2.3.4.	Lámparas de mercurio de alta presión	38
2.3.5.	Lámparas de sodio de baja presión.....	40
2.3.6.	Lámparas de sodio de alta presión.....	42
2.3.7.	Led.....	44
2.4.	Normas de seguridad	46
2.4.1.	Grados de protección de luminarias	46
2.4.1.1.	Protección contra objetos y suciedad ..	48
2.4.1.2.	Protección contra agua y humedad	49
2.4.1.3.	Protección contra golpes	51
2.4.2.	Clase de protección eléctrica.....	52
2.4.3.	Ta (temperatura de funcionamiento).....	53
2.5.	Fotometría de las luminarias	54
2.5.1.	Curvas fotométricas.....	54
2.5.2.	Dispersión del haz	58
2.5.2.1.	Haz estrecho.....	59
2.5.2.2.	Haz medio.....	60
2.5.2.3.	Haz ancho.....	60
2.5.3.	Especificaciones técnicas de luminarias.....	60
3.	MÉTODOS DE CÁLCULO PARA EL DISEÑO DEL SISTEMA LUMÍNICO.....	63
3.1.	Método del lumen o cálculo del flujo luminoso	63
3.2.	Método de cavidad zonal.....	69
3.2.1.	Cavidad zonal	74
3.2.2.	Cavidad de techo	75

3.2.3.	Cavidad de piso.....	75
3.3.	Método de punto por punto	76
3.4.	Método de lúmenes promedio para el cálculo de proyectores	77
3.5.	<i>Software</i> de iluminación	82
3.5.1.	DIALux.....	83
3.5.2.	CalcuLux	85
4.	ANÁLISIS DE LA EFICIENCIA ENERGÉTICA EN ILUMINACIÓN CON LED	87
4.1.	Selección de luminaria led	87
4.2.	Eficiencia energética luminarias led vs., luminarias de vapor de sodio de alta presión	88
4.2.1.	Promedio de consumo de energía	91
4.2.2.	Costo-beneficio	96
4.3.	Evaluación luminotécnica.....	99
5.	CASO PRÁCTICO: DISEÑO DEL SISTEMA DE ILUMINACIÓN LED EN UNA SUBESTACIÓN.....	103
5.1.	Descripción de la subestación eléctrica externa, de alta tensión.....	103
5.1.1.	Planos de diseño de la subestación	104
5.1.2.	Evaluación del sistema de iluminación actual	105
5.1.2.1.	Gráfico de distribución de luminarias ..	105
5.1.2.2.	Mediciones de iluminancia	106
5.1.2.3.	Características de las luminarias.....	114
5.1.2.4.	Consumo energético del sistema de iluminación exterior	116

5.2.	Determinación del nivel de iluminación recomendado implementando el artículo 924 “Subestaciones” de la Normativa Oficial Mexicana (NOM) 001-Sede-2012.....	116
5.2.1.	Niveles de iluminación para áreas de trabajo	136
5.2.2.	Comparación del nivel de iluminancia del sistema de iluminación actual vs., sistema de iluminación ideal	137
5.2.3.	<i>Confort</i> visual.....	139
5.3.	Selección de equipo a utilizar	140
5.4.	Diseño de iluminación led mediante el software DIALux EVO 8,1	142
5.4.1.	Plano de distribución de luminarias	145
5.4.2.	Cantidad de luminarias	147
5.4.3.	Altura de instalación de luminarias	148
5.4.4.	Análisis de las gráficas fotométricas.....	151
5.4.5.	Análisis de los niveles de iluminación.....	159
5.4.6.	Análisis del consumo energético	162
	CONCLUSIONES	167
	RECOMENDACIONES.....	169
	BIBLIOGRAFÍA.....	171
	APÉNDICES	178
	ANEXOS.....	191

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES

FIGURAS

1.	Subestación eléctrica	2
2.	Ejemplo conexión transformadores auxiliares en una subestación eléctrica.....	10
3.	Refracción de la luz entre dos medios	14
4.	Variación del ángulo de refracción por variación de longitud de onda	15
5.	Reflexión especular de la luz	16
6.	Luminancia.....	21
7.	Índice UGR para deslumbramiento	23
8.	Lámpara incandescente de Thomas A. Edison.....	33
9.	Rendimiento Luminoso vs., Duración de funcionamiento.....	34
10.	Ciclo del halógeno.....	36
11.	Partes de la lámpara fluorescente y funcionamiento.....	37
12.	Diagrama de conexión de una lámpara fluorescente	38
13.	Lámpara de mercurio de alta presión.....	39
14.	Lámpara de sodio a baja presión	40
15.	Características lámparas vapor de sodio baja presión.....	41
16.	Lámpara de sodio de alta presión	42
17.	Características lámparas vapor de sodio alta presión.....	43
18.	Estructura de un diodo de alta potencia.....	44
19.	Rendimiento luminoso vs., vida útil	45
20.	Sistema de protección IP	47

21.	Grados de protección contra objetos sólidos externos indicados por el primer número característico.....	48
22.	Grados de protección contra el agua indicados por el segundo número característico	50
23.	Grado de protección IK frente al impacto.....	51
24.	Sólido fotométrico de una luminaria.....	55
25.	Interpretación vectorial del sólido fotométrico	56
26.	Distribución luminosa de una luminaria	57
27.	Representación matricial del flujo luminoso.....	57
28.	Diagrama cartesiano.....	58
29.	Dispersión de una luminaria	59
30.	Ficha técnica proyector led Philips BVP091 200 W	61
31.	Requisitos de iluminación para (áreas) interiores, tareas y actividades.....	64
32.	Distribución local y altura de luminaria.....	66
33.	Cavidad de techo, zonal y piso	69
34.	Reflectancia efectiva.....	72
35.	Iluminación directa e indirecta sobre un punto localizado.....	77
36.	Distancias de referencia de un proyector para el cálculo del CBU	79
37.	Panel de trabajo de DIALux	84
38.	Diseño de iluminación DIALux para una subestación eléctrica exterior.....	85
39.	Ahorro energético por sustitución de lámparas.....	89
40.	Eficiencia luminosa	90
41.	Efecto Purkinje.....	92
42.	Relación en el desempeño visual en el rango mesópico durante condiciones nocturnas exteriores.....	93
43.	Consumo KWh/año vs., cantidad de luminarias instaladas VSAP vs., led	95

44.	Comportamiento lineal del consumo de energía para luminarias VSAP vs., led	96
45.	División de zona de trabajo	101
46.	Puntos de muestreo para un valor de $K = 2$	102
47.	Plano de Subestación	104
48.	Distribución de luminarias	106
49.	Luxómetro STEREN HER-410	107
50.	Puntos de medición de iluminancia zona 230 kV	109
51.	Puntos de medición de iluminancia zona de transformadores	111
52.	Puntos de medición de iluminancia zona de 69 kV	114
53.	Luminaria Vapor de Sodio Alta Presión 400 W Lithonia <i>Lighting</i>	115
54.	Matriz de intensidad luminosa – Zona 230 kV.....	122
55.	Candela Luminaria Lithonia Lightning 400 W Sodio Alta Presión	123
56.	Matriz de intensidad luminosa – Zona Transformadores.....	129
57.	Matriz de intensidad luminosa – Zona 69 kV.....	135
58.	Comparación nivel de iluminación Ideal vs., real	138
59.	Diseño RSXF1 led.....	140
60.	Emisión de luz distribución MFL.....	141
61.	Emisión de luz distribución NFL	142
62.	Vista 3D Subestación Externa, de alta tensión, con tecnología led ...	143
63.	Vista Lateral Izquierda.....	144
64.	Vista de planta	144
65.	Alzado	145
66.	Distribución de luminarias en el sistema de iluminación	146
67.	Orientación del haz de la distribución de luminarias	147
68.	Cantidad de luminarias instaladas	148
69.	Lithonia Lighting RSXF1 led P4 50 K NFL	149
70.	Lithonia Lighting RSXF1 led P4 50 K MFL.....	150
71.	Zona 230 kV / Intensidad lumínica perpendicular	151

72.	Diagrama de isolíneas de intensidad lumínica / Zona 230 kV	152
73.	Colores falsos de intensidad lumínica / Zona 230 kV	153
74.	Zona Transformadores / Intensidad lumínica perpendicular	154
75.	Diagrama de isolíneas de intensidad lumínica / Zona Transformadores.....	155
76.	Colores falsos de intensidad lumínica / Zona Transformadores	156
77.	Zona 69 kV / Intensidad lumínica perpendicular	157
78.	Diagrama de isolíneas de intensidad lumínica / Zona 69 kV	158
79.	Colores falsos de intensidad lumínica / Zona 69 kV	159
80.	Evaluación luminotécnica del sistema de iluminación.....	160
81.	Resultados de iluminación	161
82.	Resumen general del sistema de iluminación.....	161
83.	Variación VAN vs., tasa de descuento	166

TABLAS

I.	Valores máximos permitidos de resistencia de red de tierras de una subestación en función de su capacidad	11
II.	Tipos de luminarias de interior	30
III.	Tipos de luminarias de exterior	31
IV.	Factores de reflexión	67
V.	Factor de utilización (Cu)	68
VI.	Reflectancias efectivas de cavidad de techo y piso en porcentaje	71
VII.	Coeficiente de utilización para método de cavidad zonal	73
VIII.	Factor de depreciación según tipo de luminaria	82
IX.	Datos técnicos para selección de luminarias	88
X.	Promedio de consumo de energía VSAP vs., led	95
XI.	Costo/Beneficio <i>led</i> vs., HPS	98
XII.	Puntos de medición mínimos – Método cuadrícula.....	100

XIII.	Especificaciones Luxómetro HER-410	107
XIV.	Mediciones de iluminancia zona 230 kV en sitio	110
XV.	Mediciones de iluminancia zona transformadores en sitio	112
XVI.	Mediciones de iluminancia zona 69 kV en sitio	113
XVII.	Datos de luminaria	115
XVIII.	Consumo energético sistema de iluminación exterior	116
XIX.	Niveles mínimos de iluminancia requeridos para subestaciones eléctricas según Normativa 001-Sede-2012	117
XX.	Cálculo del alumbrado exterior para la zona de 230 kV	118
XXI.	Coordenadas para matriz de intensidad luminosa	121
XXII.	Cálculos obtenidos sistema de iluminación 230 kV	124
XXIII.	Cálculo del alumbrado exterior para la zona de transformadores	124
XXIV.	Coordenadas para matriz de intensidad luminosa	128
XXV.	Cálculos obtenidos sistema de iluminación transformadores	130
XXVI.	Cálculo del alumbrado exterior para la zona de 69 kV	130
XXVII.	Coordenadas para matriz de intensidad luminosa	134
XXVIII.	Cálculos obtenidos sistema de iluminación 69 kV	136
XXIX.	Consumo energético sistema de iluminación exterior con tecnología led	162
XXX.	Costo/beneficio de luminarias en el diseño de subestación	163
XXXI.	Período de recuperación	164
XXXII.	Cálculo del VAN y TIR para luminarias RSXF1 led	164
XXXIII.	Valores de VAN con Tasa de descuento variable	165

LISTA DE SÍMBOLOS

Símbolo	Significado
h_m	Altura de montaje
α	Ángulo
S	Área de superficie
cd	Candela
N	Cantidad de luminarias a utilizar
RCR	Cavidad de cuarto
RCF	Cavidad de piso
RCC	Cavidad de techo
C_m	Coefficiente de mantenimiento
C_u	Coefficiente de utilización
CBU	Coefficiente de utilización del haz
E_{Horizontal}	Componente lumínica horizontal
E_{Vertical}	Componente lumínica vertical
KWh/año	Consumo potencia eléctrica anual
FDS	Depreciación de la luminaria
η	Eficacia luminosa
Lm/w	Eficiencia lumínica
F_m	Factor de mantenimiento
P_w	Factor de reflexión
Φ	Flujo luminoso
Θ_T	Flujo luminoso total
IP	Grado de protección
E	Iluminancia

E_m	Iluminancia media
K	Índice de local
I	Intensidad luminosa
kV	Kilo voltio
L_m	Lumen
L	Luminancia
Lx	Lux
MWh	Mega watt hora
m	Metro
m^2	Metro cuadrado
N_e	Número de luminarias
P	Potencia eléctrica
IK	Protección contra golpes
FDf	Relación de pérdidas del flujo de la luminaria
Tan^{-1}	Tangente inversa
VCD	Voltaje corriente directa
V	Voltios
W	Watt

GLOSARIO

Alumbrado	Conjunto de luces eléctricas que alumbran un lugar, especialmente una vía pública o recinto exterior.
Aparamenta	Conjunto de aparatos de conexión, soporte, mando, medida y protección, así como los soportes destinados a la producción, transporte, distribución y transformación de la energía eléctrica.
CFE	Comisión Federal de Electricidad.
CIE	Comisión Internacional de Electricidad.
Código IP	Un sistema codificado para indicar los grados de protección proporcionados por una envoltura contra el acceso a partes peligrosas, ingreso de agua y entregar información adicional en conexión con tal protección.
Incandescencia	Fenómeno de emisión de luz a través del calor cuando la corriente circula por el filamento de una luminaria.
IRC	Es una medida de la capacidad que una fuente luminosa tiene para reproducir fielmente los colores de varios objetos en comparación con una fuente de

luz natural o ideal. Es un dato a tener en cuenta sobre todo en aplicaciones que se requiera reproducir fielmente los colores del área a iluminar.

Led

Diodo Emisor de Luz (siglas del nombre en inglés).

Luxómetro

Instrumento de medición que permite medir la iluminancia real en lux.

Muestreo

Técnica de selección de una muestra a partir de una población estadística.

NOM

Normativa Oficial Mexicana.

Proyector

Aparato para proyectar un haz luminoso de gran intensidad, concentrando y dirigiendo en una dirección determinada la luz procedente de un foco.

Sólido Fotométrico

Curvas de intensidad luminosa que su volumen se encuentra representado mediante un dibujo tridimensional.

RESUMEN

Esta investigación se basa en el análisis y realización de un diseño del sistema lumínico para una subestación externa, de alta tensión, empleando luminarias con tecnología led que sustituyen las luminarias de vapor de sodio de alta presión que comúnmente se emplean en este tipo de instalaciones.

El diseño se realiza mediante el *software* DIALux EVO 8.1 y se basa en la Normativa Oficial Mexicana NOM-001-SEDE-2012 del artículo 924 Subestaciones.

Identifica, además, las recomendaciones mínimas de luminosidad que deberá poseer una instalación en distintas áreas de trabajo para saber si es apta en cuanto a la luminosidad perpendicular en el plano y la uniformidad de su distribución.

Dicha instalación se fundamenta mediante el principio de eficiencia energética y supone una mejora respecto a los sistemas de iluminación tradicionales.

OBJETIVOS

General

Proponer un diseño de alumbrado eficiente proporcionando los niveles lumínicos adecuados para realizar trabajos dentro de una subestación externa de alta tensión.

Específicos

1. Realizar un estudio lumínico para observar las deficiencias en un sistema de iluminación.
2. Seleccionar la luminaria adecuada que provea la mejor eficiencia.
3. Conocer el funcionamiento del *software* DIALux EVO 8.1 para diseños de iluminación exterior.
4. Realizar un análisis de consumo energético con luminarias tipo led y de vapor de sodio de alta presión.

INTRODUCCIÓN

Una subestación eléctrica es una instalación conformada por equipos con el fin de transformar los niveles de tensión o seccionar un tramo para dirigir el flujo eléctrico y de esta manera poder ser transportado o distribuido.

La correcta operación de los equipos por parte del operador de la subestación eléctrica y los mantenimientos periódicos que realiza el personal de taller eléctrico en horarios nocturnos, requieren que la subestación posea un alumbrado en óptimas condiciones para realizar dichas tareas en un ambiente seguro.

La eficiencia energética y la calidad de la luz en ambientes laborales son temas que a lo largo de la última década han tomado mayor relevancia.

Por tal motivo la presente investigación realiza un estudio de los niveles lumínicos adecuados en el patio de llaves de una subestación eléctrica, siguiendo las condiciones lumínicas para ambientes laborales estipulados en la Normativa Oficial Mexicana NOM-001-SEDE-2012.

Se realizará una propuesta de diseño para el alumbrado de una subestación eléctrica con luminarias tipo led que cumplan los requerimientos mínimos para la correcta luminosidad según el área de trabajo y evaluar su eficiencia energética con las tradicionales luminarias de vapor de sodio de alta presión que comúnmente son utilizadas para este tipo de iluminación.

1. SUBESTACIÓN ELÉCTRICA Y LOS PRINCIPIOS DE SU ILUMINACIÓN

Los sistemas de iluminación para una zona de trabajo son el principal componente para la realización de un buen desempeño laboral o personal.

Los principios de la iluminación de las subestaciones eléctricas se basan en la utilización de los métodos de proyectores que son generalmente utilizados para diseños lumínicos de exterior.

En un principio la iluminación no enfatizaba la importancia del *comfort* visual o el ahorro energético dentro de las instalaciones, con el paso del tiempo muchos de estos diseños no cumplen con las exigencias mínimas que se utilizan en la actualidad. Vista de ello es el actual uso de lámparas de vapor de sodio, haluro metálico, vapor de mercurio, entre otros, que si bien son capaces de satisfacer en gran medida los requerimientos exigidos en la actualidad, existen mejores avances que proporcionarían una mejor eficiencia del sistema.

En Guatemala, la Comisión Nacional de Energía Eléctrica (CNEE) establece que, “para el diseño de instalaciones de transmisión, en cuanto al diseño eléctrico se refiere, se debe garantizar con una memoria de cálculo la correcta iluminación de las instalaciones”¹.

¹ Comisión Nacional de Energía Eléctrica (CNEE). *Alumbrado público en Guatemala. Alternativas para el ahorro y la eficiencia energética*. <https://cie.gov.ar/web/images/Metodo-cuadrícula-HyST.pdf>. Consulta: 15 de marzo de 2021.

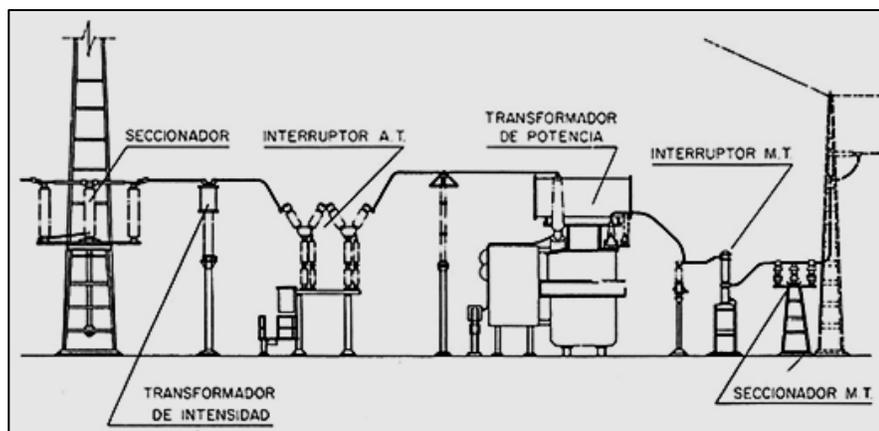
En México por otra parte ya “se establece un valor mínimo de luminosidad requerido según el área de trabajo y la tarea que se realice en el mismo, el cual se ejecuta en la Normativa Oficial Mexicana NOM-001-Sede-2012”².

Los softwares de iluminación actuales proveen de una herramienta esencial para los requisitos lumínicos requeridos en una subestación eléctrica.

1.1. Subestación eléctrica: definición

Una subestación eléctrica es una instalación la cual se conforma por un conjunto de dispositivos eléctricos capaces de dirigir el flujo de energía, elevar o disminuir niveles de tensión, monitorear el funcionamiento del mismo y aislar zonas que presenten un riesgo para los equipos ante una falla dentro del sistema.

Figura 1. Subestación eléctrica



Fuente: GRANERO, Andrés. *Maniobras en Instalaciones de alta tensión*.
imseingenieria.blogspot.com.es. Consulta: 19 de noviembre de 2019.

² Normativa Oficial Mexicana (NOM) 001-SEDE-2012. *Instalaciones eléctricas (utilización)*. Artículo 924 Subestaciones. <http://www.issste-cmn20n.gob.mx/Datos/Normas/136NOM.pdf>. Consulta: 17 de octubre de 2020.

1.2. Elementos principales de una subestación

Las partes que conforman una subestación ya sea por su nivel de importancia que representan dentro de la instalación o por la función que desempeñan se pueden clasificar de la siguiente manera:

- Equipos de tablero
- Equipo primario
- Servicios auxiliares
- Red de tierras

1.2.1. Equipos de tablero

Se refiere a todo instrumento de protección o medición que se encuentre instalado en un tablero para su ejecución dentro de una subestación eléctrica.

1.2.1.1. Fusibles

Es un dispositivo eléctrico de protección, que posee un filamento en su interior, que al producirse una sobre corriente causada por alguna falla o exceso de carga dentro del sistema, provoca un aumento de temperatura lo suficientemente alto para que el material interno se funda, siendo superados los valores máximos soportados de fábrica y de esta manera queda abierto el circuito para prevenir daños mayores en la instalación.

1.2.1.2. Relevadores de protección

Dispositivo eléctrico de control/medición, cuya finalidad es incrementar la seguridad de un sistema eléctrico mediante la monitorización en tiempo real de los parámetros eléctricos adquiridos de los instrumentos de medida. Los relés de protección poseen una lógica interna capaz de ser configurada considerando características de sensibilidad y confiabilidad de operación para su correcto funcionamiento.

La lógica de un relé de protección se encarga de enviar orden de apertura a los interruptores en presencia de una contingencia que supere los valores de seguridad para los cuales fue configurado y de esta manera proteger el equipo principal de un daño mayor.

1.2.1.3. Medidores

Instrumentos instalados frecuentemente en los tableros de control/medición capaces de medir componentes eléctricas de interés tales como la energía activa y reactiva.

1.2.2. Equipo primario

Conjunto de elementos eléctricos que se encuentran físicamente conectados a la red principal de alta tensión dentro de una subestación eléctrica, constituyen la parte más importante dentro de la instalación.

1.2.2.1. Transformador de corriente

Transformador de medida capaz de transformar valores de corriente nominal en relación con el número de espiras que posea el bobinado primario respecto del secundario. Se utilizan para reducir las corrientes de línea del lado primario a un valor mensurable que permite que elementos de protección y medición trabajen de forma adecuada.

1.2.2.2. Transformador de potencial

Transformador de medida capaz de transformar valores de tensión nominal en relación con el número de espiras que posea el bobinado primario respecto del secundario. Se utilizan para disminuir los niveles de tensión primaria en valores admisibles en el lado del secundario para que los elementos de protección y medición puedan operar.

1.2.2.3. Interruptor de potencia

Dispositivo eléctrico que posee un mecanismo en su interior capaz de interrumpir el paso del flujo eléctrico en condiciones de operación normal o de falla. Generalmente, dentro de subestaciones de media y alta tensión, se encuentran interruptores de gas hexafluoruro de azufre (SF₆) el cual es utilizado como un dieléctrico capaz de extinguir el arco eléctrico que se presenta dentro de la cámara de extinción al momento de interrumpir el paso de la corriente.

El funcionamiento de este se basa en la presurización del gas hacia la cámara de extinción mediante una serie de resortes con engranajes que mueven un cilindro que se encarga del cierre y apertura de los contactos. La apertura/cierre de un interruptor de potencia, en condiciones normales, se utiliza

para realizar mantenimientos programados. Cuando la apertura de un interruptor es debida a condiciones de falla en el sistema, se debe a que los relevadores de protección que se encargan de monitorear los parámetros eléctricos detectan un valor anormal enviando un pulso eléctrico a la bobina de apertura interna del interruptor de potencia, para realizar una apertura de emergencia, con el fin de cortar el flujo eléctrico para evitar sobretensiones que puedan causar un mayor daño, generalmente al transformador de potencia.

1.2.2.4. Transformador

Es una máquina eléctrica de grandes dimensiones que posee la capacidad de variar el nivel de tensión según sea la relación de transformación que exista entre la bobina primaria y la bobina secundaria, las cuales se encuentran acopladas en ambos extremos del núcleo ferromagnético que se encuentra en su interior. Según sea la relación de transformación, estos pueden ser clasificados como transformadores elevadores o reductores.

El funcionamiento del transformador se basa en el principio del electromagnetismo por estas razones al circular corriente alterna por una bobina se generan campos magnéticos variables, dando lugar a una fuente de voltaje inducida, provocando un flujo magnético que circulará por el núcleo, induciendo una fuente de voltaje en la segunda bobina.

La variación del nivel de tensión se asocia a la relación de transformación que viene dada por el cociente entre el número de espiras del bobinado primario respecto al número de espiras del bobinado secundario.

1.2.2.5. Seccionador

Elemento mecánico conformado por dos cuchillas metálicas en su parte superior, las cuales al hacer contacto mediante un mecanismo de accionamiento eléctrico o en su defecto de forma manual, permiten el paso del flujo eléctrico.

Son comúnmente utilizados para seccionar líneas o zonas en las cuales se pretenda realizar mantenimiento de los equipos; cabe mencionar que la apertura o cierre de sus cuchillas debe hacerse bajo condiciones de operación sin carga al no poseer la capacidad de extinguir un arco eléctrico.

1.2.2.6. Pararrayo

Elemento de protección cuya finalidad es drenar las sobretensiones que se presenten en la subestación por descargas electroatmosféricas o de maniobra. El pararrayo se encarga de captar el rayo y conducir esta energía a la red de tierras que se encuentra instalada bajo la subestación eléctrica, una correcta operación del pararrayo previene la aparición de transitorios eléctricos en los equipos, los incrementos momentáneos en la tensión nominal del sistema, para garantizar la protección del factor humano ante los gradientes de potencial que puedan presentarse ante un evento de este tipo.

1.2.2.7. Reactor

Los reactores de potencia son un componente eléctrico utilizados en subestaciones eléctricas para compensar reactivos debido al efecto capacitivo que se presenta en líneas de transmisión con longitudes muy largas y de esta

manera controlar las sobretensiones que genera este fenómeno a lo largo del sistema de potencia.

1.2.2.8. Barrajes

Son conductores eléctricos agrupados en 3 fases R, S y T que permiten, a lo largo de su distribución, conectar una cantidad variable de campos eléctricos cada uno a través de un seccionador junto a un interruptor de potencia, donde es posible distribuir la energía eléctrica, ya sea de fuentes de generación o estaciones transformadoras.

Su principal característica, según su tipo de conexión es aumentar la confiabilidad, flexibilidad y seguridad de la subestación eléctrica.

Algunos tipos de conexiones comúnmente utilizados son: barra simple, barra principal con barra de transferencia, doble barra más barra de transferencia, interruptor y medio.

1.2.3. Servicios auxiliares

Los servicios auxiliares en AC (corriente alterna) cumplen una función muy importante a nivel patio de subestación, la cual es la de proporcionar la energía requerida tanto a los mandos remotos que operan los equipos eléctricos tales como seccionadores, interruptores, cambiadores de *taps*, ventilación de los transformadores, iluminación y sistemas de protección.

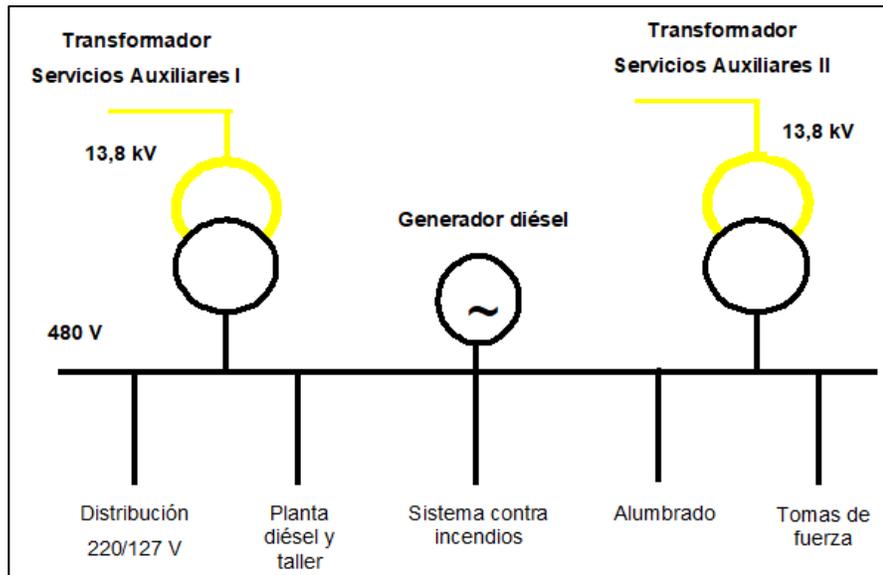
Se componen generalmente en 2 niveles de distribución iniciando en el patio de la subestación en donde se encuentran los transformadores de servicios auxiliares, los cuales en el lado de alta corresponden al terciario del

transformador principal, el cual posee un nivel de tensión de 13,8 kV. Por consecuencia siendo este transformador auxiliar en valor de tensión 13,8 kV / 480 V, distribuye de esta manera la corriente a un nivel de tensión apto para el equipo que sea necesario.

El segundo nivel de distribución corresponde a la conexión del transformador auxiliar 13,8 kV / 480 V hacia un transformador usualmente utilizando 480 V / 220 V, utilizado para las tomas de fuerza y alimentar de esta manera cargas monofásicas.

Con el fin de proporcionar una mayor confiabilidad del sistema de potencia suelen utilizarse 2 transformadores auxiliares, si la subestación lo permite conjuntamente con una planta de emergencia Diesel, unidos mediante una barra de transferencia la cual puede ser de accionamiento manual o automático, esto con el fin de en caso de falla exista un sistema de respaldo capaz de aceptar la carga de los servicios para poder operar la subestación en caso de contingencia o en casos más serios de un disparo general o *blackout*.

Figura 2. **Ejemplo conexión transformadores auxiliares en una subestación eléctrica**



Fuente: elaboración propia, utilizando Microsoft Word 2016.

1.2.4. Red de tierras

Sistema de protección empleado en subestaciones para absorber las sobretensiones que puedan presentarse en condiciones de operación o falla con el fin de proteger al personal, proteger los equipos o de proveer una ruta sencilla dentro del sistema. Consiste en una malla formada por uno o varios electrodos enterrados bajo tierra que se caracterizan, en condiciones ideales, de poseer una baja resistencia óhmica. Tanto los equipos como las estructuras se encuentran aterrizados a esta red y, su baja resistencia, facilita de mejor manera la circulación de corriente.

Los métodos de puesta a tierra varían dependiendo de la aplicación, para subestaciones de transmisión se realizan las siguientes consideraciones previas, establecidas en normas plenamente estandarizadas para su correcta instalación.

Artículo 33. Resistencia a Tierra. La puesta a tierra deberá ser conformada por una o más varillas conectadas entre sí. Es necesario que este posea un valor de resistencia a tierra bajo, para minimizar los riesgos a las personas, en función de la tensión de paso y de contacto. (...) 33.4 Subestaciones. Se desea obtener un valor máximo menor a 5,000 voltios para un potencial a tierra.³

Tabla I. **Valores máximos permitidos de resistencia de red de tierras de una subestación en función de su capacidad**

CAPACIDAD DE LA SUBESTACION (MVA)	RESISTENCIA DE LA RED DE TIERRAS (Ohmios)
< 1	3
1 – 10	2
10 – 50	1
50 – 100	0.5
> 100	0.2

Fuente: CNEE; Normas NTDOID. *Resoluciones*. p. 46.

1.3. Principios generales de la iluminación

La iluminación es un elemento muy complejo, siendo ésta definida y representada dentro del espectro electromagnético, pero este último no es ni el más ni menos importante, la luz posee características propias que es

³ Comisión Nacional de Energía Eléctrica (CNEE). *Alumbrado público en Guatemala. Alternativas para el ahorro y la eficiencia energética*. p. 46.

indispensable estudiar para su correcta implementación dentro de una subestación eléctrica.

En subestaciones eléctricas el criterio de iluminación juega un rol importante en consecuencia del riesgo en que incurren los operadores de las mismas al manipular los distintos elementos electromecánicos, o el personal de taller eléctrico cuando es necesaria una prueba de mantenimiento programado o reparación en caso de emergencia.

1.3.1. Definición: la luz

La luz es una forma de energía que posee una dualidad física, la cual es comprendida como una onda electromagnética y como una partícula.

La luz es una forma de energía y comúnmente relacionada a la radiación electromagnética dispersa en todo el universo y se define como un campo electromagnético (definida mediante ondas) o como fotones (definida como partícula), tanto ondas como fotones se desplazan en el espacio a la velocidad de la luz.⁴

Como se ve, esta definición, hace énfasis a la dualidad característica de la luz que determina la rara cualidad de este fenómeno, en la cual como partícula es capaz de interactuar con la materia y del mismo modo se propaga como una onda en el espacio-tiempo.

1.3.2. Características de la luz

La luz ha sido objeto de estudio a lo largo de la historia de la humanidad, con el paso del tiempo se ha investigado su comportamiento, así como sus

⁴ FONTAL, Bernardo. *El espectro electromagnético y sus aplicaciones*. p. 4.

propiedades físicas para su entendimiento y comprensión de los fenómenos que para nuestros ojos son visibles.

1.3.2.1. Refracción

Cuando un haz de luz cambia de un medio de propagación a otro este experimenta un cambio en su ángulo siendo este fenómeno llamado refracción. Esto sucede cuando los índices de refracción del medio donde se propagan son distintos.

Esta variación del ángulo fue estudiada por el matemático Willebrord Snell 1621, quien formuló la Ley de Snell, donde expresa la relación entre el ángulo de incidencia y entre el ángulo de refracción.

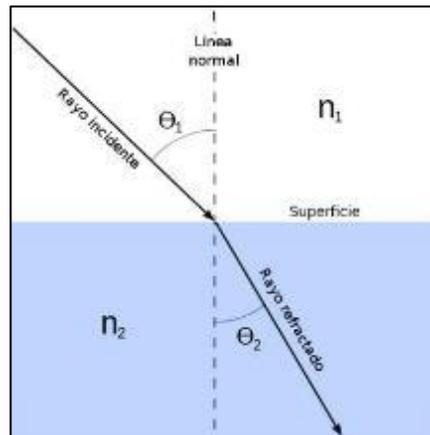
“La ley de Snell permite calcular el ángulo de refracción de la luz cuando esta atraviesa una superficie de separación entre dos medios que son poseedores de un índice de refracción distinto”.⁵

La ley de Snell está compuesta por n_1 , n_2 siendo estos los índices de refracción de los medios de propagación, las variables θ_1 junto a θ_2 representan los ángulos de incidencia y refracción respectivamente.

$$n_1 \text{ Sen } \theta_1 = n_2 \text{ Sen } \theta_2 \quad (\text{Ec. 1})$$

⁵ VELOSO, Cristian. *Ley de Snell-Reflexión y Refracción*. <https://www.electrontools.com/Home/WP/ley-de-snell-reflexion-y-refraccion/>. Consulta: 19 de febrero de 2020.

Figura 3. **Refracción de la luz entre dos medios**



Fuente: VELOSO, Cristian. *Ley de Snell-Reflexión y Refracción*.

<https://www.electrontools.com/Home/WP/ley-de-snell-reflexion-y-refraccion/>. Consulta: 19 de febrero de 2020.

La ecuación que describe el índice de refracción se define como:

$$n = \frac{c}{v} \quad (\text{Ec. 2})$$

El índice de refracción (n) se encuentra definida como la variación entre la velocidad de la luz en el vacío (c) siendo igual a $2,9979 \times 10^8$ m/s y la velocidad en el medio de propagación (v).

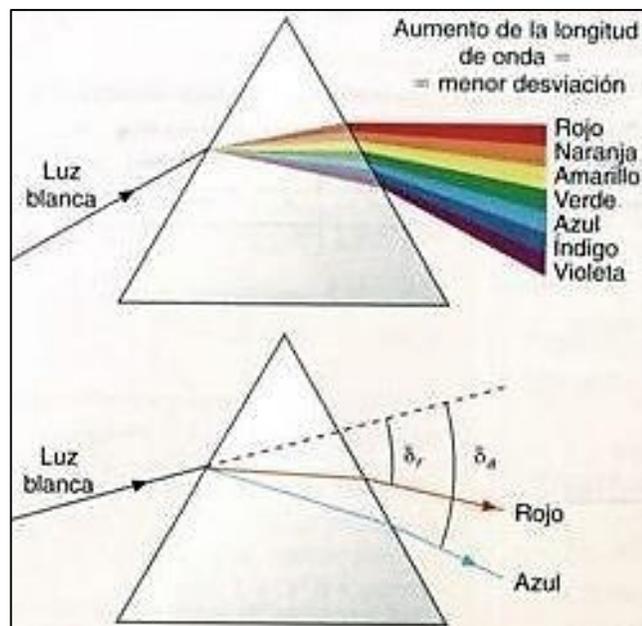
El índice de refracción en el vacío es de 1 debido a que la luz se desplaza en el vacío de manera constante, la propagación de luz en otro material suele disminuir su velocidad provocando que el índice de refracción sea $n > 1$.

1.3.2.2. Dispersión

Esta propiedad de la luz se caracteriza por la dispersión del haz de luz cuando este se encuentra compuesto por distintas longitudes de onda; siendo esta llamada luz policromática.

La dispersión es causada debido a que al descomponerse una luz policromática en diferentes radiaciones monocromáticas estas sufren una variación en su ángulo de refracción. Esta variación es mayor cuanto menor sea la longitud de onda y será menor cuanto mayor sea su longitud.

Figura 4. **Variación del ángulo de refracción por variación de longitud de onda**



Fuente: BAUTISTA, Leandro. *Ley de Snell. Prisma óptico. Longitud de onda. Arco iris.*
<https://www.fisicanet.com.ar/fisica/ondas/ap12-dispersion-de-la-luz.php>. Consulta: 26 de febrero de 2020.

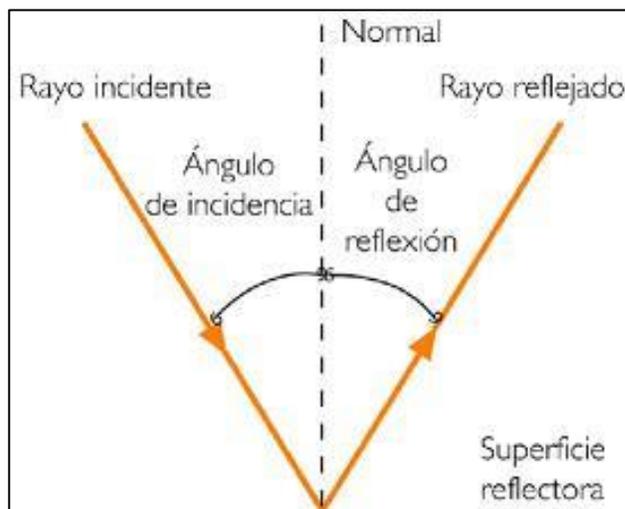
El ángulo de refracción de un rayo de luz al atravesar un medio material depende de su longitud de onda. En el fenómeno de la dispersión de la luz las distintas longitudes de onda que componen un rayo tomarán un ángulo de refracción ligeramente distinto.⁶

La dispersión de los rayos según su longitud de onda provocara que al propagarse a través de un medio, estos lo hagan cada uno a una velocidad diferente.

1.3.2.3. Reflexión

Esta característica de la luz da lugar cuando un haz de luz tiene contacto sobre otro medio de propagación, pero de modo contrario a la refracción una parte no incide, sino que se ve reflejada, a esto se le llama reflexión.

Figura 5. Reflexión especular de la luz



Fuente: CANDIA, Sebastián. *Reflexión especular y difusa*.

<http://fisica1m.blogspot.com/2009/08/reflexion-especular.html>. Consulta: 4 de marzo de 2020.

⁶ Fisicalab. *Dispersión de la luz*. <https://www.fisicalab.com/apartado/dispersion-luz>. Consulta: 4 de marzo de 2020.

Para el estudio de la reflexión de la luz se utilizan las leyes de la reflexión o leyes de Snell, según las cuales la reflexión especular de la luz sucede cuando esta se ve reflejada sobre un medio material liso, el ángulo de incidencia Θ_i respecto el ángulo de reflexión Θ_r será el mismo.

$$\theta_i = \theta_r \quad (\text{Ec. 3})$$

Cuando un haz de luz interactúa con un material compuesto por irregularidades se le conoce como reflexión difusa, las cuales provocan que la luz se vea reflejada en varias direcciones, al utilizar las leyes de la reflexión los ángulos de incidencia y reflexión no serán iguales.

1.3.2.4. Flujo luminoso

Se le denomina de esta manera a la potencia o caudal de energía luminosa irradiada en diversas direcciones por una fuente de luz, las cuales son percibidas por la sensibilidad del ojo humano como luz visible.

Para efectos de luminotecnia el flujo luminoso se encuentra definido con el símbolo (Φ) y su unidad de medida es el lumen (lm).

Símbolo: Φ

- Unidad de medida: Lumen (lm)

El flujo luminoso es una característica lumínica que nos permite calcular los niveles mínimos de iluminación para áreas de trabajo, determina la eficiencia energética de una luminaria y provee los parámetros necesarios para

analizar la depreciación del flujo luminoso en una luminaria a lo largo de su vida útil.

1.3.2.5. Rendimiento o eficacia luminosa

Se utiliza para expresar la eficiencia de una fuente lumínica que se encuentra formado por la relación de la cantidad total de flujo luminoso emitido entre el consumo energético y las pérdidas de la misma.

Símbolo: η

- Unidad de medida: $\frac{Lm}{W}$

$$\eta = \frac{\Phi (Lm)}{P (W)} \quad (Ec. 4)$$

Donde Φ es la potencia luminosa irradiada expresada en lúmenes y P es la potencia consumida en watts.

1.3.2.6. Intensidad luminosa

La intensidad luminosa definida por el símbolo (I) es igual al caudal de energía luminosa en lúmenes dirigida en una dirección puntual que se encuentra contenido dentro de un ángulo solido esférico medido en estereorradianes (sr). Su unidad de medida es la candela (cd).

La unidad de candela se definió en la antigüedad debido a que la principal fuente de luz eran las velas, en la actualidad se adoptó una nueva definición propuesta en 1979. La candela se define como la intensidad luminosa,

expresada en una dirección, de una fuente capaz de emitir radiación monocromática a una frecuencia de 540×10^{12} hertz y eso tiene una intensidad de radiación en esa dirección de 1/683 watt por estereorradián, General Conference on Weights and Measures (1979).

Símbolo: I

- Unidad de medida: (cd) $\frac{Lm}{sr}$

$$I = \frac{\Phi (Lm)}{\omega (sr)} \quad (Ec. 5)$$

1.3.2.7. Iluminancia

La iluminancia definida por el símbolo (E) representa el caudal de energía luminosa (Φ) que incide sobre un área de superficie S (m^2). Su unidad de medida es el lux (lx).

En subestaciones eléctricas, la iluminancia representa un factor bastante predominante según el tipo de tarea que se desempeñe en ciertas zonas de trabajo. Existen normativas luminotécnicas, que veremos más adelante, las cuales sugieren un nivel mínimo de iluminancia para desempeñar las funciones correctamente y sin riesgo.

La iluminancia de una superficie establece que la relación de flujo luminoso respecto a una superficie dada será mayor, si este aumenta o incide en un área respectivamente menor y viceversa.

Un lux es la iluminancia producida por un flujo luminoso de 1 lumen que se distribuye uniformemente sobre una superficie de 1 metro cuadrado.

Símbolo: E

- Unidad de medida: (Lux) $\frac{lm}{m^2}$

$$E = \frac{\Phi (Lm)}{S (m^2)} \quad (Ec. 6)$$

1.3.2.8. Luminancia

Es la cantidad de luz que percibe el ojo de una persona cuando ésta se ve reflejada sobre una superficie iluminada directa o indirectamente. Se encuentra asociada a la sensación de brillo que logramos percibir.

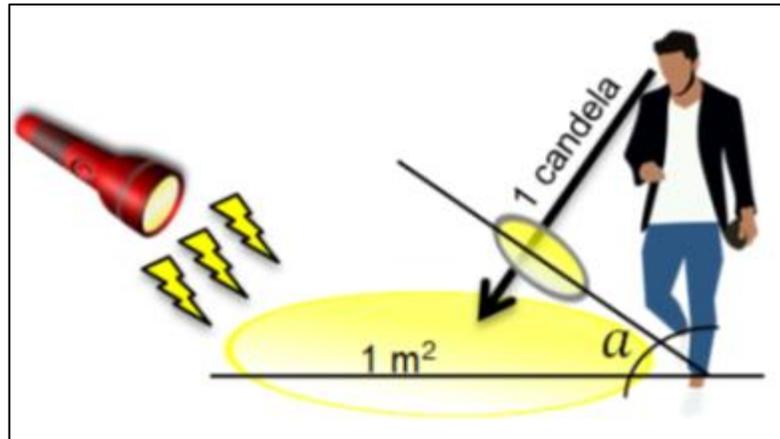
Símbolo: L

- Unidad de medida: $\frac{cd}{m^2}$

$$L = \frac{I (cd)}{S * \cos a (m^2)} \quad (Ec. 7)$$

La luminancia se encuentra definida por el símbolo (L) la cual expresa la relación de intensidad luminosa con unidad de medida de candela entre el producto del área superficial (S) por el coseno del ángulo sólido (α).

Figura 6. **Luminancia**



Fuente: elaboración propia, utilizando Microsoft Word 2016.

1.3.2.9. **Deslumbramiento**

El deslumbramiento consiste a la perturbación que percibe el ojo humano cuando la luminosidad de una fuente de luz afecta de tal modo que la visión puede tornarse difusa o causar dilatación de la pupila, a tal punto que los objetos se pierdan de vista.

En subestaciones eléctricas se pretende, como en todo sistema de iluminación, un adecuado sistema lumínico, para lo cual se considera el deslumbramiento en sus cálculos para dos tipos de iluminación: plano horizontal y plano vertical.

En la iluminación de plano horizontal, la zona de trabajo es a nivel del suelo, esto para que la zona de circulación sea sin riesgos y la posibilidad de observar fugas de aceite, aisladores rotos esparcidos por el graven entre otras circunstancias, que pongan al personal en peligro. La Comisión Federal de

Electricidad de México (CFE) recomienda para el deslumbramiento del plano horizontal de subestaciones eléctricas de potencia, lo siguiente: “Se recomienda que las luminarias capaces de proveer una componente horizontal de luz se fijen de tal manera que se minimice la percepción de deslumbramiento directo, el cual de hecho podría disminuir la visión”⁷

En la iluminación de plano vertical, la zona de trabajo es localizada a nivel o por encima del ojo, producto de que las inspecciones de rutina al equipo eléctrico son: lectura de medidores de temperatura, gas SF₆, niveles de aceite del tanque de expansión e inspección visual de fusibles, celdas capacitivas, resortes de los interruptores de potencia, fugas en los transformadores de potencia, de potencial, de corriente y demás equipo.

Por el tipo de trabajo que se emplea en subestaciones eléctricas, el deslumbramiento en un plano vertical no puede ser perturbador, en consecuencia, la Comisión Federal de Electricidad recomienda para este plano las siguientes consideraciones.

Es indudable que el sistema de iluminación que se utiliza para esta zona, es del tipo directo, cuando se trata de iluminar el equipo, como zonas de circulación. Se debe efectuar una cuidadosa localización de las unidades de alumbrado, a fin de asegurar una mejor distribución de la luz en las áreas más importantes a iluminar, así como también, se debe dirigir la luz, de tal modo, que el operador pueda percibir el equipo sin que incidan directamente sobre sus ojos los rayos de luz, evitando de este modo deslumbramiento.⁸

El índice de deslumbramiento unificado definido como UGR por la Comisión Internacional de Iluminación (CIE) representa el valor de

⁷ CFE. *Diseño de sistemas de alumbrado para centrales hidroeléctricas*. <https://idoc.pub/documents/iec-60529-ip-en-espaol-on23dxdgjl0>. Consulta: 20 de mayo de 2020.

⁸ *Ibíd.*

deslumbramiento que afecta a una persona. El valor aceptado de deslumbramiento suele ser comprendido entre 16 a 25.

Figura 7. Índice UGR para deslumbramiento

La imagen muestra una tabla con un fondo azul oscuro y texto blanco. El título es 'Criterio de deslumbramiento'. La tabla tiene dos columnas: el primer valor de la UGR y la descripción correspondiente. Hay una línea horizontal amarilla que separa los valores 19 y 22.

Criterio de deslumbramiento	
- 10	Imperceptible
13	Apenas perceptible
16	Perceptible (adecuado para la tarea precisa con los ojos)
19	Apenas aceptable (adecuado para tareas visuales promedio)
22	Inaceptable (adecuado para tareas visuales moderadas)
25	Apenas incómodo (adecuado para tareas visuales simples)
28 +	Incómodo

Fuente: MARIN, Pau. *Qué es el índice UGR Y cómo puede mejorar la iluminación en espacios laborales*. <https://www.iluminet.com/indice-deslumbramiento-ugr/>. Consulta: 24 de marzo de 2020.

1.3.3. Tipos de iluminación

La iluminación de un espacio físico para efectos de una correcta implementación requiere la utilización de técnicas que puedan proveer una iluminación adecuada enfocada al tipo de trabajo que se desea realizar. Se pueden clasificar en cuatro tipos básicos: Iluminación general, general localizada, suplementaria y de exterior.

1.3.3.1. Iluminación general

Este tipo de iluminación se caracteriza por poseer un nivel de iluminación uniforme distribuido en el área de trabajo. Mediante una separación uniforme de las luminarias se logra este tipo de iluminación. Esta forma de iluminación la encontramos en la sala de mando de una subestación eléctrica, comedores, oficinas.

1.3.3.2. Iluminación general localizada

La iluminación general localizada, como su nombre lo indica, sigue los parámetros de la iluminación general, pero a diferencia de esta, su función principal es proporcionar altas intensidades de luz para iluminar zonas específicas de trabajo. Este tipo de iluminación se puede encontrar en las casetas de control que contienen los tableros de protección y medición, cuartos de batería, salas de transferencia de servicios auxiliares, cuartos de distribución.

Para este tipo de aplicación se suele emplear un mayor número de luminarias distribuidas uniformemente o incrementar la potencia de las mismas para lograr el nivel de iluminación necesario.

1.3.3.3. Iluminación suplementaria

La iluminación suplementaria se caracteriza por iluminar con una intensidad alta aquellas zonas de trabajo que requieran una iluminación específica, las cuales no son capaces de ser iluminadas de forma adecuada mediante la iluminación general, por esta razón se instalan de forma que a la distribución general de luminarias se agrega un sistema de iluminación directo.

Este tipo de iluminación es recomendable utilizarse en zonas de trabajo que requieran tareas que empleen un nivel de detalle alto por ello es común verlas en áreas tales como talleres eléctricos, ubicación de plantas de emergencia y zonas de capacitación con maquinaria establecida.

1.3.3.4. Iluminación exterior

La iluminación exterior tiene como función principal brindar la fuente de luz necesaria para distinguir el entorno cuando la luz ambiental se torna mínima.

El alumbrado exterior de una subestación eléctrica emplea la iluminación general para zonas de circulación y sistemas de iluminación directos, principalmente instalados en los muros cortafuegos entre transformadores de potencia. Este debe ser capaz de garantizar el *confort* visual con los niveles de luminosidad necesarios para desempeñar los mantenimientos o rondas de inspección sin ninguna dificultad.

El sistema de control de iluminación deberá ser conectado de tal manera que su operación sea automática mediante el uso de celdas fotoeléctricas y un sistema de accionamiento manual de respaldo.

2. CRITERIOS PARA LA SELECCIÓN DE LUMINARIAS

Los análisis que conlleva un diseño de iluminación tienen como pilar, la correcta selección del tipo de luminaria que se empleará en el proyecto.

Los criterios empleados para la determinación de la luminaria a utilizar se clasifican en 5 indicadores:

- Tipos de iluminación
- Condiciones de servicio
- Tipos de luminarias
- Normas de seguridad
- Fotometría de las luminarias

2.1. Tipos de iluminación

En el diseño de sistemas de iluminación hay 5 tipos de sistemas usualmente considerados para iluminar un ambiente: directa, indirecta, directa e indirecta, puntual y semi-indirecta.

2.1.1. Iluminación directa

La iluminación directa se caracteriza por dirigir el flujo lumínico hacia un área específica con un grado de utilización del haz de luz por encima del 90 %. Las fuentes de luz de este sistema carecen de algún tipo de difusor que suavice o atenúe su potencia y se aconseja que posean un haz más cerrado, el riesgo de deslumbramiento suele ser mayor a los demás sistemas generando sombras del área iluminada en nuestro campo de visión.

2.1.2. Iluminación indirecta

La iluminación indirecta se fundamenta en la característica de reflexión de la luz, de esta manera su flujo luminoso es dirigido hacia una pared, viéndose este reflejado e iluminando el entorno con un ambiente natural. Entre sus similitudes con la iluminación directa se puede señalar el aprovechamiento del haz de luz por encima del 90 % así como también la falta de algún difusor entre luminaria con la zona iluminada.

Para este tipo de aplicaciones es conveniente que la superficie donde el haz se verá reflejado sea de una tonalidad clara para lograr un mejor aprovechamiento de reflexión del haz de luz.

2.1.3. Iluminación semidirecta

Este tipo de iluminación es de tipo directo, pero en su construcción, en la parte trasera de la fuente de luz, es poseedor de un difusor o material translucido que permite que parte del haz de luz entre 10 % a 40 % se vea reflejado adicionalmente hacia las paredes para que en su parte frontal se aproveche un 90 % de iluminación directa. Las ventajas de este tipo de

iluminación se aprovechan en la disminución del deslumbramiento y obtener sombras apreciablemente más suaves.

2.1.4. Iluminación difusa o mixta

Este tipo de iluminación se caracteriza por transmitir su haz de luz tanto de manera directa como indirecta, mediante el uso de difusores, la propagación de luminosidad de ambos tipos será de un 50 %, proporcionando una distribución lumínica uniforme de su entorno.

En este tipo de iluminación no se presentan sombras, aunque cabe resaltar que su uso se emplea únicamente para proporcionar un ambiente agradable, siendo utilizado generalmente para proyectos lumínicos donde los objetivos sean primordialmente de uso decorativo.

2.1.5. Iluminación semi-indirecta

Este tipo de fuentes de luz se caracterizan por poseer un difusor o vidrio translucido en la parte baja, permitiendo de este modo que un 10 a 40 % del haz de luz sea dirigido mediante iluminación directa a la superficie y en su parte superior el haz de luz sea dirigido hacia el techo sin difusor para que el 90 % de este mismo sea aprovechado por reflexión.

2.2. Condiciones de servicio

El amplio catálogo de luminarias que podemos encontrar en el mercado hace de esto una tarea difícil cuando llega el momento de realizar una selección; los fabricantes emplean una categorización según su condición de servicio, para el tipo de aplicación al cual se encuentran destinadas. Derivado

de lo anterior, las luminarias se clasifican de la siguiente manera: luminarias de interior y luminarias de exterior.

2.2.1. Interior

Las luminarias para aplicaciones de interior suelen ser utilizadas para oficinas, industrias, vivienda, centros comerciales tanto para el aprovechamiento del uso lumínico como tal, como también para fines decorativos, sus grados de protección ante agentes externos como el agua o el polvo no suelen ser muy altos y en algunos casos no son requeridos.

Los proveedores de luminarias dentro de la clasificación de uso interior ofrecen distintos tipos de luminarias según el uso que se desee brindarle. En la siguiente tabla se hace mención a los tipos de luminaria comúnmente encontrado dentro de sus catálogos.

Tabla II. Tipos de luminarias de interior

Luminarias de interior		
Luminarias de instalación fija	Downlights	
	Uplights	
	Up-downlights	
	Luminarias de retícula	
	Luminarias con reflector secundario	
	Bañadores	De techo
		De pared
	De suelo	
Luminarias desplazables	Luminarias de integración arquitectónica	
	Proyectores	
	Bañadores de pared	
Estructuras luminosas		
Sistemas de conductores de luz		

Fuente: CASTILLA CABANES, Nuria. *Criterios de elección de luminarias.*

<https://riunet.upv.es/bitstream/handle/10251/30370/Criterios%20de%20elecci%C3%B3n%20de%20luminarias.pdf?sequence=1>. Consulta: 11 de abril de 2020.

2.2.2. Exterior

Las luminarias destinadas para uso en exteriores, se encontraran, por obvias razones, expuestas a condiciones atmosféricas tales como lluvia, polvo y humedad. Por las condiciones a las que se exponen estas luminarias, se caracterizan principalmente de poseer, con un grado de protección ip estandarizado, para reforzar su aislamiento.

Algunas de estas luminarias poseen también, un grado de protección IK, el cual se refiere a la resistencia que presenta ante golpes.

En la tabla siguiente se detallan los tipos de luminaria comúnmente utilizados para este tipo de aplicación.

Tabla III. **Tipos de luminarias de exterior**

Luminarias de exterior	
Luminarias de instalación fija	Alumbrado público y residencial
	Proyectores para deportes, áreas y gasolineras
	Proyectores para túneles
	Solares

Fuente: PHILIPS. *Luminarias de exterior*. https://www.lighting.philips.es/prof/luminarias-de-exterior#pfpath=0-OCOUTD_GR. Consulta: 14 de abril de 2020.

2.3. Tipos de luminarias

Desde el desarrollo exitoso de la primera bombilla incandescente de fabricación comercial en manos del inventor y científico Thomas Alva Edison⁹ a finales del siglo XIX a la actualidad, se han realizado distintos avances en el estudio de la eficiencia energética para la implementación de nuevas tecnologías capaces de aprovechar al máximo la transformación de energía eléctrica en energía luminosa.

Con el paso del tiempo, estos avances se han reflejado en una nueva variedad de fuentes de iluminación, que en la era moderna de la electricidad presentan nuevas formas de funcionamiento. Las luminarias se pueden clasificar por su forma de construcción como detallamos a continuación.

2.3.1. Lámparas incandescentes

Este tipo de lámpara data de finales del siglo XIX cuando su creador, Thomas Alva Edison, se vio en la tarea de inventar una lámpara capaz de competir con la iluminación de la época, basada en aceite y gas. No fue hasta el año 1879 cuando Thomas A. Edison solicitó la patente comercial en la cual proponía el uso de un filamento de carbono contenido mediante una ampolla al vacío.

Los componentes para la fabricación de la primera bombilla eléctrica comercial se pueden observar en la figura 8.

⁹ Biografía de Thomas Alva Edison. *Biografías y Vidas*. <https://www.biografiasyvidas.com/biografia/e/edison.htm>. Consulta: 14 de abril de 2020.

Figura 8. Lámpara incandescente de Thomas A. Edison



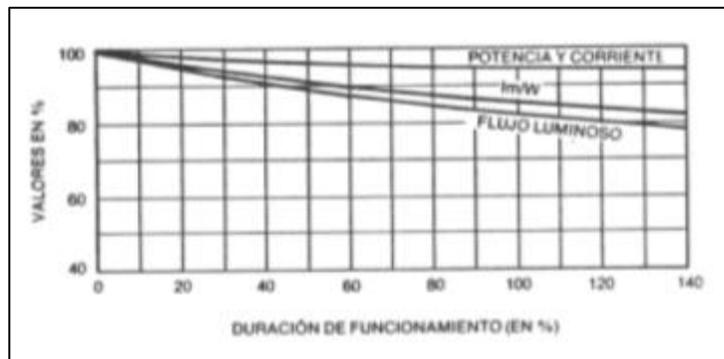
Fuente: La Vanguardia. *La bombilla de Edison*. https://nanopdf.com/download/ia-bombilla-de-edison_pdf. Consulta: 15 de abril de 2020.

Se llamaron lámparas incandescentes como resultado de lo que ocurría en su interior, pues el funcionamiento comprendía el circular corriente eléctrica a través de un conductor compuesto por un filamento de carbono, el cual llega a un punto llamado incandescencia, provocado por efecto joule, haciendo que este logre emitir radiación lumínica.

El pasar de los años hizo que el uso del filamento de carbono fuera sustituido por un filamento de tungsteno o wolframio, lo que prolongo su vida útil inicialmente de 40 horas hasta un promedio de 1 000 horas. Pero este sistema es poco eficiente en cuanto a la potencia que consume aproximadamente solo un 20 % se manifiesta como energía lumínica y el otro 80 % se convierte en calor como resultado en la actualidad se están viendo sustituidas.

Otro problema existente es el material del que se compone el filamento, este con el tiempo se va evaporando cuando llega a temperatura de incandescencia, provocando que la ampolla se vaya oscureciendo, lo que afecta directamente el flujo luminoso a lo largo de su vida útil. Este comportamiento se puede observar en la figura 9.

Figura 9. **Rendimiento luminoso vs., duración de funcionamiento**



Fuente: Instalaciones Industriales. *Lámparas y sus componentes*.

http://www.profesores.frc.utn.edu.ar/industrial/InstalacionesIndustriales/Art_Interes/LampComp.pdf. Consulta: 16 de abril de 2020.

2.3.2. Lámparas halógenas de tungsteno

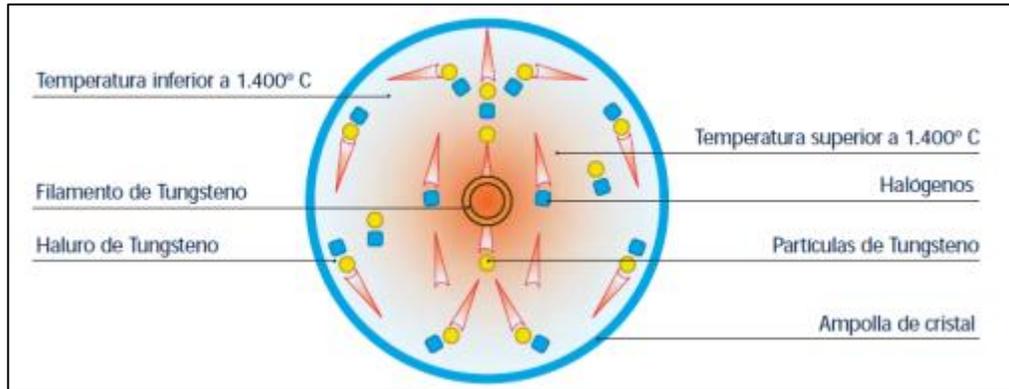
Este tipo de lámpara tiene el mismo principio de funcionamiento que las lámparas incandescentes pues circulan corriente eléctrica a través de un filamento de tungsteno, alcanzando el estado de incandescencia, para proporcionar el flujo luminoso. La principal diferencia entre ambas es que las lámparas halógenas contienen en el interior de la ampolla un componente halógeno tales como el cloro, yodo o el bromo, para prolongar su vida útil y disminuir el efecto de oscurecimiento por desprendimiento de material.

El principio de funcionamiento sucede cuando por condiciones normales el material de tungsteno o wolframio del filamento, en estado de incandescencia, presenta desprendimiento de material uniéndose a las partículas de halógeno, evitando de esta manera que se queden incrustadas en las paredes de la ampolla. Cuando estas partículas compuestas se acercan nuevamente al filamento por ende aumenta la temperatura, ocasionando que se separen nuevamente lo que resulta que el material desprendido vuelva a depositarse en el filamento, de esta manera siendo regenerado durante el proceso, para luego las partículas de halógeno quedar liberadas y repetir el ciclo.

Para que el ciclo de halógeno diera lugar, fue necesario disminuir el tamaño de las ampollas frente a las lámparas incandescentes, la principal razón es que necesita de temperaturas muy altas para propiciar esta reacción química. A esto se agrega que el material de fabricación de las ampollas tuvo que ser sustituido a cuarzo, pues este presenta un mejor rendimiento con resistencia a temperaturas menores de 1 300 °C y muy por encima de los 600 °C, que suelen ser necesarios para propiciar el ciclo en los límites de la bombilla.

En la figura 10 se observa el ciclo del halógeno en la cual es posible apreciar que en los bordes se presenta una temperatura inferior a 1 400 °C, en donde el material del filamento se combina con átomos de halógenos, y a medida que se acerca al filamento, la temperatura supera los 1 400 °C ocasionando que los mismos vuelvan a separarse, regenerando el filamento.

Figura 10. **Ciclo del halógeno**



Fuente: Fuente de luz y equipos auxiliares. *Lámparas incandescentes*.
<https://grlum.dpe.upc.edu/manual/sistemasIluminacion-fuentesDeLuz-LamparasIncandescentes.php>. Consulta: 20 de abril de 2020.

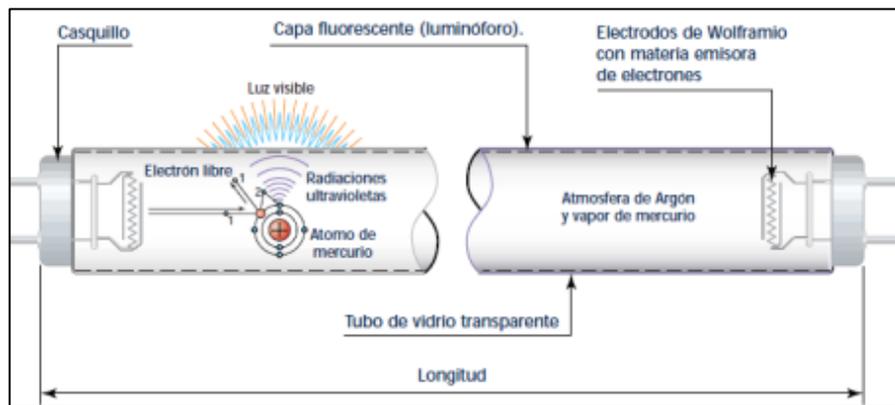
2.3.3. **Lámparas fluorescentes**

Las lámparas fluorescentes convencionales se encuentran compuestas de un tubo fluorescente, un cebador o arrancador y un balastro.

El principio de funcionamiento del tubo fluorescente consiste en excitar dos filamentos de wolframio ubicados uno en cada extremo del tubo, el cual en su interior contiene vapor de mercurio a baja presión junto a un tubo de gas inerte (usualmente Argón) y, en las paredes del tubo de vidrio un polvo fluorescente. Cuando los electrones circulan dentro del tubo, producto de la presencia de corriente eléctrica, estos entraran en contacto con los átomos de mercurio produciendo de esta manera una radiación ultravioleta, que al hacer contacto con el polvo fluorescente emiten luz visible.

Los componentes y el funcionamiento de un tubo fluorescente podemos observarlo detalladamente en la figura 11.

Figura 11. **Partes de la lámpara fluorescente y funcionamiento**

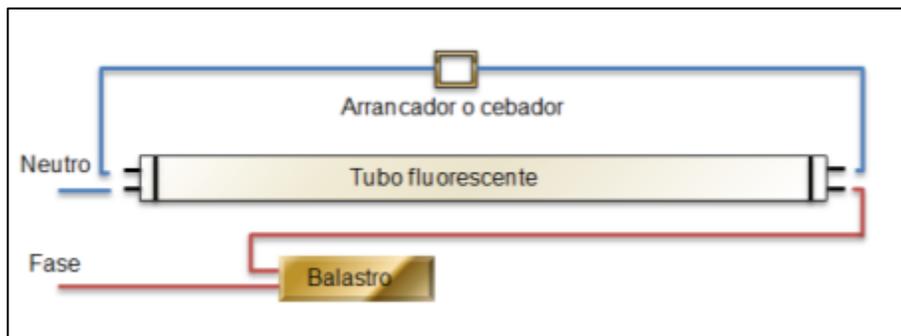


Fuente: Fuente de luz y equipos auxiliares. *Lámpara fluorescente*.
<https://grlum.dpe.upc.edu/manual/sistemasIluminacion-fuentesDeLuz-LamparasDeDescarga.php>. Consulta: 23 de abril de 2020.

Una lámpara fluorescente contiene un arrancador, el cual no es más que un interruptor de placas metálicas, que permite circular la corriente eléctrica de arranque y cuando el tubo reacciona químicamente emitiendo luz visible, estas placas quedan abiertas. Otro componente importante es el balastro el cual consiste de una bobina representada como una reactancia inductiva la cual proporciona la tensión necesaria para el arranque, que funciona como un limitador de corriente de ingreso que suministra al tubo fluorescente.

El diagrama de conexión de los componentes de una lámpara fluorescente se detalla en la siguiente figura.

Figura 12. **Diagrama de conexión de una lámpara fluorescente**



Fuente: elaboración propia, utilizando Microsoft Word 2016.

La eficacia luminosa de esta tecnología es bastante superior a las lámparas incandescentes, esto debido a que se produce un calentamiento menor en el sistema y por tanto la transformación en energía luminosa se aprovecha de mejor manera. Su vida útil suele estar comprendida entre 8 000 – 10 000 horas, pero cabe resaltar que, para la preservación de la luminaria, no es recomendable para uso intermitente, se recomienda ser utilizadas por períodos de tiempo continuo.

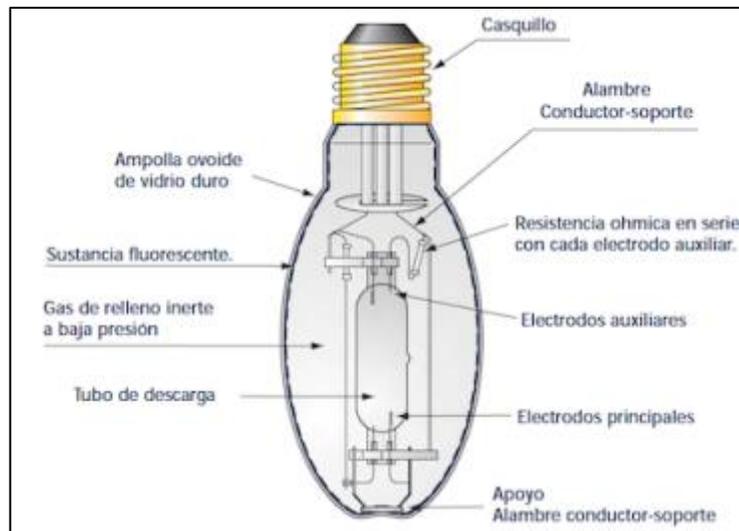
2.3.4. Lámparas de mercurio de alta presión

Se denominan lámparas de descarga porque tienen un gas en su interior que al recibir una descarga eléctrica es capaz de generar luz visible.

Al ser lámparas de mercurio son consideradas lámparas fluorescentes pero dada su alta presión proporciona una longitud de onda mayor y la capacidad de presentar potencias mayores frente a las de baja presión. El principio de funcionamiento es el mismo que el de las fluorescentes, consiste en excitar los electrodos auxiliares acompañados de los electrodos principales

emitiendo una descarga en el gas inerte, como el mercurio se comporta a baja presión, a medida que transcurre el tiempo la temperatura y la presión del mercurio va en aumento hasta que la descarga es capaz de aumentar el flujo luminoso, para luego ser controlada su intensidad por el balastro. En la figura 13 se detallan las partes principales que componen este tipo de luminaria.

Figura 13. **Lámpara de mercurio de alta presión**



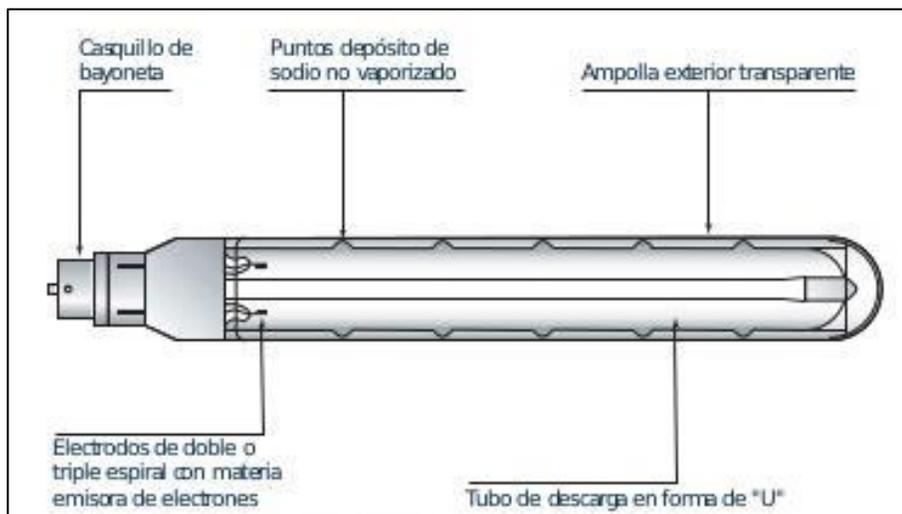
Fuente: Fuente de luz y equipos auxiliares. *Lámparas de vapor de mercurio de alta presión*.
<https://grlum.dpe.upc.edu/manual/sistemasIluminacion-fuentesDeLuz-LamparasDeDescarga-LamparaVaporMercurioAltaPresion.php>. Consulta: 29 de abril de 2020.

Es posible conectarlas a 220 V dada su característica de una alta tensión de encendido se suelen utilizar en alumbrado exterior, al mismo tiempo que poseen una eficiencia energética mayor, en el orden de 50 lumen/watt y extendiendo su vida útil hasta un promedio de 20 000 horas.

2.3.5. Lámparas de sodio de baja presión

Es un tipo de lámpara de descarga destinada para altas intensidades. En cuanto a eficiencia energética, se posiciona como de las lámparas más eficientes que podemos encontrar en el mercado, en el orden de 180 lm / W. Está compuesta por dos ampollas: la interna, en forma de u, que es donde sucede la descarga, en donde se encuentran contenidos átomos de Neón junto con gotas de sodio y, la externa que sirve de protección o recubrimiento térmico. La vida útil para esta luminaria suele ser de 15 000 horas.

Figura 14. Lámpara de sodio a baja presión



Fuente: LUMINOTECNIA. *Manual práctico de INDALUX.*

<https://es.slideshare.net/franksalinasg/08-lamparas>. Consulta: 3 de mayo de 2020.

El principio de funcionamiento de este tipo de luminarias consiste en la conversión a energía lumínica directamente proporcionada por la radiación de la descarga del sodio. Los filamentos de wolframio ubicados en los casquillos, como se observa en la figura 14, son los encargados de la excitación, los cuales

emiten una descarga directa en el Neón produciendo calor durante el proceso tornándose de un color rojizo característico de este elemento.

El aumento de temperatura dentro de la ampolla provoca una vaporización del sodio que, con el paso del tiempo, se torna en una luz amarillenta monocromática.

Figura 15. **Características lámparas vapor de sodio baja presión**

VAPOR DE SODIO BAJA PRESIÓN	
Potencias nominales	18-180 W
Eficacia	180 lm/W
Flujo luminoso	1.800-32.000 lm
Temperatura de color	2.000 K
IRC	0
Tono	Amarillo anaranjado
Espectro de emisión	Discontinuo
Tiempo de encendido	Entre 5 y 10 minutos
Tiempo de reencendido	Entre 5 y 10 minutos
Tamaño	Grande
Posición de funcionamiento	Universal



Fuente: Grlum.dpe.upc.edu *Sistemas de iluminación*. <https://grlum.dpe.upc.edu/manual/iluminacionViariaYUrbana-sistemasIluminacion.php>. Consulta: 6 de mayo de 2020.

Como se observa en la figura 15 el aprovechamiento luminoso ronda el 90 % con un flujo luminoso elevado, pero una característica que distingue esta luminaria de otras es su índice de reproducción cromática (IRC), siendo estas de un valor 0. Estos valores se pueden encontrar en la tabla de IRC de luminarias en el anexo 2.

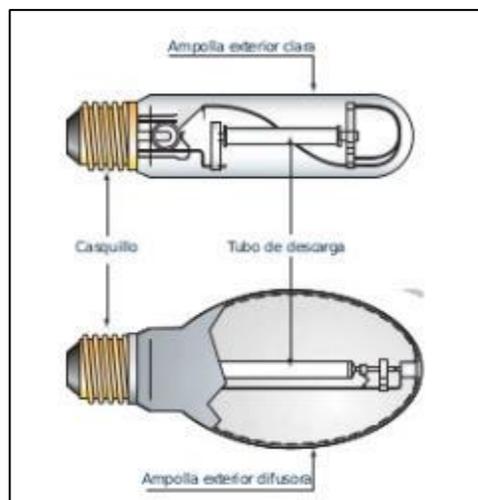
Para el IRC 0 que nos proporciona esta luminaria la apreciación de los colores expuestos a esta luz suelen parecer de otros colores distintos a los reales, aun siendo utilizadas en el ámbito industrial sus aplicaciones suelen

verse reducidas o utilizadas en condiciones donde la apreciación del color no sea un factor importante.

2.3.6. Lámparas de sodio de alta presión

Dada la problemática que surge respecto a la luz monocromática proporcionada por las lámparas de descarga de sodio a baja presión, un rediseño de estas luminarias para el mejoramiento de dicho valor, dio lugar a las lámparas de sodio de alta presión. El aumento de la presión del sodio agregado al uso en su interior de xenón junto con mercurio hizo posible el mejorar su reproducción cromática.

Figura 16. Lámpara de sodio de alta presión



Fuente: LUMINOTECNIA. *Manual práctico de INDALUX.*

<https://es.slideshare.net/franksalinassg/08-lamparas>. Consulta: 9 de mayo de 2020.

En la figura 16 se puede observar los componentes de estas luminarias, en su interior ahora posee un tubo de descarga que ante un crecimiento de la

presión en el sodio, en consecuencia, se obtienen aumentos de temperaturas superiores a los 1 000 °C. Para el manejo de estas temperaturas se sustituyeron las ampollas de vidrio o cuarzo, para su fabricación a base en óxido de aluminio sintetizado capaz de ser sometido a estos esfuerzos térmicos.

Este tipo de luminarias corresponden normalmente a las utilizadas para iluminación de subestaciones de potencia, por sus características favorables que suelen recomendar: “Las lámparas de vapor de sodio a alta presión, son las más económicas para estos casos, debido a su elevado rendimiento luminoso y a su larga duración útil en comparación con los otros tipos de lámparas”.¹⁰.

Evidentemente, es de suma importancia aclarar que dichas recomendaciones fueron estipuladas hace ya más de una década y el avance en reducción de costos de fabricación más el ahorro energético de nuevas tecnologías como las luminarias led, hacen posible esta investigación.

Figura 17. **Características lámparas vapor de sodio alta presión**

VAPOR DE SODIO ALTA PRESIÓN	
Potencias nominales	50-10.000 W
Eficacia	100 lm/W
Flujo luminoso	3.500 y 130.000 lm
Temperatura de color	2300 K
IRC	25
Tono	Amarillo dorado
Espectro de emisión	Discontinuo
Tiempo de encendido	300
Tiempo de reencendido	600
Tamaño	Grande
Posición de funcionamiento	Universal



Fuente: Sistemas de iluminación. *Luminarias*. <https://grlum.dpe.upc.edu/manual/iluminacionViariaYUrbana-sistemasIluminacion.php>. Consulta: 11 de mayo de 2020.

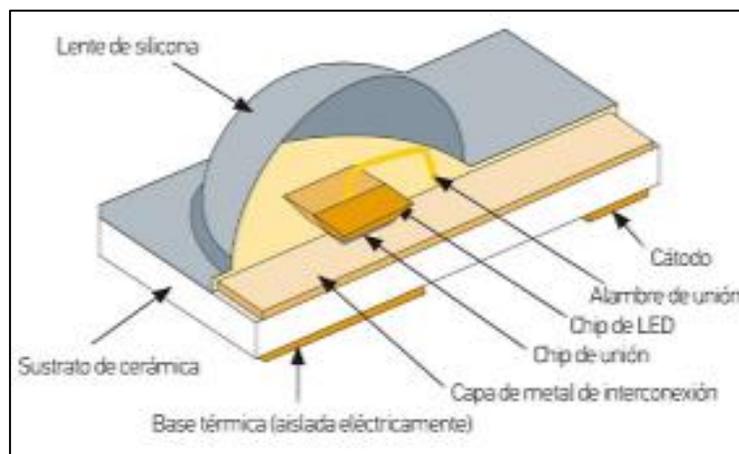
¹⁰ CFE. *Diseño de sistemas de alumbrado para centrales hidroeléctricas*. <https://idoc.pub/documents/iec-60529-ip-en-espaol-on23dxdgjl0>. Consulta: 20 de mayo del 2020.

2.3.7. Led

El ingeniero Nick Holonyak (1962) fue el creador del primer led en el espectro visible, se nombró de esta manera haciendo referencia a diodo emisor de luz. “Un diodo led, como tal, no es capaz de producir el flujo luminoso que se requiere en muchas aplicaciones, es común ser encontrados en agrupaciones de led para formar la cantidad luminosa deseada”¹¹.

En su interior están compuestos por dos capas llamadas ánodo y cátodo básicamente de materiales semiconductores, en las cuales el cátodo se encuentra cargado negativamente mientras que en el lado del ánodo existen huecos de electrones, los cuales, tras una correcta polarización la corriente eléctrica circula a través del ánodo hacia al cátodo, haciendo que en la capa transitoria exista un movimiento de electrones capaz de irradiar luz visible.

Figura 18. Estructura de un diodo de alta potencia



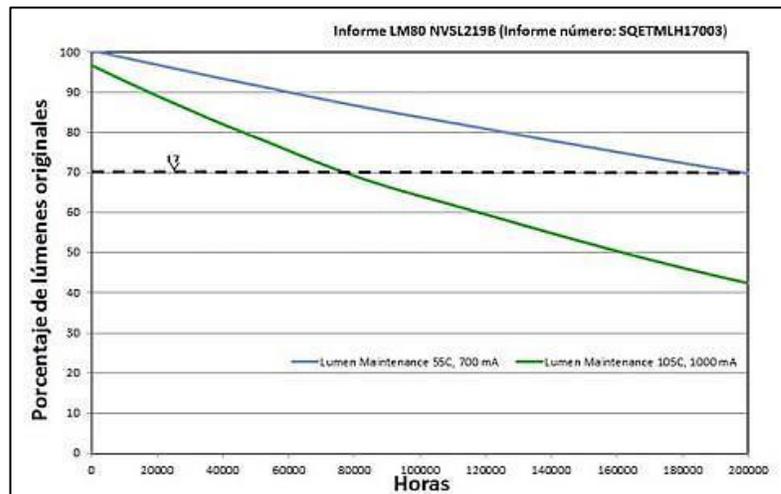
Fuente: HELLA TECH. *Faros led*. <https://www.hella.com/techworld/es/Informacion-Tecnica/Iluminacion/Faros-led-833/>. Consulta: 13 de mayo de 2020.

¹¹ CAVEDA, Eduard. *La iluminación artificial es arquitectura*. p. 163.

Esta tecnología goza de buenas características lumínicas pues aprovecha un 90 % la transformación de energía eléctrica en energía luminosa siendo esta entre 60-120 lm / W. Hace unos años su aplicación no era considerada globalmente pues es sabido los altos costos que significaba luminarias de este tipo, en la actualidad estos costos se han ido reduciendo, volviéndolas competitivas en virtud de la gran eficacia que poseen, así como la amplia vida útil que son capaces de proveer rondando entre 50 000 a 100 000 horas de funcionamiento.

En la figura 19 se observa que las luminarias led son capaces de mantener un flujo luminoso constante aún luego de miles de horas de uso, viendo un decremento de aproximadamente 30 % en su flujo luminoso cuando su vida útil ronda las 80 000 horas.

Figura 19. Rendimiento luminoso vs., vida útil



Fuente: CAVANILLAS, Belen. *Análisis sobre iluminación led industrial, intentando arrojar alguna luz sobre los led industriales.* <https://smart-lighting.es/analisis-sobre-iluminacion-led-industrial-intentando-arrojar-alguna-luz-sobre-los-led-industriales/>. Consulta: 14 de mayo de 2020.

A diferencia de otras tecnologías, las cuales su flujo luminoso se ve abruptamente comprometido a causa del desgaste o acumulación del deterioro de los filamentos en sus ampollas, las luminarias led por su parte, presentan una disminución lineal de este, aun superando su vida útil.

2.4. Normas de seguridad

Las normas de seguridad se refieren al estándar base al cual equipos eléctricos deben cumplir previa comercialización, mediante ensayos de fabricación que cumplan con las normas de protección eléctricas, esto para regulaciones técnicas que permitan la fácil distribución con la clasificación necesaria para distinguir su uso y su aplicación adecuada en diferentes entornos.

Para el diseño de un sistema de iluminación es necesario conocer la aplicación de dichas normas, con el fin de cumplir a cabalidad los procesos tanto de instalación, como el uso adecuado de luminarias para sus grados de protección, que veremos más adelante. Normas de fabricación y pruebas en luminarias se pueden encontrar en el anexo 1 al final de este documento.

2.4.1. Grados de protección de luminarias

La Comisión Internacional Electrotécnica con sus siglas en inglés IEC, en su norma internacional IEC 60529, se refiere a los grados de protección IP como: “El grado de protección frente al acceso de partes peligrosas, frente al ingreso de humedad o agua, y los cuales se encuentren previamente verificados por ensayos de laboratorio por métodos de ensayo normalizados”.¹².

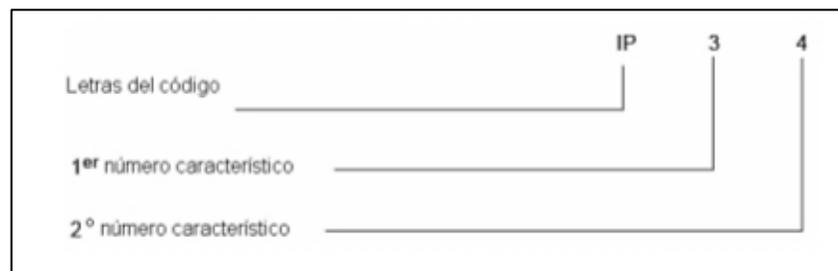
¹² IEC. *Grados de protección proporcionados por envolturas (Código IP)*. <https://idoc.pub/documents/iec-60529-ip-en-espaol-on23dxddgj10>. Consulta: 20 de mayo de 2020.

El grado de protección IP consiste en un sistema codificado proporcionado por la IEC, para definir las diferentes características de protección a las cuales debe ser sometido el equipo eléctrico, para su posterior comercialización, definiendo así su resistencia según la clasificación que obtengan.

Las luminarias frecuentemente, según sea la situación, deben estar sometidas a condiciones desfavorables, entre las cuales se puede mencionar su exposición al polvo, humedad o lluvia.

El sistema de clasificación de protección IP permite conocer a cuál de las condiciones mencionadas anteriormente, una luminaria puede operar de forma segura. Este sistema se encuentra definido en la figura 20.

Figura 20. **Sistema de protección IP**



Fuente: IEC. *Grados de protección proporcionados por envolturas (Código IP)*.

<https://idoc.pub/documents/iec-60529-ip-en-espaol-on23dxdgjl0>. Consulta: 20 de mayo de 2020.

El primer número característico proporciona la protección contra objetos y suciedad. El segundo número característico proporciona la protección que el equipo tiene ante la humedad o lluvia.

2.4.1.1. Protección contra objetos y suciedad

Esta protección representa el primer número característico del sistema de protección IP yendo del dígito 0 hasta el 6. Siendo el grado de protección 6 el más efectivo ante la capacidad de no permitir el ingreso de objetos o polvo al sistema. Por el contrario el grado de protección 0 representa la no protección del equipo ante esta situación.

En la figura 21 es posible observar los grados de protección IP correspondientes al primer número característico y sus rangos de protección ante agentes externos.

Figura 21. **Grados de protección contra objetos sólidos externos indicados por el primer número característico**

Primer número característico	Grado de protección		Condiciones de ensayo, vea
	Breve descripción	Definición	
0	No-protegido	-	-
1	Protegido contra objetos sólidos externos de 50 mm \varnothing y mayor	El calibre de acceso, esfera de 50 mm \varnothing , no penetrará completamente ¹⁾	13.2
2	Protegido contra objetos sólidos externos de 12,5 mm \varnothing y mayor con un dedo	El calibre de acceso, esfera de 12,5 mm \varnothing , no penetrará completamente ¹⁾	13.2
3	Protegido contra objetos sólidos externos de 2,5 mm \varnothing y mayor	El calibre de acceso, esfera de 2,5 mm \varnothing , no penetrará completamente ¹⁾	13.2
4	Protegido contra objetos sólidos externos de 1,0 mm \varnothing y mayor	El calibre de acceso de 1,0 mm \varnothing , no penetrará en absoluto ¹⁾	13.2
5	Protegido del polvo	El ingreso de polvo no está totalmente prevenido pero el polvo no penetrará en una cantidad que interfiera con la operación satisfactoria del aparato o deteriore la seguridad.	13.4 13.5
6	Hermético al polvo	No ingreso de polvo.	13.4 y 13.6

¹⁾ El diámetro total del calibre de ensayo no pasará a través de ninguna abertura de la envoltura.

Fuente: IEC. *Grados de protección proporcionados por envolturas (Código IP)*.

<https://idoc.pub/documents/iec-60529-ip-en-espaol-on23dxdggjl0>. Consulta: 23 de mayo de 2020.

Para efectos de iluminación de subestaciones eléctricas de intemperie, el grado de protección IP contra objetos debe ser de 6, esto debido a las condiciones a las cuales las luminarias son expuestas, con el fin de obtener una amplia durabilidad y confiabilidad del sistema.

2.4.1.2. Protección contra agua y humedad

Esta protección representa el segundo número característico del sistema de protección IP yendo del dígito 0 hasta el 8. Siendo el grado de protección 8 el más efectivo ante la capacidad de no permitir el ingreso de humedad o agua en cantidades que causen daño al sistema. Por el contrario, el grado de protección 0 representa la no protección del equipo ante esta situación.

En la figura 22 es posible observar los grados de protección IP correspondientes al segundo número característico y sus rangos de protección ante agentes externos.

Figura 22. Grados de protección contra el agua indicados por el segundo número característico

Segundo número característico	Grado de protección		Condiciones de ensayo, vea
	Breve descripción	Definición	
0	No-protegido	-	-
1	Protegido contra gotas de agua verticalmente descendentes	Las caídas de gotas verticales, no tendrán efectos perjudiciales	14.2.1
2	Protegido contra gotas de agua verticalmente descendentes cuando la envoltura está inclinada hasta 15°	Las caídas de gotas verticales, no tendrán efectos perjudiciales cuando la envoltura es inclinada a cualquier ángulo hasta 15° de cualquier lado del vertical	14.2.2
3	Protegido contra agua de rocío	El agua rociada a un ángulo hasta 60° de cualquier lado del vertical, no tendrá efectos perjudiciales	14.2.3
4	Protegido contra salpicaduras de agua	El agua salpicada contra la envoltura desde cualquier dirección, no tendrá efectos perjudiciales	14.2.4
5	Protegido contra chorros de agua	El agua proyectada en chorros contra la envoltura desde cualquier dirección, no tendrá efectos perjudiciales	14.2.5
6	Protegido contra chorros de agua de gran alcance	El agua proyectada en chorros de gran alcance contra la envoltura desde cualquier dirección, no tendrá efectos perjudiciales	14.2.6
7	Protegido contra los efectos de inmersión transitoria en agua	El ingreso de agua en cantidades que causen efectos perjudiciales, no será posible cuando la envoltura esté inmersa temporalmente en agua bajo condiciones normalizadas de presión y tiempo	14.2.7
8	Protegido contra los efectos de inmersión continua en agua	El ingreso de agua en cantidades que causen efectos perjudiciales, no será posible cuando la envoltura esté inmersa continuamente en agua bajo condiciones que se acordarán entre el fabricante y el usuario pero que sean más severas que para el número 7	14.2.8

Fuente: IEC. Grados de protección proporcionados por envolturas (Código IP).

<https://idoc.pub/documents/iec-60529-ip-en-espaol-on23dxddgj10>. Consulta: 26 de mayo de 2020.

Para efectos de iluminación de subestaciones eléctricas de intemperie, el grado de protección IP contra líquidos externos debe ser como mínimo 5, esto debido a las condiciones a las cuales las luminarias son expuestas, con el fin de obtener una amplia durabilidad y confiabilidad del sistema.

La selección de una luminaria adecuada para una subestación eléctrica externa, cumpliendo los requisitos para luminarias de exterior expuestas a condiciones climáticas variables, debería presentar un grado de protección

como mínimo IP65, para garantizar la protección de la instalación lumínica ante agentes como el polvo y la lluvia.

2.4.1.3. Protección contra golpes

La Comisión Internacional Electrotécnica con sus siglas en inglés IEC, en su norma internacional IEC 62262, se refiere a los grados de protección que suele tener una luminaria frente a impactos externos.

Tal y como se menciona anteriormente, con los grados de protección IP, para este estándar se denomina el código IK, el cual varía yendo del dígito 0 hasta el 10+. Siendo el grado de protección IK10+ el más efectivo ante la capacidad de soportar golpes externos que causen daño al sistema. Por el contrario, el grado de protección 0 representa la no protección del equipo ante esta situación.

Figura 23. Grado de protección IK frente al impacto

CÓDIGO IK	IK00	IK01	IK02	IK03	IK04	IK05	IK06	IK07	IK08	IK09	IK10	IK10+
Energía de impacto (Julios)	*	0.14	0.20	0.35	0.50	0.70	1.00	2.00	5.00	10.00	20.00	50.00

Fuente: IEC. *Grados de protección proporcionados por los recintos para equipos eléctricos contra impactos mecánicos externos (Código IK)*. <https://www.fqingenieria.com/es/conocimiento/niveles-de-proteccion-contragolpes-ik-din-en-62262-28>. Consulta: 26 de mayo de 2020.

En la figura 23 se puede observar que a medida que aumenta el grado de protección IK, aumenta proporcionalmente la energía contra el impacto medida en julios.

2.4.2. Clase de protección eléctrica

La Comisión Internacional Electrotécnica con sus siglas en inglés IEC, en su norma internacional IEC 61140, menciona los grados de protección contra choques eléctricos en su norma Protección contra los choques eléctricos Aspectos comunes a las instalaciones y a los equipos.

Se dividen en 4 tipos:

- Clase 0
- Clase I
- Clase II
- Clase III

La clase 0 no se incluye como protección, por estas razones representa el grado de riesgo mayor en cuanto a una descarga eléctrica presentada por una falla, al no poseer protección de conexiones a tierra más que solo el aislador en los conductores.

La clase I de equipo eléctrico, presenta la protección ante corto circuitos mediante la implementación permanente de una conexión a tierra unida por un conductor a sus partes metálicas. Esto con el fin de dirigir las corrientes de falla de una manera segura y disiparlas a tierra para evitar un daño mayor.

La clase II sustituye como medida de protección la conexión a tierra, previendo las zonas donde es posible de ocurrir sobretensiones que puedan

dañar el equipo, y blindándolo con un doble aislamiento o refuerzo aislante. Esta clase de protección es muy común en los equipos eléctricos en la actualidad.

La clase III se refiere a los equipos que están fabricados de tal manera que pueden operar mediante una fuente externa, como por ejemplo a base de baterías. Las tensiones que se presentan dentro del circuito, al ser de valores muy bajos, no presentan una amenaza ante una corriente de falla. Al no poseer fuente de alimentación externa, estos equipos no poseen las protecciones mencionadas en la clase I y II.

2.4.3. Ta (temperatura de funcionamiento)

La temperatura de funcionamiento no es más que la temperatura ambiente a la cual se encuentran expuestas las luminarias. Esta temperatura define su eficiencia, pues es sabido que altas temperaturas provocaran sobrecalentamiento, transformando esto en pérdida de eficacia para las luminarias.

Luego de conocer el funcionamiento de varias tecnologías actuales para luminarias, muchas de ellas tendrán un régimen de operación normal en temperaturas que rondan entre 25-35 °C, pero no es así para temperaturas por debajo de estos valores, pues excluyendo de esta lista la tecnología led, las demás necesitan elevar la temperatura dentro de las ampollas para conseguir el flujo luminoso deseado, caso que en condiciones con zonas de temperatura fría se vería retrasado su funcionamiento o comprometido su flujo luminoso. Los led por otra parte, no dependen del calor para su funcionamiento y en general no son conocidos por irradiar demasiado calor, su flujo luminoso no se ve perceptiblemente afectado como las otras tecnologías.

2.5. Fotometría de las luminarias

La fotometría es la ciencia encargada del estudio de las magnitudes lumínicas y su interpretación gráfica, dentro del espectro electromagnético, al cual el ser humano es sensible, comprendida en el rango de 380 nm hasta los 770 nm de la longitud de onda. Otros autores la definen de la siguiente manera: “Es una ciencia basada en el modelo estadístico de la respuesta visual del ojo humano a la luz, es decir nuestra percepción de la luz”¹³. De lo anterior, cabe resaltar el modelo estadístico al cual hacen mención, pues es claro que este estudio nos presenta una cantidad de valores esenciales para comprender la distribución del haz de luz, para una correcta selección de las luminarias.

Los cálculos fotométricos representan la distribución de la intensidad de flujo que entrega una luminaria o un sistema de iluminación, estos pueden ser representados de forma matricial, como curvas polares o mediante planos cartesianos.

En el diseño de un sistema de iluminación, la interpretación de estos métodos gráficos nos permite conseguir una distribución de intensidad uniforme a lo largo del diseño lumínico, así como también en caso contrario, es posible observar las zonas donde la intensidad lumínica es pobre.

2.5.1. Curvas fotométricas

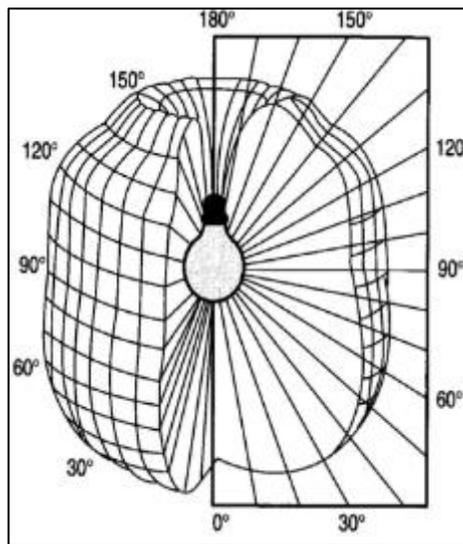
La curva fotométrica es la técnica utilizada para la interpretación de la distribución de la intensidad de luz de una luminaria o sistema de iluminación.

¹³ ESPINOSA TINOCO, Mildred Penélope. *Propuesta de un laboratorio para pruebas fotométricas a luminarias led*. p. 19.

Son representadas en tablas matriciales y en forma gráfica mediante curvas polares o planos cartesianos.

La representación del flujo luminoso mediante curvas polares se presenta como un sólido fotométrico, como se observa en la figura 24, el cual representa la intensidad luminosa volumétrica que irradia una luminaria.

Figura 24. **Sólido fotométrico de una luminaria**



Fuente: CELLAI, Gianfranco. *Fondamenti di illuminotecnica*.

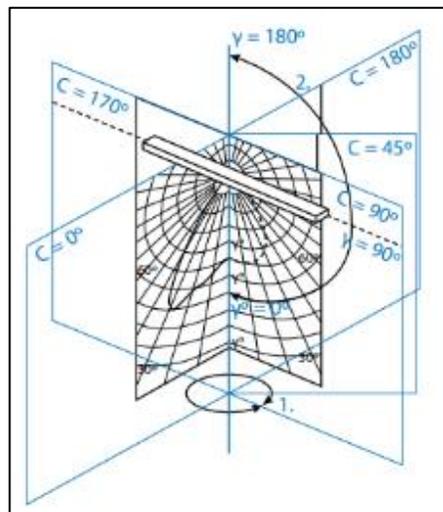
http://web.taed.unifi.it/fisica_tecnica/Sciurpi/illuminotecnica.pdf. Consulta: 28 de mayo de 2020.

El sólido fotométrico se puede representar mediante las coordenadas C y Y, la coordenada C representa el flujo luminoso de la luminaria en el espacio en una figura plana, la cual al girar sobre un eje de rotación o eje de giro, forma el cuerpo de revolución volumétrico. La coordenada Y representa la dirección de la dispersión del haz de luz ubicado sobre el plano de coordenadas C. La coordenada C al girar sobre su eje de revolución se representa desde $C=0^\circ$

hasta $C=360^\circ$. Mientras que la coordenada Y abarca desde $Y=0^\circ$ hasta $Y=180^\circ$ como se puede observar en la figura 25.

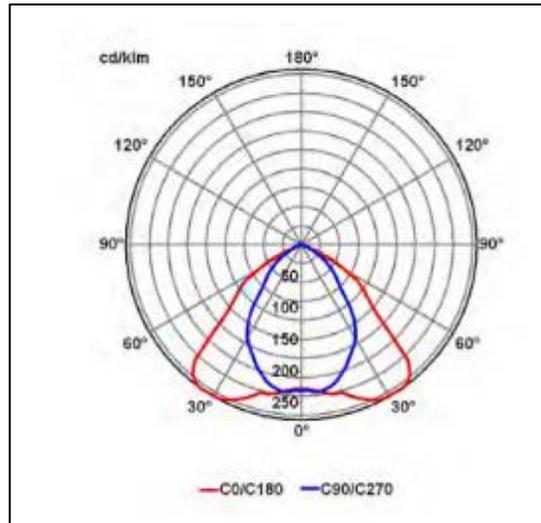
En la figura 26 se muestra un ejemplo de la representación polar de una luminaria para las coordenadas ($C=0^\circ$, $C=180^\circ$) y ($C=90^\circ$, $C=270^\circ$). Las magnitudes de estos valores se representan por una candela entre cada 1 000 lúmenes de flujo luminoso, siendo estas definidas como $\left(\frac{cd}{klm}\right)$.

Figura 25. **Interpretación vectorial del sólido fotométrico**



Fuente: DECO, Fernando. *La utilidad de las curvas fotométricas*. https://www.editores-srl.com.ar/sites/default/files/lu139_deco_curvas_fotometricas.pdf. Consulta: 28 de mayo 2020.

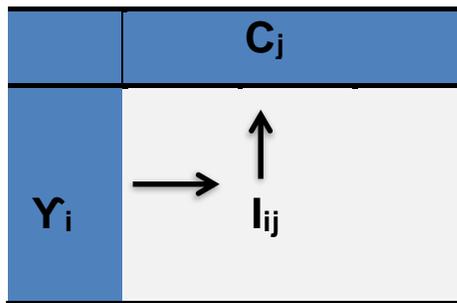
Figura 26. **Distribución luminosa de una luminaria**



Fuente: RAMOS, Sergi. *Cálculo luminotécnico alumbrado público de una calle en zona urbana*. <http://deeea.urv.cat/public/PROPOSTES/pub/pdf/2394pub.pdf>. Consulta: 28 de mayo 2020.

El flujo luminoso puede ser representado también de forma matricial, en la cual para cada coordenada C_j junto con Y_i , corresponde una intensidad de flujo I_{ij} la cual puede ser tabulada como se observa en la figura 27.

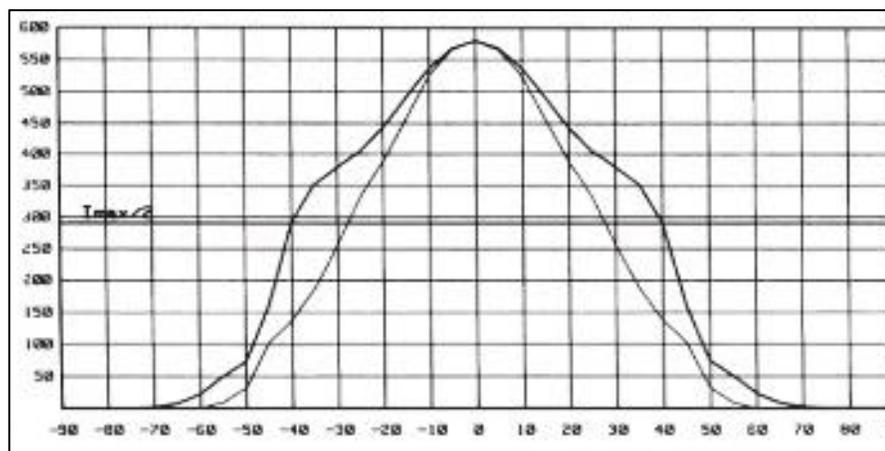
Figura 27. **Representación matricial del flujo luminoso**



Fuente: elaboración propia, utilizando Microsoft Word 2016.

Otra interpretación del flujo luminoso puede ser plasmada mediante diagrama cartesiano, comúnmente proporcionados por los fabricantes de proyectores para observar de una manera más sencilla su intensidad lumínica. La representación se puede observar en la figura 28.

Figura 28. **Diagrama cartesiano**

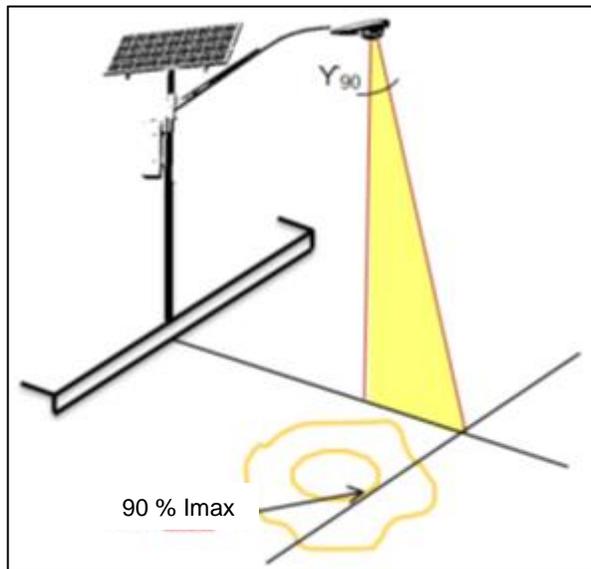


Fuente: SANZ, José Luis; TOLEDANO, José Carlos. *Técnicas y procesos en las instalaciones eléctricas en media y baja tensión*. <https://www.paraninfo.es/catalogo/9788497326636/tecnicas-y-procesos-en-las-instalaciones-electricas-en-media-y-baja-tension>. Consulta: 30 de mayo de 2020.

2.5.2. **Dispersión del haz**

La dispersión del haz se puede determinar mediante la coordenada Y representada anteriormente en las curvas fotométricas, la dispersión no es más que la distancia que alcanza el flujo luminoso de una luminaria para el 90 % I_{max} definida por su distribución luminosa en su curva fotométrica, formado por el ángulo Y_{90} que se forma entre este punto y el eje central de la luminaria en dirección transversal al punto de instalación.

Figura 29. **Dispersión de una luminaria**



Fuente: elaboración propia, utilizando Microsoft Word 2016.

El ángulo que define la amplitud de la dispersión del haz se clasifica de la siguiente manera: haz estrecho, haz medio y haz ancho.

Para su mejor comprensión, se hace una breve referencia de los mismos.

2.5.2.1. Haz estrecho

Para la dispersión del haz se considera de distancia estrecha, cuando el ángulo Y_{90} es menor a 45° .

- Dispersión Estrecha: $Y_{90} < 45^\circ$

2.5.2.2. Haz medio

Para la dispersión del haz se considera de distancia media, cuando el ángulo Y_{90} tenga un máximo de 55° y un valor mínimo de 45° .

- Dispersión Media: $45^\circ \leq Y_{90} \leq 55^\circ$

2.5.2.3. Haz ancho

Para la dispersión del haz se considera de distancia ancha, cuando el ángulo Y_{90} es mayor a 55° .

- Dispersión Ancha: $Y_{90} > 55^\circ$

2.5.3. Especificaciones técnicas de luminarias

Son los datos técnicos proporcionados por los distribuidores de los equipos de iluminación, los cuales mencionan las características mecánicas y eléctricas que posee una luminaria.

En la figura 30 se muestra una ficha técnica que proporcionan los distribuidores para conocer las características que definen su aplicación.

Figura 30. Ficha técnica proyector led Philips BVP091 200 W

Datos del producto		Datos técnicos de la luz	
Funcionamiento de emergencia		Datos técnicos de la luz	
Fuente de luz sustituible	No	Material de la carcasa	Aluminio
Driver/unidad de potencia/transformador	Fuente de alimentación	Dispositivo de montaje	Soporte de montaje ajustable
Driver incluido	Si	Color	negro
Apertura de haz de luz de la luminaria	110°	Dimensiones (altura x anchura x profundidad)	144H x 144H x 144H mm (144H x 144H x 144H in)
Conexion	Cables y guías flotantes	Aprobación y aplicación	
Cable	Cable de 0.5 m sin enchufe	Código de protección de entrada	IP65 [Protección frente a la penetración de polvo, protección frente a chorros de agua a presión]
Clase de protección IEC	Seguridad clase I	Índice de protección frente a choque mecánico	IK07 [2 J reforzado]
Flujo luminoso constante	No	Protección contra sobretensiones (común/diferencial)	EN61547 (L-L, L-2 kV, L-G 4 kV) kV
Mecánicos y de carcasa		Información general	
Tensión de entrada	120 a 277 V	Flujo luminoso inicial	20000 lm
Frecuencia de entrada	50 a 60 Hz	Tolerancia de flujo lumínico	+/-10%
Consumo medio de energía CLD	200 W		
Factor de potencia (mín.)	0.9		
Controles y regulación			
Regulable	No		

Fuente: Philips. *Proyector led Essential*. https://www.assets.signify.com/is/content/PhilipsLighting/fp919053055556-pss-es_mx. Consulta: 31 de mayo de 2020.

En la ficha técnica de la figura anterior, se observa que posee las siguientes características:

- Apertura de haz de 110° se determina como una dispersión de haz ancho.
- Protección eléctrica IEC de tipo I que se refiere a la implementación permanente de un conductor a tierra.
- Protección IP65, se deduce que es una luminaria de exterior con un grado 6 frente a penetración de polvo y de grado 5 para protección contra chorros de agua capaz de soportar su utilización en intemperie.

- Protección IK07 contra impactos externos capaz de soportar una fuerza externa hasta de 2 Julios.
- Flujo lumínico de 20 000 lúmenes el cual nos proporciona la base para calcular los niveles de iluminancia necesarios que necesita una zona de trabajo.

Las características proporcionan la base inicial en el diseño de un sistema lumínico, al proporcionar los datos necesarios para destinar el correcto uso que se le debe dar al equipo, con el fin de obtener los cálculos correctos para un sistema de iluminación adecuado, que proporcione los valores correctos en luminosidad, seguridad y *confort*.

3. MÉTODOS DE CÁLCULO PARA EL DISEÑO DEL SISTEMA LUMÍNICO

En este capítulo se detallan los métodos generales para el cálculo de un sistema de iluminación tanto para interior como exterior. En el cálculo para iluminación de interiores se detallan los métodos comúnmente utilizados mediante el método de lumen y cavidad zonal, en el caso de la iluminación de exteriores se calcularán las bases técnicas empleando el método de punto por punto o el método de lúmenes promedio, el cual será útil para su aplicación a proyectores.

Con el avance de la tecnología a favor del cálculo en los métodos de iluminación, se ampliará de manera general información relacionada a *software* de iluminación gratuitos, con el fin de familiarizar al lector con estos programas para su uso en proyectos lumínicos.

3.1. Método del lumen o cálculo del flujo luminoso

El método del lumen se formula en la relación existente entre la cantidad de lúmenes promedio distribuidos en un área de superficie matemáticamente descrita comúnmente como *lux*.

Su principal aplicación es determinar el flujo luminoso medio, para un local determinado, y comparar el valor obtenido con la iluminancia media mínima que nos brindan las tablas de luminosidad para el tipo de actividad que se realice dentro del mismo, este valor debe ser igual o superior al indicado en las tablas. En la figura 31 se observa la iluminación requerida para ciertas áreas por tipo

de actividad, en la columna de iluminancia media (E_m) se encuentran los valores mínimos requeridos para poder desempeñar de forma adecuada la tarea a realizar.

Figura 31. **Requisitos de iluminación para (áreas) interiores, tareas y actividades**

6.2 Edificios educativos					
Nº ref.	Tipo de interior, tarea y actividad	\bar{E}_m lux	UGR _l	R _a	Observaciones
6.2.1	Aulas, aulas de tutoría	300	19	80	La iluminación debería ser controlable
6.2.2	Aulas para clases nocturnas y educación de adultos	500	19	80	La iluminación debería ser controlable
6.2.3	Sala de lectura	500	19	80	La iluminación debería ser controlable
6.2.4	Pizarra	500	19	80	Evitar reflexiones especulares
6.2.5	Mesa de demostraciones	500	19	80	En salas de lectura 750 lux
6.2.6	Aulas de arte	500	19	80	
6.2.7	Aulas de arte en escuelas de arte	750	19	90	T _{CP} ≥ 5 000 K
6.2.8	Aulas de dibujo técnico	750	16	80	
6.2.9	Aulas de prácticas y laboratorios	500	19	80	
6.2.10	Aulas de manualidades	500	19	80	
6.2.11	Talleres de enseñanza	500	19	80	

Fuente: Norma Europea UNE-EN 12464-1:2003. *Iluminación de los lugares de trabajo. Tabla 5.6 Establecimientos educativos*. https://enerfigente.files.wordpress.com/2015/08/une-en_12464-12003.pdf. Consulta: 1 de junio de 2020.

El valor de la iluminancia media (E_m) viene dado por la siguiente fórmula:

$$E_m = \frac{N_e * l * C_u * \phi * C_m}{S} \quad (\text{Ec. 8})$$

Donde:

N_e = número de luminarias

l = lámparas por unidad

C_u = factor de utilización

Φ = lúmenes por lámpara

C_m = coeficiente de mantenimiento

S = área del local en m^2

Para resolver la fórmula anterior es preciso encontrar los valores desconocidos, para ello se definen las dimensiones del local y la actividad que se desarrollara dentro del mismo. Con las medidas se obtiene el área superficial (s) que se desea iluminar.

Se calcula el flujo luminoso total necesario en lúmenes mediante la siguiente fórmula:

$$\Phi_T = \frac{E_m * S}{C_u * C_m} \quad (\text{Ec. 9})$$

El valor requerido de iluminancia media (E_m), para el cálculo del flujo luminoso total, corresponde al valor mínimo recomendado en las tablas para iluminación en lugares de trabajo.

La variable (C_m) corresponde al factor de mantenimiento de la lámpara, este valor varía según el tipo de suciedad que pueda presentar la luminaria así como también la frecuencia de mantenimiento que se le dé a la misma. Para efectos prácticos, considerando una limpieza constante anual, se suele emplear un valor de 0,8 para un ambiente limpio y un valor de 0,6 para un ambiente sucio. Para una consideración precisa en los cálculos es adecuado consultar los valores con la gráfica factor de degradación de luminarias en el anexo 3.

El coeficiente de utilización (C_u) corresponde a la relación existente entre el flujo luminoso emitido por la cantidad real que es percibida dentro del plano de trabajo. Para su cálculo, según el tipo de luminaria, el fabricante debe

proporcionar una tabla del coeficiente de utilización en función del índice de local (k) y el factor de reflexión de su entorno.

El índice de local (k) se determina mediante la distribución geométrica del local, considerando el tipo de iluminación y la altura de instalación de las luminarias.

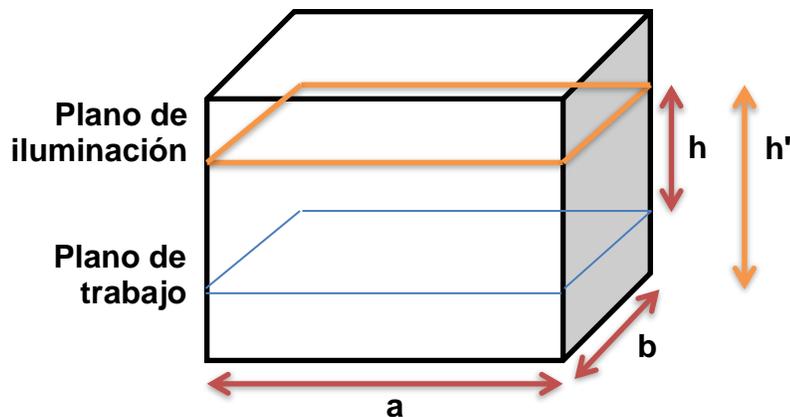
Para un sistema de iluminación de tipo Directa, semi-directa, directa-indirecta y general difusa se utiliza la siguiente ecuación para su determinación:

$$k = \frac{a*b}{h*(a+b)} \quad (\text{Ec. 10})$$

Para un sistema de iluminación de tipo indirecta y semi-indirecta se utiliza la siguiente ecuación:

$$k = \frac{3*a*b}{2*(h+h')*(a+b)} \quad (\text{Ec. 11})$$

Figura 32. **Distribución local y altura de luminaria**



Fuente: elaboración propia, utilizando Microsoft Word 2016.

El factor de reflexión que proporcionan las distintas superficies como el suelo, paredes y techo se encuentran en tablas que proporcionan los valores que se necesitan para el cálculo del índice del local en función del color de las superficies. Los distintos valores pueden ser observados en la tabla IV.

Tabla IV. **Factores de reflexión**

Zona	Color	Factor de Reflexión
Techo	Blanco o muy claro	0,7
	Claro	0,5
	Medio	0,3
Paredes	Claro	0,5
	Medio	0,3
	Oscuro	0,1
Suelo	Claro	0,3
	Oscuro	0,1

Fuente: CASTRO, Andrés. *Método para la determinación del factor de reflexión in situ de superficies*. http://opac.pucv.cl/pucv_txt/txt-6000/UCC6141_01.pdf. Consulta: 2 de junio de 2020.

Con lo descrito anteriormente, conociendo los valores del índice de local y el factor de reflexión del área a iluminar, es posible encontrar el coeficiente de utilización.

Para esto los fabricantes proporcionan tablas con valores de C_u que varían según la relación existente entre la reflectancia de las superficies del local y su índice k . Un ejemplo de estas características se observa en la tabla V.

Tabla V. **Factor de utilización (Cu)**

Tipo de aparato de alumbrado	Índice del local k	Factor de utilización (η)								
		Factor de reflexión del techo								
		0.7			0.5			0.3		
		Factor de reflexión de las paredes								
		0.5	0.3	0.1	0.5	0.3	0.1	0.5	0.3	0.1
	1	.28	.22	.16	.25	.22	.16	.26	.22	.16
	1.2	.31	.27	.20	.30	.27	.20	.30	.27	.20
	1.5	.39	.33	.26	.36	.33	.26	.36	.33	.26
	2	.45	.40	.35	.44	.40	.35	.44	.40	.35
	2.5	.52	.46	.41	.49	.46	.41	.49	.46	.41
	3	.54	.50	.45	.53	.50	.45	.53	.50	.45
	4	.61	.56	.52	.60	.56	.52	.60	.56	.52
	5	.63	.60	.56	.63	.60	.56	.62	.60	.56
	6	.68	.63	.60	.66	.63	.60	.65	.63	.60
	8	.71	.67	.64	.69	.67	.64	.68	.67	.64
	10	.72	.70	.67	.71	.70	.67	.71	.70	.67

Fuente: CASTRO, Andrés. *Método para la determinación del factor de reflexión in situ de superficies*. http://opac.pucv.cl/pucv_txt/txt-6000/UCC6141_01.pdf. Consulta: 3 de junio de 2020.

Para determinar el coeficiente de utilización (C_u) basta con ubicar en el eje de las columnas el factor de reflexión tanto de techo como de las paredes del complejo, trazando una intersección que coincide con el valor obtenido del índice de local k en el eje de las filas.

Este método se cumple si la iluminancia media, determinada por la Ecuación 8 del presente texto, es mayor o igual a la iluminancia media determinada por tablas, según el tipo de tarea que se realice en la instalación.

En caso de que la relación anterior fuese menor lo más sencillo es considerar aumentar el número de luminarias N_e hasta lograr que el nivel de iluminancia calculado sea superior o igual al mínimo requerido para el área de trabajo.

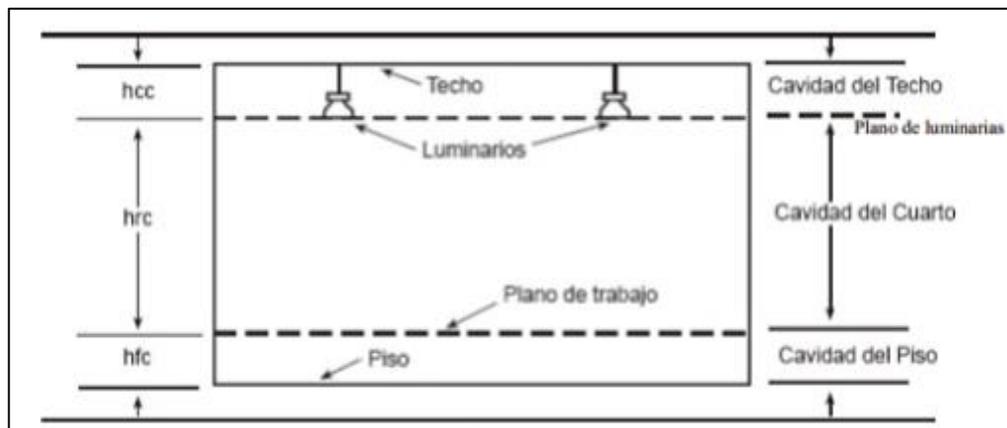
3.2. Método de cavidad zonal

Este método se utiliza para realizar los cálculos lumínicos de un local, considerando la iluminación que existe entre el plano lumínico y el plano de trabajo.

El objetivo es determinar la relación de cavidad para las 3 zonas del proyecto a iluminar, con el fin de obtener un coeficiente de utilización (C_u) que refleje un dato preciso, mediante el empleo de tablas que consideran el factor de reflectancia que existe dentro del mismo, obtenidos de la cavidad de techo, cuarto y piso respectivamente.

En la figura 33 se observa un local en el cual se encuentran representadas las cavidades zonales delimitadas por una línea punteada.

Figura 33. Cavidad de techo, zonal y piso



Fuente: CASTRO, Andrés. *Método para la determinación del factor de reflexión in situ de superficies*. http://opac.pucv.cl/pucv_txt/txt-6000/UCC6141_01.pdf. Consulta: 4 de junio de 2020.

Para efectos de la práctica de este método debemos considerar variables previamente conocidas, las cuales se detallan a continuación:

- Dimensiones del local (ancho, largo y altura).
- Características del diseño tales como color de paredes, techo, piso.
- Tipo de alumbrado.
- Nivel de iluminación según la tarea que vaya a desempeñarse.
- Determinar la altura hcc, hrc y hfc de las cavidades zonales tal como se muestra en la figura 33.

Una vez acordado los colores que se pretenden utilizar en el local, con ayuda de la tabla IV previamente estudiada, se obtienen los valores de reflectancia estimadas para cada zona.

Por ejemplo, consideremos un local el cual sus paredes serán de color gris claro, con techo color blanco y piso gris oscuro. Para este diseño, según la tabla IV, tendríamos un factor de reflectancia pw (paredes) de 0,5 o 50 %, un factor de reflectancia pc (techo) de 0,7 o 70 %, un factor de reflectancia pf (piso) de 0,1 o 10 %.

Luego de conocer las variables anteriores se determina la relación de cavidad de cuarto (RCR), techo (RCC), piso (RCF) según las ecuaciones 13, 14 y 15 respectivamente detalladas más adelante.

En la tabla VI se muestran los datos de reflectancia efectiva para techo y piso, en relación a la reflectancia estimada con las relaciones de cavidad del local.

La reflectancia efectiva se obtiene de la intersección que se forma de la reflectancia estimada de piso y techo en el área de las columnas, junto a la relación de cavidad situada en las filas. En la figura 34 se observa cómo se obtiene este valor.

Tabla VI. **Reflectancias efectivas de cavidad de techo y piso en porcentaje**

$\rho_c \cdot \rho_r$	90				80				70				50				30				10							
	ρ_R	90	70	50	30	80	70	50	30	70	50	30	10	70	50	30	10	50	30	10	05	30	10	05	10	05	04	
RCCo																												
ACF																												
0.0	90	90	90	90	80	80	80	80	70	70	70	70	50	50	50	30	30	30	30	10	10	10	09	09	09	09	09	
0.2	89	88	86	85	78	78	77	76	68	67	66	49	48	47	30	29	29	28	10	10	09	09	09	09	09	09	09	
0.4	88	86	84	81	77	76	74	72	67	65	63	48	47	45	30	29	28	26	11	10	09	09	09	09	09	09	09	
0.6	87	84	80	77	76	75	71	68	65	63	59	47	45	43	30	28	26	25	11	10	08	08	08	08	08	08	08	
0.8	87	82	77	73	75	73	69	65	64	60	56	47	44	40	30	28	25	23	11	10	08	08	08	08	08	08	08	
1.0	86	80	75	69	74	72	67	62	62	58	53	46	43	38	30	27	24	22	12	10	08	08	08	08	08	08	08	
1.2	85	78	72	66	73	70	64	58	61	57	50	45	41	36	30	27	23	21	12	10	07	07	07	07	07	07	07	
1.4	85	77	69	62	72	68	62	55	60	55	47	45	40	35	30	26	22	19	12	10	07	07	07	07	07	07	07	
1.6	84	75	67	59	71	67	60	53	59	53	45	44	39	33	29	25	22	18	12	09	07	07	07	07	07	07	07	
1.8	83	73	64	56	70	66	58	50	58	51	42	43	38	31	29	25	21	17	13	09	06	06	06	06	06	06	06	
2.0	83	72	62	53	69	64	56	48	56	49	40	43	37	30	29	24	20	16	13	09	06	06	06	06	06	06	06	
2.2	82	70	59	50	68	63	54	45	55	48	38	42	36	29	29	24	19	15	13	09	06	06	06	06	06	06	06	
2.4	82	69	58	48	67	61	52	43	54	46	37	42	35	27	29	24	19	14	13	09	06	06	06	06	06	06	06	
2.6	81	67	56	46	66	60	50	41	54	45	35	41	34	26	29	23	18	14	13	09	06	06	06	06	06	06	06	
2.8	81	66	54	44	65	59	48	39	53	43	33	41	33	25	29	23	17	13	13	09	05	05	05	05	05	05	05	
3.0	80	64	52	42	65	58	47	37	52	42	32	40	32	24	29	22	17	12	13	09	05	05	05	05	05	05	05	
3.2	79	63	50	40	65	57	45	35	51	40	31	39	31	23	29	22	16	12	13	09	05	05	05	05	05	05	05	
3.4	79	62	48	38	64	56	44	34	50	39	29	39	30	22	29	22	16	11	13	09	05	05	05	05	05	05	05	
3.6	78	61	47	36	63	54	43	32	49	38	28	39	29	21	29	21	15	10	13	09	04	04	04	04	04	04	04	
3.8	78	60	45	35	62	53	41	31	49	37	27	38	29	21	28	21	15	10	14	09	04	04	04	04	04	04	04	
4.0	77	58	44	33	61	53	40	30	48	36	26	38	28	20	28	21	14	09	14	09	04	04	04	04	04	04	04	
4.2	77	57	43	32	60	52	39	29	47	35	25	37	28	20	28	20	14	09	14	09	04	04	04	04	04	04	04	
4.4	76	56	42	31	60	51	38	28	46	34	24	37	27	29	28	20	14	09	14	09	04	04	04	04	04	04	04	
4.6	76	55	40	30	59	50	37	27	45	33	24	36	26	18	28	20	14	08	14	08	04	04	04	04	04	04	04	
4.8	75	54	39	28	58	49	36	26	45	32	23	36	26	18	28	20	13	08	14	08	04	04	04	04	04	04	04	
5.0	75	53	38	28	58	48	35	25	44	31	22	35	25	17	28	19	13	08	14	08	04	04	04	04	04	04	04	

Fuente: RODRIGUEZ, Julio. *El Proyecto de Iluminación. Instalaciones Eléctricas: proyectos residenciales e industriales*. <https://librostrillas.blogspot.com/2017/05/instalaciones-electricas-proyectos.html?m=1>. Consulta: 6 de junio de 2020.

Figura 34. **Reflectancia efectiva**

$\rho_c \text{ o } \rho_r$	90				80				70			
ρ_n	90	70	50	30	80	70	50	30	70	50	30	70
RCCo												
RCF												
0.0	90	90	90	90	80	80	80	80	70	70	70	50
0.2	89	88	86	85	78	78	77	76	68	67	66	49
0.4	88	86	84	81	77	76	74	72	67	65	63	48
0.6	87	84	80	77	76	75	71	68	65	63	59	47
0.8	87	82	77	73	75	73	69	65	64	60	56	47
1.0	86	80	75	69	74	72	67	62	62	58	53	46

Fuente: elaboración propia, utilizando Microsoft Word 2016.

Luego de obtener las reflectancias efectivas de techo y piso se debe calcular el coeficiente de utilización.

Este se calcula utilizando la tabla VII, en la cual se establece, mediante la intersección de los resultados obtenidos para la reflectancia estimada de techo y paredes en porcentaje, junto a la relación de cavidad que posea el local. Para obtener este valor se realiza el mismo procedimiento que se muestra en la figura 34.

Tabla VII. Coeficiente de utilización para método de cavidad zonal

COEFICIENTES DE UTILIZACIÓN													
LUMINARIA	DISTRIBUCION	Separación no superior a	Reflectancias										
			Cavidad del techo	80 %			50 %			10 %		0 %	
				50%	30%	10%	50%	30%	10%	50%	30%	10%	0 %
RCL COEFICIENTES DE UTILIZACIÓN													
Categoría III  Reflector de globo ventilado	0 ↓ 79	1,3 x Altura de montaje	1	8,50	8,20	7,90	7,50	7,20	7,50	7,30	7,20	7,10	6,90
			2	7,40	6,90	6,50	7,00	6,60	6,20	6,50	6,20	5,90	5,80
			3	6,50	6,00	5,40	6,20	5,70	5,30	5,70	5,40	5,10	4,90
			4	5,60	5,10	4,60	5,50	4,90	4,50	5,10	4,70	4,40	4,20
			5	5,00	4,40	3,90	4,70	4,20	3,70	4,50	4,00	3,60	3,50
			6	4,40	3,80	3,30	4,20	3,60	3,20	4,00	3,50	3,20	3,00
			7	4,00	3,30	2,80	3,60	3,20	2,80	3,60	3,20	2,70	2,60
			8	3,60	2,90	2,40	3,40	2,80	2,40	3,20	2,70	2,30	2,20
			9	3,30	2,50	2,00	3,10	2,50	2,00	2,90	2,40	2,00	1,80
			10	2,90	2,20	1,80	2,80	2,20	1,80	2,60	2,10	1,80	1,70
Categoría I  Lámpara reflectora de filamento R-52 Haz ancho, 500 y 750 W	0 ↓ 100	1,5 x Altura de montaje	1	10,80	10,50	10,20	10,10	9,90	9,70	9,40	9,30	9,10	8,90
			2	9,80	9,30	8,90	9,30	8,90	8,60	8,80	8,50	8,20	8,00
			3	8,90	8,30	7,90	8,50	8,00	7,60	8,00	7,60	7,30	7,10
			4	8,10	7,40	6,80	7,70	7,20	6,70	7,30	6,90	6,50	6,40
			5	7,30	6,60	6,00	7,00	6,40	5,90	6,60	6,20	5,80	5,60
			6	6,70	5,90	5,30	6,40	5,80	5,20	6,10	5,60	5,20	5,00
			7	6,00	5,20	4,70	5,80	5,20	4,60	5,50	5,00	4,60	4,50
			8	5,40	4,60	4,00	5,20	4,50	4,00	4,90	4,40	4,00	3,80
			9	4,80	4,00	3,50	4,60	3,90	3,50	4,40	3,80	3,40	3,30
			10	4,30	3,60	3,00	4,20	3,50	3,00	4,00	3,40	3,00	2,80
Categoría I  Lámpara reflectora de filamento R-57, Haz estrecho — 500 y 750 W	0 ↓ 100	1,8 Altura de montaje	1	11,00	10,80	10,50	10,40	10,20	10,00	9,70	9,60	9,50	9,30
			2	10,20	9,80	9,40	9,70	9,40	9,10	9,10	8,90	8,80	8,60
			3	9,50	9,00	8,50	9,10	8,70	8,30	8,60	8,30	8,10	7,90
			4	8,80	8,20	7,80	8,50	8,00	7,60	8,10	7,70	7,50	7,30
			5	8,20	7,60	7,10	7,90	7,40	7,00	7,60	7,20	6,90	6,70
			6	7,70	7,00	6,60	7,40	6,90	6,50	7,20	6,80	6,40	6,20
			7	7,10	6,50	6,10	6,90	6,40	6,00	6,70	6,30	6,00	5,80
			8	6,60	6,00	5,60	6,50	5,90	5,50	6,30	5,90	5,50	5,40
			9	6,20	5,50	5,10	6,00	5,50	5,10	5,90	5,40	5,00	4,90
			10	5,80	5,10	4,70	5,60	5,10	4,70	5,50	5,00	4,60	4,50

Fuente: Clases iluminación. Método cavidad zonal.

<https://clasesiluminacion.files.wordpress.com/2015/06/clases-iluminacion-metodo-cavidad-zonal.pdf>. Consulta: 7 de junio de 2020.

Luego de obtener el coeficiente de utilización C_u se procede a calcular el factor de mantenimiento C_m , según el tipo de categoría que posea la luminaria elegida. Como se mencionó anteriormente, se suele emplear un valor de 0,8 para un ambiente limpio y un valor de 0,6 para un ambiente sucio. Para una consideración precisa en los cálculos, es adecuado consultar los valores con la gráfica factor de degradación de luminarias del anexo 3.

Posterior a esto debe calcularse el número de luminarias que empleará el local en cuestión. Para esto se usa la ecuación que se muestra a continuación.

$$N = \frac{E * A}{n * l * C_u * C_m} \quad (\text{Ec. 12})$$

Donde:

N = cantidad de luminarias a utilizar

E = cantidad de Lux mínimos requeridos

A = área del local en metros

n = unidades por lámpara

l = lúmenes que proporciona la lámpara

C_u = coeficiente de utilización

C_m = coeficiente de mantenimiento

Por último, ya con todos los valores calculados, se obtiene el dato de la iluminancia media E_m mediante el uso de la ecuación 8 descrita anteriormente.

3.2.1. Cavidad zonal

Se le denomina cavidad zonal a la distancia existente entre el plano de las luminarias y el plano de trabajo; en resultado la parte central en cuestión.

$$RCR = \frac{5 * hrc * (a + b)}{a * b} \quad (\text{Ec. 13})$$

Donde:

RCR = relación de cavidad de cuarto

hrc = altura de la cavidad zonal en metros

a = anchura del área en cuestión, medida en metros

b = largo del área en cuestión, medida en metros

3.2.2. Cavidad de techo

Se le denomina cavidad de techo a la distancia existente entre la altura total del local donde se desarrolla el sistema de iluminación y el plano de las luminarias.

$$RCC = \frac{5 \cdot hcc \cdot (a+b)}{a \cdot b} \quad (\text{Ec. 14})$$

Donde:

RCC = relación de cavidad de techo

hcc = altura de la cavidad de techo en metros

a = anchura del área en cuestión, medida en metros

b = largo del área en cuestión, medida en metros

3.2.3. Cavidad de piso

Se le denomina cavidad de piso a la distancia existente desde la línea a nivel suelo hasta llegar a la altura del plano de trabajo.

$$RCF = \frac{5 \cdot hfc \cdot (a+b)}{a \cdot b} \quad (\text{Ec. 15})$$

Donde:

RCF = relación de cavidad de piso

hfc = altura de la cavidad de piso en metros

a = anchura del área en cuestión, medida en metros

b = largo del área en cuestión, medida en metros

3.3. Método de punto por punto

Es un método matemático que nos permite calcular la iluminancia que percibe un plano en un punto localizado, obteniendo sus componentes lumínicas horizontales y verticales.

Para el análisis efectivo de este método, en un diseño de iluminación, es preciso conocer las siguientes características:

- Altura de instalación de las luminarias
- Distribución de las luminarias
- Curvas fotométricas de las luminarias a utilizar

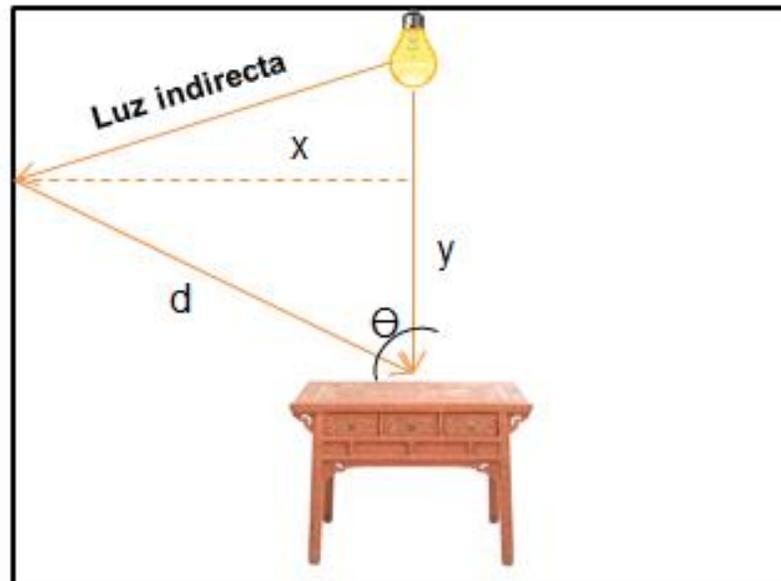
El cálculo de la componente lumínica vertical se realiza mediante el uso de la ecuación 16, la cual geoméricamente considera el ángulo que se forma entre la línea perpendicular del haz de luz y el punto de interés donde se desea calcular la iluminancia.

$$E_{Vertical} = \frac{I * Sen \theta}{d^2} \quad (Ec. 16)$$

El cálculo de la componente lumínica horizontal se realiza mediante el uso de la ecuación 17. la cual geoméricamente considera el ángulo que se forma entre la línea paralela del haz de luz y el punto de interés donde se desea calcular la iluminancia.

$$E_{Horizontal} = \frac{I * Cos \theta}{d^2} \quad (Ec. 17)$$

Figura 35. **Iluminación directa e Indirecta sobre un punto localizado**



Fuente: elaboración propia, utilizando Microsoft Word 2016.

En la figura 35 se muestra cómo se descompone la iluminancia en su componente vertical y horizontal, provocado por la incidencia de luz indirecta sobre el plano de trabajo.

3.4. Método de lúmenes promedio para el cálculo de proyectores

Se le denomina proyector a una luminaria de gran intensidad capaz de iluminar un área o punto específico con un nivel lumínico superior al de sus sitios aledaños.

Para el cálculo del número de proyectores, se utiliza la definición del método de los lúmenes, la cual indica la cantidad de iluminación media requerida en la instalación, propiciado un indicativo de cuantos proyectores se

necesitan para alcanzar dicho nivel, según las características que posea la luminaria a elección. En la ecuación 18 se encuentra la expresión para realizar dicho cálculo.

$$N_{\text{proyectores}} = \frac{E_m * A}{\Phi_{\text{proyector}} * CBU * C_m} \quad (\text{Ec. 18})$$

Donde:

E_m = Iluminancia media

A = área de la instalación

Φ = flujo lumínico emitido por el proyector

CBU = coeficiente de utilización del haz

C_m = coeficiente de mantenimiento.

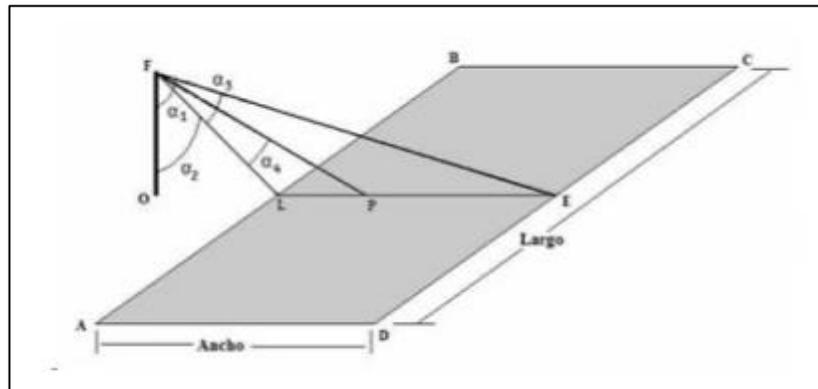
Este procedimiento, a diferencia de los métodos anteriores, se enfoca en el cálculo de iluminación para un diseño lumínico de exterior o intemperie. Los pasos necesarios para la obtención de la cantidad de proyectores que necesita la instalación se encuentran determinada de la siguiente forma:

- Calcular el factor de utilización del haz
- Calcular el factor de mantenimiento
- Determinar el número de proyectores

Para calcular el factor de utilización del haz ó CBU , es preciso observar la figura 36 en la cual se propone, a base de ejemplo, el uso de un proyector en el

punto F, instalado en un poste de distancia OF, el cual posee una incidencia lumínica en el plano ABCD.

Figura 36. **Distancias de referencia de un proyector para el cálculo del CBU**



Fuente: JIMÉNEZ, Erick. *Actualización del sistema eléctrico e iluminación en las torres del estadio olímpico universitario*. <http://www.ptolomeo.unam.mx:8080/xmlui/bitstream/handle/132.248.52.100/286/A7.pdf?sequence=7>. Consulta: 1 de agosto de 2020.

Como se observa en el capítulo 2, de curvas fotométricas, en la figura 36 se encuentra representada sobre el plano ABCD la dispersión del haz de luz de un proyector. Los ángulos α representan los puntos distribuidos sobre el plano que con el uso de las tablas proporcionadas por el fabricante de la luminaria, permitirá hallar la constante de CBU.

Para el cálculo de los ángulos $\alpha_1, \alpha_2, \alpha_3, \alpha_4$ se utilizan las ecuaciones que se muestran a continuación:

$$\alpha_1 = \text{Tan}^{-1}\left(\frac{OE}{FO}\right) \quad (\text{Ec. 19})$$

$$\alpha_2 = \text{Tan}^{-1}\left(\frac{OL}{FO}\right) \quad (\text{Ec. 20})$$

$$\alpha_3 = \alpha_1 + \alpha_2 \quad (\text{Ec. 21})$$

$$\alpha_4 = \frac{\alpha_3}{2} \quad (\text{Ec. 22})$$

Donde:

OE = distancia del poste al punto más lejano de la dispersión del haz

FO = altura del proyector

OL = distancia del poste al punto más cercano de la dispersión del haz

Siendo el ángulo α_4 el punto medio P, como se observa en la figura 36, utilizando los datos de fábrica para la distribución lumínica de la luminaria, se tabulan los valores positivos y negativos fuera del punto central, para determinar la acumulación de lúmenes que se distribuyen a lo largo del área en cuestión.

El coeficiente de utilización del haz, se determina mediante la relación de los lúmenes acumulados y los lúmenes determinados en las curvas fotométricas de las tablas de los proyectores proporcionadas por los fabricantes.

En la práctica, usualmente no se realizan estos cálculos, pues se suele estandarizar los valores de CBU según el tipo de actividad que se pretenda realizar. Este valor suele estar comprendido en el rango entre 0,6 y 0,9.

El segundo paso para la realización de este método es determinar el factor de mantenimiento del proyector, el cual se encuentra definido por la ecuación 23 que se detalla a continuación:

$$F_m = FDF * FDS \quad (\text{Ec. 23})$$

Donde:

F_m = factor de mantenimiento

FDF = relación de pérdidas del flujo de la luminaria

FDS = depreciación de la luminaria

La expresión (FDF), correspondiente a las pérdidas del flujo lumínico, se expresan en la relación entre los lúmenes iniciales proporcionados por la luminaria, entre la cantidad de lúmenes medios que recibe el plano de trabajo.

La depreciación de la luminaria (FDS) se encuentra relacionada a las características constructivas de la misma, para determinar este valor se debe hacer uso de sus características físicas como se muestra a continuación en la tabla VIII.

Tabla VIII. **Factor de depreciación según tipo de luminaria**

Tipo de luminaria	Muy limpio	Limpio	Medio	Sucio	Muy sucio
Abierta no ventilada	0.90	0.8	0.71	0.64	0.56
Abierta ventilada	0.95	0.89	0.83	0.78	0.72
Cerrada	0.97	0.93	0.88	0.83	0.78
Vidrio refractor o Cerrada y filtrada	0.98	0.95	0.93	0.89	0.86

Fuente: JIMÉNEZ, Erick. *Actualización del sistema eléctrico e iluminación en las torres del estadio olímpico universitario*. <http://www.ptolomeo.unam.mx:8080/xmlui/bitstream/handle/132.248.52.100/286/A7.pdf?sequence=7>. Consulta: 13 de agosto de 2020

Obteniendo los datos anteriormente expuestos, es posible realizar el cálculo del número de proyectores para un sistema lumínico de tipo exterior. Para esto, por medio de sustitución de variables, se determina utilizando la fórmula 18.

3.5. **Software de iluminación**

El avance de la tecnología ha generado una amplia variedad de aplicaciones para facilitar las tareas que desempeña el ser humano de una manera precisa y rápida.

En el tema de los cálculos lumínicos se han desarrollado distintos software que emplean los métodos antes vistos, mediante líneas de código, a través de una interfaz gráfica que permite diseñar el proyecto de iluminación tomando en consideración parámetros eléctricos, tipos de luminaria y las dimensiones del área de interés.

Existe una gran variedad de software de iluminación, con licencia o gratuitos, este apartado se centra específicamente en dos programas totalmente gratuitos que han ido evolucionando hasta ser una de las mejores plataformas para introducirse en el cálculo lumínico, siendo estos CALCULUX y DIALux.

3.5.1. DIALux

DIALux es un software de iluminación gratuito que permite desarrollar proyectos de diseño de iluminación, para espacios en interior o exterior. Al poseer un formato de uso en 3D, permite visualizar el proyecto mediante la selección de los componentes eléctricos que se necesiten, los cuales se encuentran disponibles en librerías instaladas dentro del programa, para hacer uso de la gran cantidad de marcas que en la actualidad se encuentran para su uso dentro de su interfaz. En la figura 37 se observa el área de trabajo de este programa.

Entre las principales funciones que permite desarrollar se encuentran:

- Visualización del diseño de iluminación
- Cálculos de luminosidad y parámetros eléctricos
- Amplia librería de fabricantes de luminarias
- Visualización de las curvas fotométricas
- Análisis de eficiencia energética

- Medición del consumo energético del sistema de iluminación

Figura 37. **Panel de trabajo de DIALux**



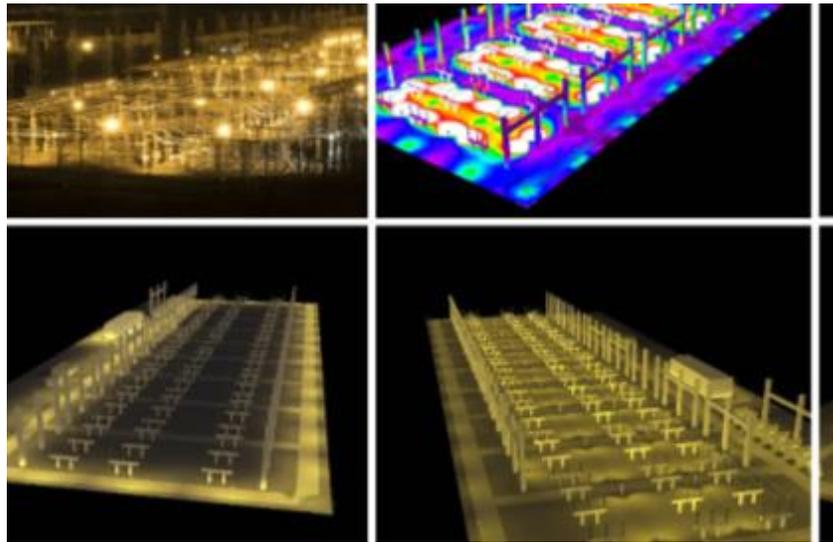
Fuente: DIALUX. *DIALux es el estándar mundial en software de diseño de iluminación.*
<https://www.dialux.com/es-ES/>. Consulta: 21 de agosto de 2020.

En la figura 38 se observa un diseño de iluminación para una subestación de alta tensión, exterior, mediante la implementación del *software* DIALux. Con la correcta implementación, es posible optimizar la cantidad de luminarias según el requerimiento lumínico que se tenga en la instalación.

Con el diseño de iluminación finalizado, el *software* es capaz de generar reportes lumínicos para su posterior análisis, así como curvas isolux las cuales permiten observar la distribución de lúmenes en el área de trabajo, cumpliendo con el requerimiento promedio mínimo de lúmenes, establecido en los parámetros iniciales, previamente consultados en las normas para iluminación

de instalaciones eléctricas de la Normativa Oficial Mexicana NOM-001-SEDE-2012.

Figura 38. **Diseño de iluminación DIALux para una subestación eléctrica exterior**



Fuente: INALTEN. *Elecnor finaliza la instalación de los equipos de iluminación exterior SE Cambutas 220kV.* <https://www.inalten.com/2016/09/30/elecnor-finaliza-la-instalacion-de-los-equipos-de-iluminacion-se-cambutas-220kv>. Consulta: 22 de agosto de 2020.

3.5.2. **CalcuLux**

Software de licencia gratuita para la medición de cálculos lumínicos mediante modelado 3D. Es posible encontrarlo en dos variantes tanto para diseños de iluminación de tipo interior denominado como CalcuLuX Area y diseños de iluminación de tipo exterior, CalcuLux Road.

Este software, distribuido por la empresa Philips, incluye en sus librerías la selección de sus productos en luminarias, cada una con su manual de características a disposición para el desarrollo de su diseño.

4. ANÁLISIS DE LA EFICIENCIA ENERGÉTICA EN ILUMINACIÓN CON LED

Entre los últimos avances tecnológicos en lo que a iluminación concierne, existe una diversidad de estudios sobre las ventajas que trajo la implementación de luminarias con tecnología led a un sistema lumínico, pero en lo que a iluminación de subestaciones eléctricas de tipo exterior se refiere, la transición a este tipo de tecnología aún no se encuentra tan marcada. Esto es porque las luminarias que usualmente se encuentran instaladas en este tipo de proyectos, en su mayoría, son de tipo de vapor de sodio de alta presión; luminarias las cuales han resultado efectivas, duraderas, relativamente económicas y con un consumo energético realmente aceptable.

En este capítulo analizaremos a detalle las luminarias led y su comparación con su competidor directo, las luminarias de Sodio de alta presión. Para esto se analizará su consumo energético, relación costo-beneficio basándose en el promedio de vida útil de las mismas vs el precio inicial de cada tecnología, para la implementación de un diseño lumínico.

4.1. Selección de luminaria led

La correcta selección del tipo de luminaria que se implementara en un proyecto, puede llegar a evitarnos distintos problemas, desde los más comunes como lo es una simple adaptación a nivel mecánico en caso no se acople su instalación, hasta el cambio total de las luminarias por no considerar condiciones ambientales adversas en el área de implementación.

Para efecto de esta selección, los criterios para la selección de luminarias se tomarán de los anteriormente vistos en el capítulo 2.

A continuación, se muestra una tabla con los datos técnicos básicos a considerar, para realizar una correcta selección de la luminaria:

Tabla IX. **Datos técnicos para selección de luminarias**

SELECCIÓN DE LUMINARIA LED			
Proyecto:		Fecha:	
Revisión:		Firma:	
1. Tipos de iluminación		4. Datos Mecánicos	
Directo	<input type="checkbox"/>	Dimensiones	
Indirecto	<input type="checkbox"/>	alto	
Semi Directa	<input type="checkbox"/>	ancho	
Mixta	<input type="checkbox"/>	profundidad	
Semi indirecta	<input type="checkbox"/>	Tipo de montaje	
2. Condiciones de Servicio		5. Grados de protección	
Interior	<input type="checkbox"/>	Objetos y suciedad	
Exterior	<input type="checkbox"/>	Agua y humedad	
3. Parámetros Eléctricos		Golpes o impactos	
Tensión de entrada		Eléctrica	
Frecuencia de entrada		6. Datos generales	
Consumo medio de energía		Temperatura funcionamiento	
Factor de potencia		Apertura de haz	
		Flujo lumínico	

Fuente: elaboración propia, utilizando Microsoft Excel 2016.

4.2. **Eficiencia energética luminarias led vs., luminarias de vapor de sodio de alta presión**

La eficiencia energética de un sistema de iluminación cobra importancia cuando en términos económicos existe la posibilidad de obtener un ahorro monetario, ofreciendo la misma calidad de iluminación o incluso con la posibilidad de mejorarla.

En la figura 39 se observa un análisis previo respecto al ahorro energético por sustitución de lámparas con diferente tecnología. En el caso de una subestación eléctrica, como se ha mencionado anteriormente, se utiliza generalmente el vapor de sodio de alta presión y se detalla que al ser reemplazadas por tecnología led existe un ahorro energético de aproximadamente un 50 %.

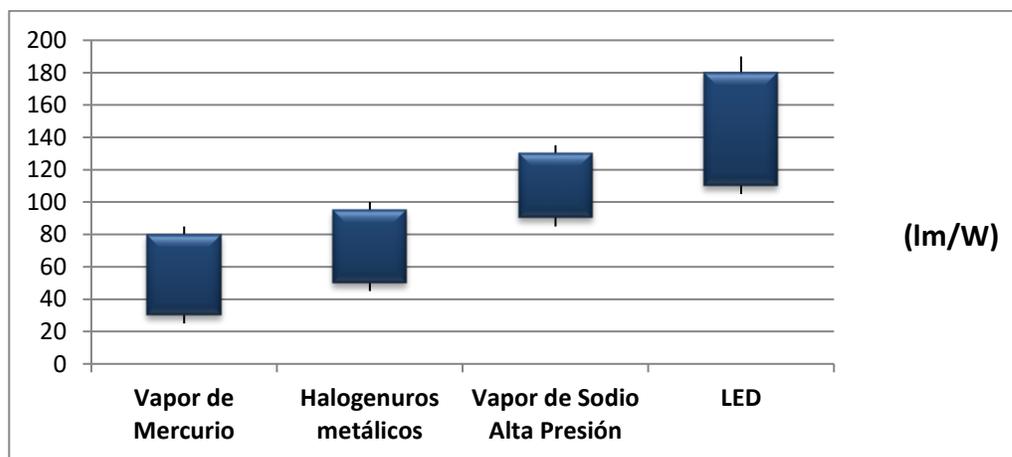
Figura 39. **Ahorro energético por sustitución de lámparas**

AHORRO ENERGETICO POR SUSTITUCION DE LAMPARAS		
ALUMBRADO EXTERIOR		
SUSTITUCION DE	POR	% AHORRO
Vapor de Mercurio	Vapor de Sodio Alta Presión	45%
Vapor de Mercurio	Vapor de Cerámica	40%
Vapor de Sodio Alta Presión	Vapor de Sodio Baja Presión	25%
Vapor de Sodio Alta Presión	LED ³	50%
Halógena Convencional	Halogenuros Metálicos	70%
Incandescente	Fluorescentes Compactas	80%
ALUMBRADO INTERIOR		
Lámparas HID	Fluorescente Tubular T5 ⁴	40%
Incandescente	Fluorescentes Compactas	80%
Halógena Convencional	Fluorescentes Compactas	70%
Halógena Convencional	LED	75%
Fluorescente Tubular T12	Fluorescente Tubular T8	60%
Fluorescente Tubular T8	LED Tubular ⁵	40%
Fluorescente Compacta	LED	45%

Fuente: Agencia Valenciana de la Energía. *Guía de ahorro y eficiencia energética en establecimientos hoteleros de la comunidad Valenciana*. https://www.miteco.gob.es/es/cambio-climatico/planes-y-estrategias/GuiaEficienciaHoteles_CV_tcm30-70383.pdf. Consulta: 10 de septiembre de 2020.

La principal ventaja de la tecnología led respecto a su principal competidor, las lámparas de vapor de sodio de alta presión, es la gran cantidad de lumen/w que entregan, es importante destacar su capacidad de proveer un flujo lumínico elevado a una fracción de consumo energético de su competidor.

Figura 40. **Eficiencia luminosa**



Fuente: elaboración propia, utilizando Microsoft Excel 2016.

En la figura 40 se observa el rango de lúmenes generados por cada watt consumido según el tipo de tecnología. Se aprecia una notable eficiencia del led respecto a su competidor cercano, el vapor de sodio de alta presión, esto abonado a que en cuestión de vida útil la tecnología led posee del mismo modo un amplio margen de mejora.

A efecto de comparación, para una luminaria de vapor de sodio de alta presión que genere 48 000 lúmenes tendrá un consumo de 400 W lo que representa una eficiencia de 120 lm/W. Para una luminaria led de la misma cantidad de lúmenes sería posible con un consumo de 300 W y una eficiencia de 160 lm/W pudiendo obtener aún mejores consumos.

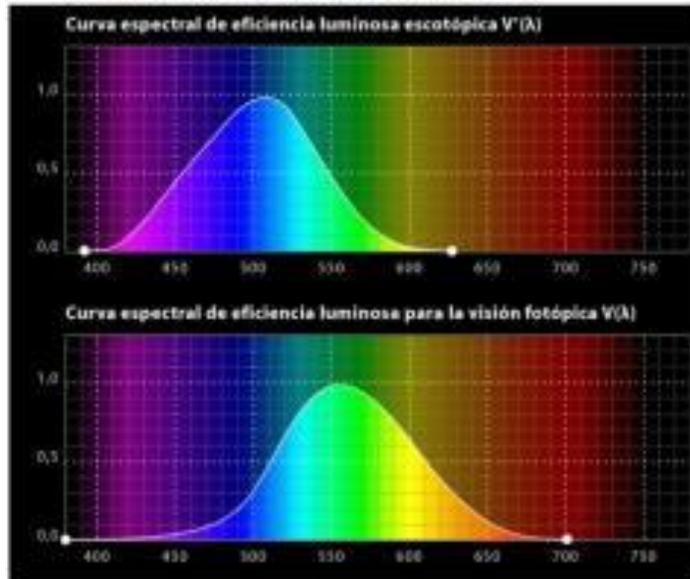
4.2.1. Promedio de consumo de energía

La diferencia en el consumo de energía, del cual la tecnología led supone una ventaja respecto a las lámparas de vapor de sodio de alta presión, guarda una estrecha relación con la percepción que tiene el ojo humano de los colores de día o durante la noche. Johannes Evangelista Purkinje (1823) demostró, mediante una curva, “la variación de la sensibilidad del ojo humano a través del espectro electromagnético visible a lo largo del día, la cual le llamó visión fotópica y la variación de la sensibilidad del ojo durante la noche llamada visión escotópica”¹⁴.

Este efecto, al cual le denominó efecto Purkinje, el cual se detalla en la figura 41, demostró que la vista que poseen las personas durante la noche permite percibir de mejor manera los colores fríos y, la visión durante la luz natural del día, permite una mayor sensibilidad a los colores cálidos.

¹⁴ PUELL, María. *Sensibilidad luminosa espectral del sistema visual*. p. 26.

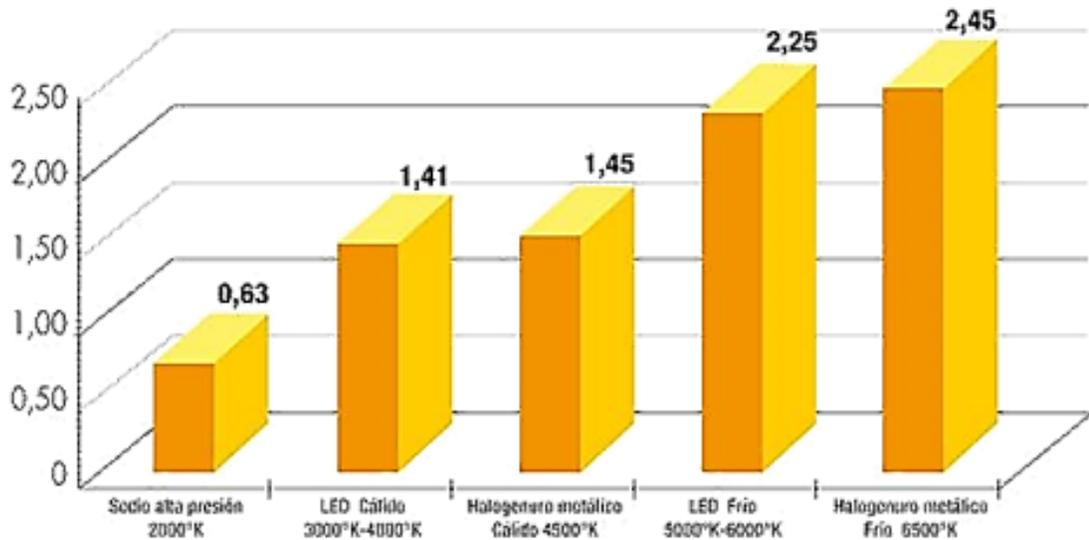
Figura 41. Efecto Purkinje



Fuente: CURSO LUMINOTECNIA. *Como reemplazar luminarias de vapor de sodio por luminarias led.* <http://iluminica.com/como-reemplazar-luminarias-de-vapor-de-sodio-por-luminarias-led/#:~:text=La%20eficiencia%20de%20las%20luminarias,y%20en%20consumo%20de%20energ%C3%ADa>. Consulta: 18 de septiembre de 2020.

En 2010 la CIE, quien es la comisión internacional de iluminación, publicó la norma CIE TC 1-58: Visual Performance in the Mesopic Range misma que presenta el factor de corrección para una cantidad equivalente de los lúmenes que son percibidos por la sensibilidad del ojo humano durante condiciones nocturnas exteriores, según la temperatura del color de las luminarias. Este factor de corrección se muestra a continuación en la figura 42.

Figura 42. **Relación en el desempeño visual en el rango mesópico durante condiciones nocturnas exteriores**



Fuente: CURSO LUMINOTECNIA. *Como reemplazar luminarias de vapor de sodio por luminarias led.* <http://iluminica.com/como-reemplazar-luminarias-de-vapor-de-sodio-por-luminarias-led/#:~:text=La%20eficiencia%20de%20las%20luminarias,y%20en%20consumo%20de%20energ%C3%ADa>. Consulta: 18 de septiembre de 2020.

Para efectos de análisis, consideraremos una luminaria de Vapor de Sodio de Alta Presión de 400 W con un rendimiento lumínico de 137,5 lm/W capaz de entregar 55 000 lúmenes, frente a una luminaria led de 150 W con un rendimiento de 103,33 lm/W y 15 500 lúmenes, evaluando sus consumos de energía anual con un promedio de 13 horas diarias de uso.

Aplicando el factor de corrección para condiciones nocturnas, en la norma CIE TC 1-58, vemos que las lámparas de sodio poseen un factor de corrección de 0,63 para 2 000 °K y para led frío 5 000 °K-6 000 °K un factor de 2,25.

$$Lm(eq)noche = Lm (Datos) \times FactCorrec. Mesópico \quad (Ec. 24)$$

Sustituyendo

$$Lm (eq)noche = 55\,000 \times 0,63 = 34\,650 \text{ Lm}$$

La luminaria de vapor de sodio de alta presión posee 34 650 lúmenes equivalentes perceptibles a la sensibilidad de la vista humana.

Sustituyendo los datos de una luminaria led de 150W, en la ecuación 24, se tiene.

$$Lm (eq)noche = 15\,500 \times 2,25 = 34\,875 \text{ Lm}$$

En el caso del led vemos que posee 34 875 lúmenes equivalentes al considerar una luminaria led de 150 W y 15 500 Lm sustituye perfectamente a una de vapor de sodio con un consumo energético inferior.

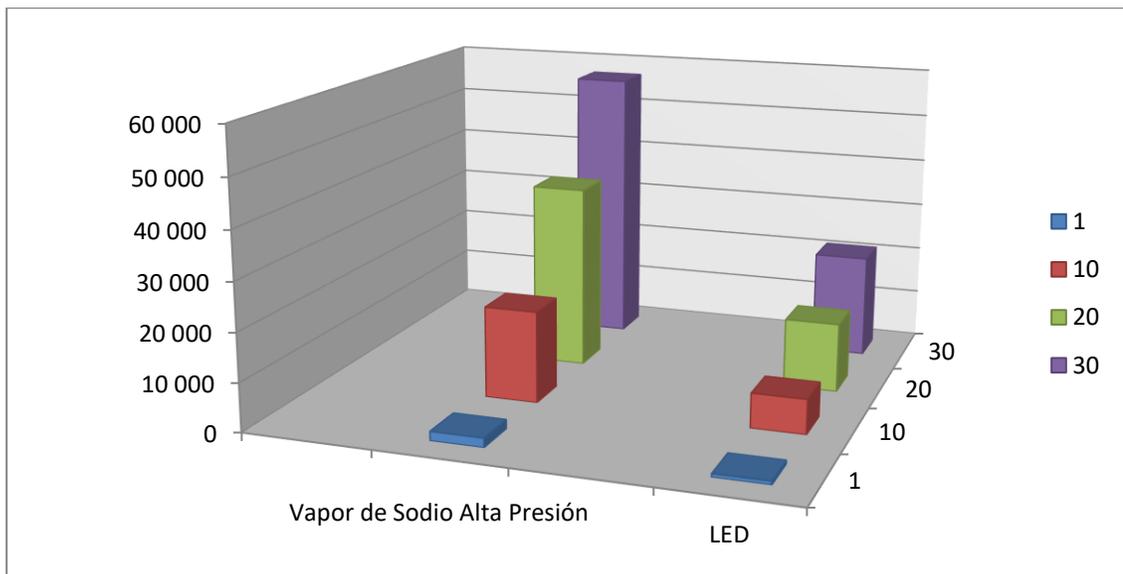
En la tabla X se detallan los consumos KWh/año para una cantidad variada de luminarias a efecto de observar el comportamiento que poseen los valores promedio de consumo energético para los dos tipos de luminarias.

Tabla X. Promedio de consumo de energía VSAP vs., led

Vapor de sodio de alta presión 137,5 lm/W				
Cantidad	Potencia W	Total KW	Tiempo Horas/Año	Consumo KWh/año
1	400	0,4	4 745	1 898
10	400	4	4 745	18 890
20	400	8	4 745	37 960
30	400	12	4 745	56 940
Led				
1	150	0,15	4 745	711,75
10	150	1,5	4 745	7 117,5
20	150	3	4 745	14 235
30	150	4,5	4 745	21 352,5

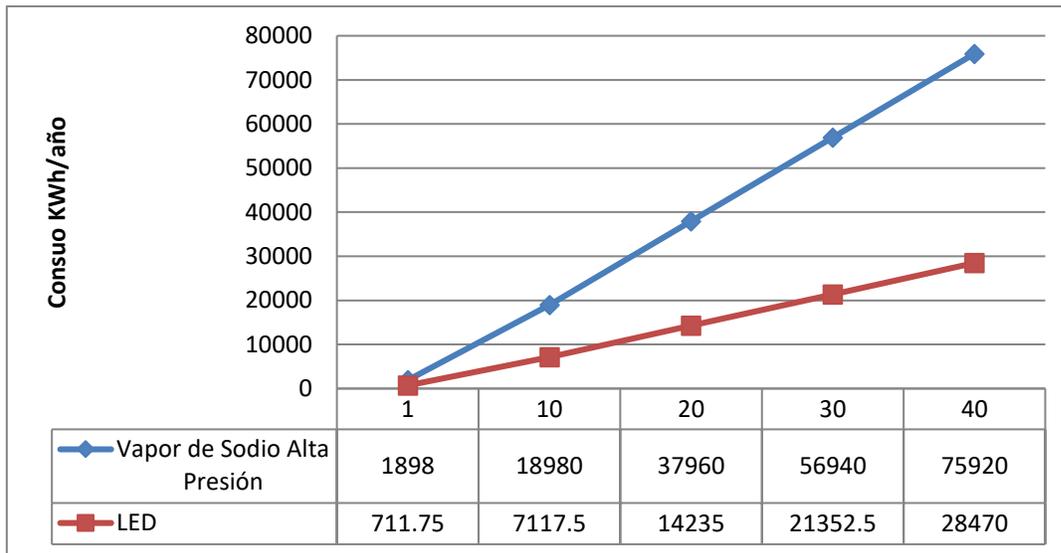
Fuente: elaboración propia, utilizando Microsoft Word 2016.

Figura 43. Consumo KWh/año vs. cantidad de luminarias instaladas VSAP vs., led



Fuente: elaboración propia, utilizando Microsoft Excel 2016.

Figura 44. **Comportamiento lineal del consumo de energía para luminarias VSAP vs., led**



Fuente: elaboración propia, utilizando Microsoft Excel 2016.

En las figuras 41 y 42 se aprecian los diferentes consumos energéticos anuales de ambas tecnologías, para lo cual se observa en esta comparación, un consumo del 37 % de electricidad de la tecnología led frente a la luminaria de vapor de sodio de alta presión, lo que significa un ahorro energético del 63 %.

4.2.2. Costo-beneficio

En este apartado se tomará en cuenta la relación costo/beneficio producto de considerar datos indispensables tales como vida útil, ahorro energético anual, precio promedio de luminarias y cantidad de luminarias que se deseen instalar.

Como datos previos, usaremos 20 luminarias de las utilizadas en la sección anterior para realizar el análisis.

Para esto consideraremos los siguientes datos:

- Led:
 - Vida útil: 40 000 horas
 - Consumo energético: 150 watts
 - Temperatura color: 6 000 °K
 - Flujo luminoso: 15 500 Lm
 - Grado de protección: IP65
 - Precio/unidad: Q 1 023,32 *dato extraído de Celasa, Guatemala
 - Cantidad de luminarias: 20

- Vapor de Sodio Alta Presión
 - Vida útil: 24 000 horas
 - Consumo energético: 400 watts
 - Temperatura color: 2 100 °K

- Flujo luminoso: 55 000 Lm
- Grado de protección: IP65
- Precio/unidad: Q 760 * Dato estándar para luminaria similar Celasa Guatemala
- Cantidad de luminarias: 20

En la tabla XI se detallan los aspectos técnicos a considerar. Para la relación de la inversión inicial, se observa que el precio para el ejemplo anterior supone un incremento del 34 % de las luminarias led respecto al costo total de adquirir un sistema de iluminación de Vapor de sodio de alta presión, lo que significa un aumento de Q 5 266,4.

Tabla XI. **Costo/Beneficio led vs. HPS**

Cantidad	Descripción	Costo unitario	Costo total	Vida útil	Horas/año	Consumo energético anual	Precio del kWh	Factura por consumo de energía anual	Años estimados de vida útil
20	Luminaria LED 150 W 15 500 Lm	Q 1 023,32	Q 20 466,4	40 000 horas	4 745 horas (13 horas diarias)	14 235 kWh	Q 1,31 / kWh	Q 18 647,85	8,43 años
20	Luminaria Vapor de Sodio Alta Presión 400 W 55 000 Lm	Q760	Q 15 200	24 000	4 745 horas (13 horas diarias)	37 960 kWh		Q 49 727,6	5,05 años

Fuente: elaboración propia, utilizando Microsoft Word 2016.

La relación $\frac{\text{Costo Total}}{\text{Vida útil}}$ para luminarias led sustituyendo $\frac{20\ 466,4}{8,43\ \text{años}}$ es de Q 2 427,8 anuales.

La relación $\frac{\text{Costo Total}}{\text{Vida útil}}$ para luminarias vapor de sodio de alta presión sustituyendo $\frac{15\,200}{5,05 \text{ años}}$ es de Q 3 009,9 anuales.

De lo anterior se concluye que aún con el incremento del 34% respecto a su costo de inversión inicial, la relación costo/beneficio anual supone una mejor elección el uso de la tecnología led. Las luminarias con tecnología led, representan un costo por consumo eléctrico de Q 18 647,85 anuales, mientras que, las luminarias con tecnología de vapor de sodio de alta presión, tiene un costo de Q 49 727,6. Se fija un precio por kWh de Q 1,31, el beneficio por consumo de energía implica un 62,5 % de ahorro anual al emplear tecnología led.

4.3. Evaluación luminotécnica

Un análisis luminotécnico nos permite hacer una evaluación para determinar la distribución del flujo luminoso sobre un área de trabajo en general de un sistema de iluminación, y da la oportunidad de optimizar la instalación, para un óptimo rendimiento, con el fin de obtener un adecuado consumo energético. También es útil para detectar posibles fallos previos en el cálculo, al momento de su diseño, lo que permite realizar una medición para una posible ampliación del mismo.

El instrumento que se utiliza para este tipo de análisis se denomina luxómetro, el cual permite obtener las mediciones de iluminancia representadas en lux.

Para realizar esta evaluación se precisa utilizar el método de la cuadrícula, procedimiento que consiste en separar la zona de trabajo en distintas áreas

preferiblemente cuadradas y, posteriormente, definir distintos puntos de medición en cada área.

La forma para determinar el número mínimo de puntos de medición en el área objetivo se fundamenta en la relación existente entre el índice de local, determinado por las medidas físicas del local o zona a iluminar, detallada en la ecuación 25, y el cálculo de los puntos de medición, el cual se encuentra detallado en la ecuación 26.

$$\text{índice de local} = \frac{\text{Largo} \times \text{Ancho}}{\text{Altura de Montaje} \times (\text{Largo} + \text{Ancho})} \quad (\text{Ec. 25})$$

$$\# \text{ mínimo de puntos de medición} = (x + 2)^2 \quad (\text{Ec. 26})$$

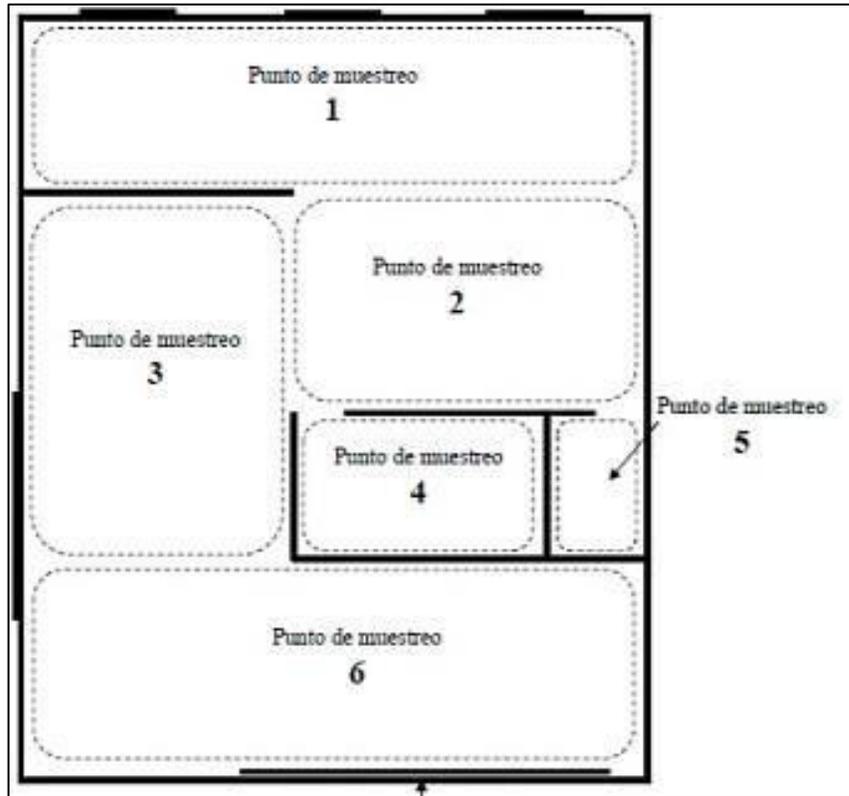
En la ecuación anterior la variable “x” se refiere al valor obtenido de la fórmula del índice de local aproximado a su entero superior. En caso de obtener valores de índice de local tales que sean igual a 3 o mayor, el valor de x en la ecuación 26 se sustituirá por el valor de 4.

Tabla XII. **Puntos de medición mínimos – Método cuadrícula**

Índice de local K	Valor de X redondeado	Número mínimo puntos de medición
Si K es ≤1	1	9
1 < k ≤ 2	2	16
2 < k < 3	3	25
K ≥ 3	4	36

Fuente: elaboración propia, utilizando Microsoft Word 2016.

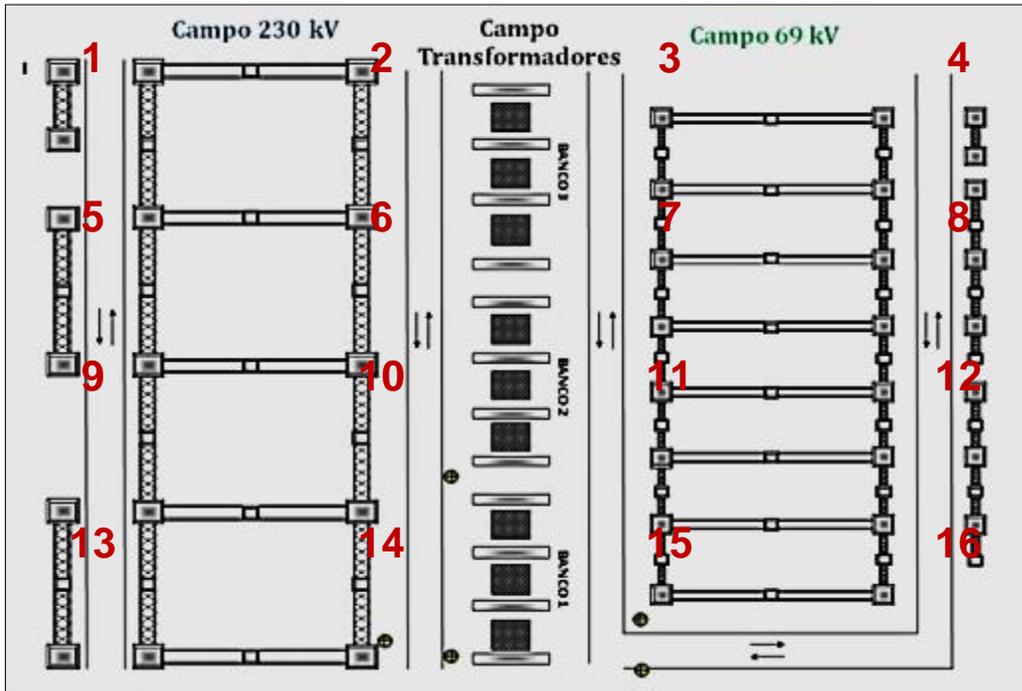
Figura 45. División de zona de trabajo



Fuente: SRT Superintendencia de Riesgos del Trabajo. *La iluminación en el ambiente laboral*. p. 12.

Si una zona de trabajo requiere el mismo nivel de luminosidad, no se realiza el fraccionamiento de áreas mostrado en la figura 45, sino que se toma toda la zona y se procede a calcular los puntos de medición.

Figura 46. Puntos de muestreo para un valor de K = 2



Fuente: elaboración propia, utilizando Edraw.

En la figura 46 se muestra una zona de trabajo dividida en 16 cuadrículas para un valor de índice de local $K = 2$. En cada área se debe realizar una medición del nivel de iluminación mediante un luxómetro.

Posteriormente se procede a calcular el nivel de iluminación promedio E_m el cual se encuentra dado por la fórmula:

$$E_m = \frac{\sum \text{Valores medidos (Lux)}}{\text{Puntos de medición}} \quad (\text{Ec. 27})$$

5. CASO PRÁCTICO: DISEÑO DEL SISTEMA DE ILUMINACIÓN *LED* EN UNA SUBESTACIÓN

En este capítulo se evaluará el sistema de iluminación de una subestación externa de alta tensión con luminarias de vapor de sodio de alta presión mediante una evaluación luminotécnica. Posteriormente se diseñará un sistema lumínico utilizando el *software* DIALux EVO 8.1 tomando como base el nivel de iluminación recomendado para subestaciones eléctricas en la Normativa Oficial Mexicana (NOM) 001 Sede 2012, artículo 924, Subestaciones.

5.1. Descripción de la subestación eléctrica externa, de alta tensión

La subestación eléctrica externa de alta tensión zona 18, en la colonia Las Tapias de la ciudad de Guatemala, posee un sistema lumínico que con la tecnología actual es posible ser rediseñado. El sistema de iluminación actual presenta deficiencia, en algunos casos por falta de mantenimiento, y principalmente por un nivel de iluminación irregular, en el cual es posible observar distintas zonas por las cuales, al transitar, no es posible desempeñar las funciones del operador de la subestación de la manera más efectiva.

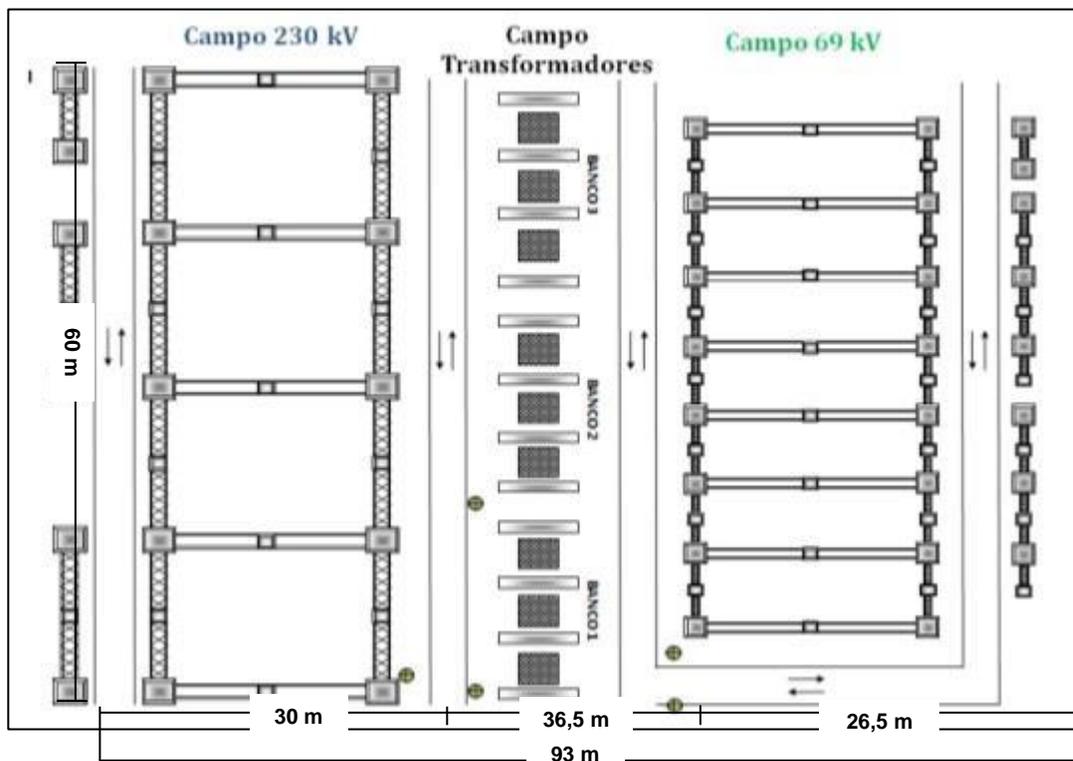
La subestación eléctrica posee una capacidad de 150 MVA de potencia, con niveles de voltaje de 230 kV / 69 kV. En total posee 42 luminarias de vapor de sodio de alta presión distribuidas así: 21 luminarias en el campo de 230 kV, 15 luminarias en la zona de 69 kV y 6 luminarias en los muros cortafuegos que iluminan los transformadores.

Para la iluminación del patio exterior posee un transformador auxiliar de 13,8kV/480V el cual se encuentra conectado a un transformador de 480V/240V que suministra la tensión necesaria para el alumbrado en 240 V.

5.1.1. Planos de diseño de la subestación

Las dimensiones de la subestación y su distribución se muestran en la figura 47.

Figura 47. Plano de Subestación



Fuente: elaboración propia, utilizando Edraw.

5.1.2. Evaluación del sistema de iluminación actual

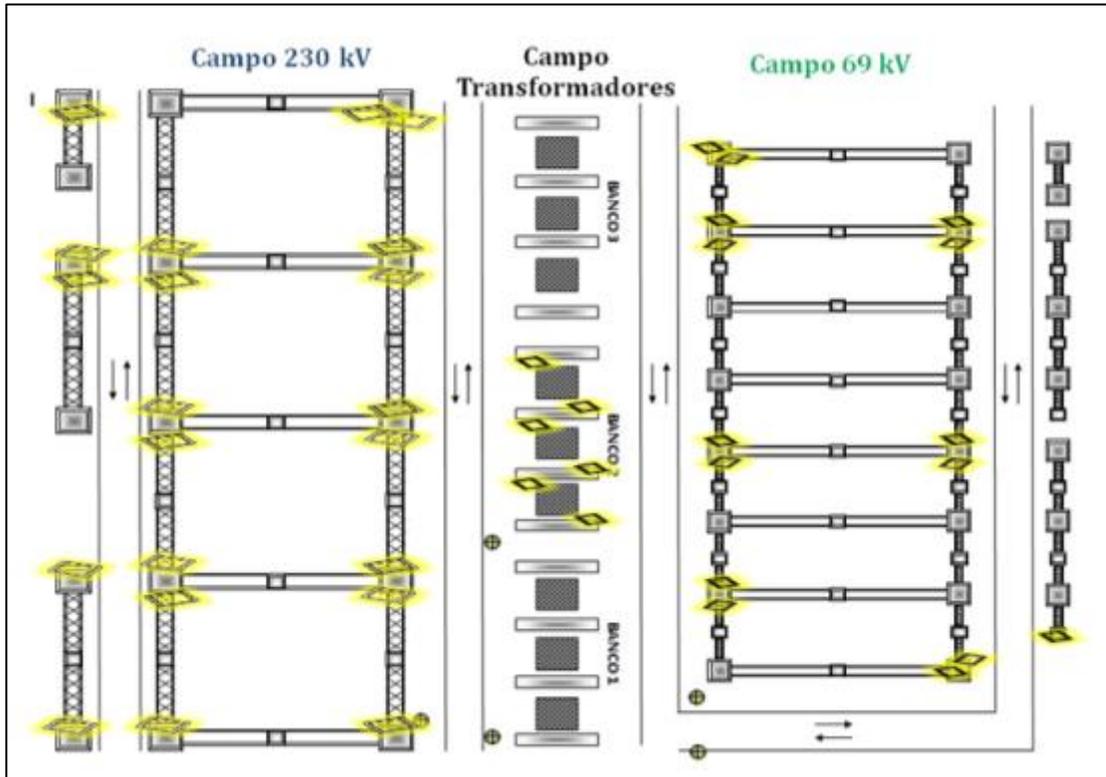
La evaluación del sistema de iluminación consiste en detallar las condiciones de instalación, la distribución de las luminarias, sus características y el consumo energético promedio. Estos datos nos brindan la base que posteriormente se utilizará para hacer una comparación de estos con el fin de verificar la calidad del sistema lumínico.

5.1.2.1. Gráfico de distribución de luminarias

En la figura 48 se detalla la distribución de luminarias que posee la subestación eléctrica.

Se observa que la instalación, principalmente en el área del campo de transformadores junto al campo de 69 kV, no es uniforme, presenta zonas en las cuales el nivel de iluminación podría llegar a ser irregular y no proveer la cantidad de luz suficiente para desempeñar del mejor modo las labores.

Figura 48. **Distribución de luminarias**



Fuente: elaboración propia, utilizando Edraw.

5.1.2.2. **Mediciones de iluminancia**

Para la evaluación luminotécnica se utilizará el método de la cuadrícula para las 3 distintas zonas a evaluar, siendo estas: zona de 230 kV, zona de transformadores y zona 69 kV.

Las mediciones se realizaron con el luxómetro marca STEREN de la línea HER-410. En la figura 49 se detalla el aspecto constructivo del medidor y en la tabla XIII sus características técnicas.

Figura 49. **Luxómetro STEREN HER-410**



Fuente: elaboración propia, utilizando cámara fotográfica.

Tabla XIII. **Especificaciones Luxómetro HER-410**

Rango de medición	Precisión	Temperatura de operación	Temperatura de almacenamiento	Velocidad de medición	Voltaje	Detector óptico
0-50000 Lux	+/- 5 %	0 °C a +40 °C	-10 °C a +60 °C	2 veces por segundo	9 VCD	Sensor a foto diodo de silicio con filtro

Fuente: STEREN. *Medidor de luminosidad HER-410*. www.steren.com. Consulta: 15 de noviembre de 2020.

Como primer paso se analizaron las zonas y se determinó el número mínimo de puntos de medición; no sin antes calcular el índice de local mediante la ecuación 25. Las mediciones se realizaron a 1,6 m de altura.

- La zona 230 kV posee un terreno de 60m de largo y 30 m de ancho; constituyendo una zona de 1 800 m². La altura de montaje de las luminarias, situadas en la aparamenta de la subestación, se encuentra a una altura de 16,75m.

$$\text{índice de local} = \frac{60 \times 30}{16,75 \times (60 + 30)}$$

$$\text{índice de local} = 1,19$$

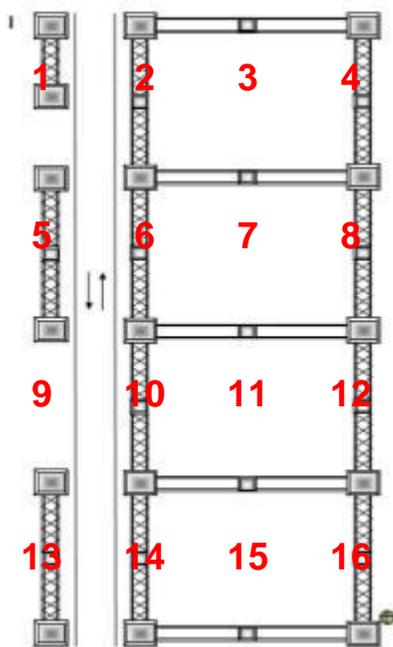
De la tabla XII se obtiene un valor de x=2 para un índice de local k=1,19. El cálculo del número de puntos de medición utiliza la ecuación 26.

Sustituyendo

$$\# \text{ mínimo de puntos de medición} = (2 + 2)^2$$

$$\# \text{ mínimo de puntos de medición} = 16$$

Figura 50. **Puntos de medición de iluminancia zona 230 kV**



Fuente: elaboración propia, utilizando Edraw.

En la figura 50 se muestran los 16 puntos de medición a evaluar. A lo largo se realizará un muestreo cada 15 m y a lo ancho un muestreo cada 7,5 m lo que corresponde a un área de 112,5 m² para cada punto de medición.

En la tabla XIV se encuentran los valores de medición correspondientes a los 16 puntos del método de la cuadrícula para la zona de 230 kV. Ver apéndice 1.

Tabla XIV. **Mediciones de iluminancia zona 230 kV en sitio**

Puntos de medición			
10	5	2	2
1	1	1	2
2	2	1	2
2	3	3	2

Fuente: elaboración propia, utilizando Luxómetro HER-410.

Se calcula el nivel de iluminación medio sumando todas las magnitudes de luminosidad dividida entre el número de puntos de medición.

$$E_m = \frac{\sum 10 + 5 + 2 + 2 + 1 + 1 + 1 + 2 + 2 + 2 + 1 + 2 + 2 + 3 + 3 + 2}{16}$$

$$E_m = 2,56 \text{ lux}$$

- Zona de transformadores posee un terreno de 60m de largo y 36 5 m de ancho; constituyendo una zona de 2 190 m². La altura de montaje de las luminarias, situadas en la apartamenta de la subestación, se encuentra a una altura de 10 m.

$$\text{índice de local} = \frac{60 \times 36,5}{10 \times (60 + 36,5)}$$

$$\text{índice de local} = 2,27$$

De la tabla XII se obtiene un valor de x=3 para un índice de local k=2,27. El cálculo del número de puntos de medición utiliza la ecuación 26.

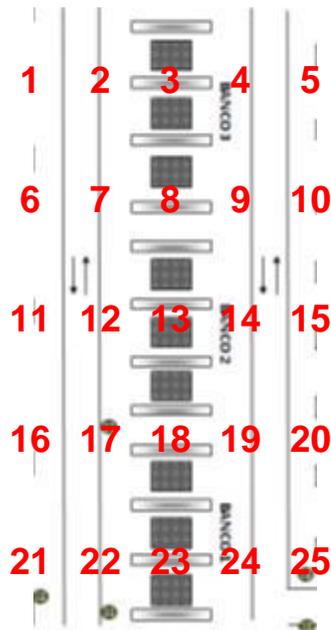
Sustituyendo

$$\# \text{ m\u00ednimo de puntos de medici\u00f3n} = (3 + 2)^2$$

$$\# \text{ m\u00ednimo de puntos de medici\u00f3n} = 25$$

En la figura 51 se muestran los 25 puntos de medici\u00f3n a evaluar, a lo largo se realizar\u00e1 un muestreo cada 12 m y a lo ancho un muestreo cada 7,3 m lo que corresponde a un \u00e1rea de 87,6 m² para cada punto de medici\u00f3n. Ver ap\u00e9ndice 2.

Figura 51. **Puntos de medici\u00f3n de iluminancia zona de transformadores**



Fuente: elaboraci\u00f3n propia, utilizando Edraw.

En la tabla XV se encuentran los valores de medici\u00f3n correspondientes a los 25 puntos del m\u00e9todo de la cuadr\u00edcula para la zona de transformadores.

Tabla XV. **Mediciones de iluminancia zona transformadores en sitio**

Puntos de medición				
2	3	4	4	2
1	1	1	4	2
8	17	100	32	15
13	66	8	50	5
7	13	4	3	3

Fuente: elaboración propia, utilizando Luxómetro HER-410.

Se calcula el nivel de iluminación medio sumando todas las magnitudes de luminosidad dividida entre el número de puntos de medición.

$$E_m = \frac{\sum 2 + 3 + 4 + 4 + 2 + 1 + 1 + 1 + 1 + 4 + 2 + 8 + 17 + 100 + 32 + 15 + 13 + 66 + 8 + 50 + 5 + 7 + 13 + 4 + 3 + 3}{25}$$

$$E_m = 14,72 \text{ lux}$$

- La Zona 69 kV posee un terreno de 60m de largo y 26,5 m de ancho; constituyendo una zona de 1 590 m². La altura de montaje de las luminarias, situadas en la apartamenta de la subestación, se encuentra a una altura de 8,5 m.

$$\text{índice de local} = \frac{60 \times 26,5}{8,5 \times (60 + 26,5)}$$

$$\text{índice de local} = 2,16$$

De la tabla XII se obtiene un valor de x=3 para un índice de local k=2,16. El cálculo del número de puntos de medición utiliza la ecuación 26.

Sustituyendo

$$\# \text{ m\u00ednimo de puntos de medici\u00f3n} = (3 + 2)^2$$

$$\# \text{ m\u00ednimo de puntos de medici\u00f3n} = 25$$

En la tabla XVI se encuentra los valores de medici\u00f3n correspondientes a los 25 puntos del m\u00e9todo de la cuadr\u00edcula para la zona de 69 kV. Ver ap\u00e9ndice 3.

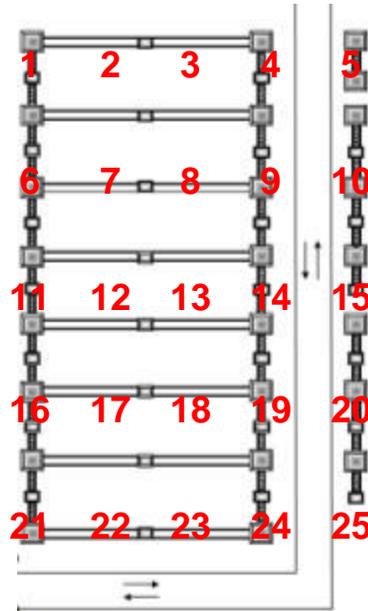
Tabla XVI. **Mediciones de iluminancia zona 69 kV en sitio**

Puntos de medici\u00f3n				
2	2	1	1	1
10	8	5	3	1
8	5	4	5	6
2	2	2	1	1
3	3	2	3	3

Fuente: elaboraci\u00f3n propia, utilizando Lux\u00f3metro HER-410.

En la figura 52 se muestran los 25 puntos de medici\u00f3n a evaluar, a lo largo se realizar\u00e1 un muestreo cada 12 m y a lo ancho un muestreo cada 5,3 m lo que corresponde a un \u00e1rea de 63,6 m² para cada punto de medici\u00f3n.

Figura 52. Puntos de medición de iluminancia zona de 69 kV



Fuente: elaboración propia, utilizando Edraw.

Se calcula el nivel de iluminación medio sumando todas las magnitudes de luminosidad dividida entre el número de puntos de medición.

$$E_m = \frac{\sum 2 + 2 + 1 + 1 + 1 + 1 + 10 + 8 + 5 + 3 + 1 + 8 + 5 + 4 + 5 + 6 + 2 + 2 + 2 + 1 + 1 + 3 + 3 + 2 + 3 + 3}{16}$$

$$E_m = 3,36 \text{ lux}$$

5.1.2.3. Características de las luminarias

Las luminarias actualmente instaladas, corresponden a lámparas con tecnología de vapor de sodio de alta presión de uso exterior, serie Contour de la marca Lithonia Lighting con flujo luminoso de 50 000 lúmenes y una potencia de 400 W.

En la figura 49 se muestra la carcasa con soporte para ser anclado a la aparamenta de la subestación, la bombilla de vapor de sodio de alta presión y su respectivo aislante interno para controlar el calor que emana.

Figura 53. **Luminaria Vapor de Sodio Alta Presión 400 W Lithonia Lighting**



Fuente: Lithonia Lighting. *Visor fotométrico*. <https://www.visual-3d.com/tools/PhotometricViewer/Default.aspx?ID=13675>. Consulta: 7 de enero de 2021.

Tabla XVII. **Datos de luminaria**

Información Técnica	Datos
Marca	Lithonia Lighting
Modelo	Contour
Flujo luminoso	50 000 Lm
Temperatura de Color	2 100 K
Voltaje nominal	240 V
Potencia	400 W
Base	E40
Grado de protección	IP65
Vida útil	36 000 horas

Fuente: Lithonia Lighting. *Visor fotométrico*. <https://www.visual-3d.com/tools/PhotometricViewer/Default.aspx?ID=13675>. Consulta: 8 de enero de 2021.

5.1.2.4. Consumo energético del sistema de iluminación exterior

El consumo energético del sistema de iluminación se determinó, utilizando la potencia de la luminaria y la cantidad de unidades instaladas.

Tabla XVIII. Consumo energético sistema de iluminación exterior

Luminaria	Cantidad	Potencia kW	Total kW	Tiempo Horas/año	Consumo kWh/año
Vapor Sodio Alta Presión Contour Lithonia Lighting	42	0,4	16,8	4 745	79 716

Fuente: elaboración propia, utilizando Microsoft Word 2016.

El tiempo horas/año de la tabla XIV, se calculó con un promedio de uso diario de las luminarias de 13 horas, para una cantidad de 365 días por año.

El consumo energético anual del sistema de iluminación comprendido por 42 luminarias de vapor de sodio de alta presión de 400 W es de 79,72 MW/h.

5.2. Determinación del nivel de iluminación recomendado implementando el artículo 924 “Subestaciones” de la Normativa Oficial Mexicana (NOM) 001-Sede-2012

En la Normativa Oficial Mexicana NOM 001 Sede 2012 en su tabla 924-5, se detallan los niveles mínimos de iluminancia requeridos para subestaciones eléctricas de tipo exterior, según el área objetivo.

Como se observa en la tabla XIX, el nivel mínimo de iluminancia (lx), para zonas de maniobra, es de 160 lux. Así también la iluminancia mínima para áreas de tránsito de personal y vehículos es de 110 lux.

En la sección anterior se determinó que el sistema de iluminación instalado no cumple los niveles mínimos requeridos mencionados en esta normativa. De igual manera no posee uniformidad en su distribución de luminosidad.

El cálculo para el número de luminarias se realiza mediante el uso del método de lúmenes promedio, para el cálculo del número de proyectores.

Tabla XIX. **Niveles mínimos de iluminancia requeridos para subestaciones eléctricas según Normativa 001-Sede-2012**

Tipo de lugar:	Iluminancia (lx)
Frente de tableros de control con instrumentos, diversos e interruptores, etc.	270
Parte posterior de los tableros o áreas dentro de tableros "dúplex"	55
Pupitres de distribución o de trabajo	270
Cuarto de baterías	110
Pasillos y escaleras (medida al nivel del piso)	55
Alumbrado de emergencia, en cualquier área	11
Áreas de maniobra	160
Áreas de tránsito de personal y vehículos	110
General	22

Fuente: Norma Oficial Mexicana NOM-001-SEDE-2012, Instalaciones Eléctricas (utilización).

Tabla 924-5.- Niveles mínimos de iluminancia requeridos. <http://pandora.fime.uanl.mx/~omeza/pro/LEYES/NOM-001-SEDE-2012%20.pdf>. Consulta: 16 de enero de 2021.

Para el cálculo de la iluminación exterior se divide el plano de la subestación en 3 áreas: zona de 230 kV, área de transformadores y zona de 69 kV.

Tabla XX. **Cálculo del alumbrado exterior para la zona de 230 kV**

Ancho (m)	Largo (m)	Área (m ²)	Altura de montaje (h _m)	Nivel de iluminación mínimo (lux)
30	60	1 800	16,75	160

Fuente: elaboración propia, utilizando distanciómetro STEREN HER-430.

Primero se representa el haz de luz en un diagrama isocandela. Para esto es necesario determinar los ángulos del haz de luz que proporciona el proyector, determinado por el área cuadrada a iluminar, y la altura del montaje de la luminaria. Ver figura 36.

Como primer paso se calculan los puntos E, D Y C.

- Punto E:

$$\theta_E = \text{Tan}^{-1} \frac{60 \text{ m}}{16,75 \text{ m}} = 74,4^\circ$$

$$\theta_L = \frac{74,4^\circ}{4} = 18,6^\circ$$

$$\theta_P = 18,6^\circ + 18,6^\circ = 37,2^\circ$$

$$\theta_G = 74,4^\circ * \frac{3}{4} = 55,8^\circ$$

$$\theta_O = 0$$

- Punto D:

$$D_x = \sqrt{60^2 + \frac{30^2}{2}} = 61,85 \text{ m}$$

$$\theta_D = \text{Tan}^{-1} \frac{61,85}{16,75} = 74,85^\circ$$

$$\theta_{AD1} = \frac{74,85^\circ}{4} = 18,7^\circ$$

$$\theta_{AD2} = 18,7^\circ + 18,7^\circ = 37,4^\circ$$

$$\theta_{AD3} = 74,85^\circ * \frac{3}{4} = 56,1^\circ$$

$$\theta_A = 0$$

- Punto C:

$$C_x = \sqrt{60^2 + \frac{30^2}{2}} = 61,85 \text{ m}$$

$$\theta_C = \text{Tan}^{-1} \frac{61,85}{16,75} = 74,85^\circ$$

$$\theta_{BC1} = \frac{74,85^\circ}{4} = 18,7^\circ$$

$$\theta_{BC2} = 18,7^\circ + 18,7^\circ = 37,45^\circ$$

$$\theta_{BC3} = 74,85^\circ * \frac{3}{4} = 56,1^\circ$$

$$\theta_B = 0$$

Para su representación en el gráfico isocandela, una vez obteniendo los ángulos de incidencia, se calculan las coordenadas verticales:

$$\theta_E = 74,4 - 37,2 = 37,2^\circ$$

$$\theta_D = 74,85 - 37,4 = 37,45^\circ$$

$$\theta_L = 18,6 - 37,2 = -18,6^\circ$$

$$\theta_{AD1} = 18,7 - 37,4 = -18,7^\circ$$

$$\theta_P = 37,2 - 37,2 = 0$$

$$\theta_{AD2} = 37,4 - 37,4 = 0$$

$$\theta_G = 55,8 - 37,2 = 18,6^\circ$$

$$\theta_{AD3} = 56,1 - 37,4 = 18,7^\circ$$

$$\theta_O = 0 - 37,2 = -37,2^\circ$$

$$\theta_A = 0 - 37,4 = -37,4^\circ$$

$$\theta_C = 74,85 - 37,45 = 37,4^\circ$$

$$\theta_{BC1} = 18,7 - 37,45 = -18,75^\circ$$

$$\theta_{BC2} = 37,45 - 37,45 = 0$$

$$\theta_{BC3} = 56,1 - 37,4 = 18,7^\circ$$

$$\theta_B = 0 - 37,4 = -37,4^\circ$$

Por último es necesario calcular las coordenadas horizontales:

- Punto E:

$$\alpha_E = \text{Tan}^{-1} \frac{0 \cdot \cos(74,4)}{16,75} = 0$$

$$\alpha_L = \text{Tan}^{-1} \frac{0 \cdot \cos(18,6)}{16,75} = 0$$

$$\alpha_P = \text{Tan}^{-1} \frac{0 \cdot \cos(37,2)}{16,75} = 0$$

$$\alpha_G = \text{Tan}^{-1} \frac{0 \cdot \cos(55,8)}{16,75} = 0$$

$$\alpha_O = \text{Tan}^{-1} \frac{0 \cdot \cos(0)}{16,75} = 0$$

- Punto D:

$$\alpha_D = \text{Tan}^{-1} \frac{-15 \cdot \cos(74,86)}{16,75} = -35,43$$

$$\alpha_{AD1} = \text{Tan}^{-1} \frac{-15 \cdot \cos(18,7)}{16,75} = -40,3$$

$$\alpha_{AD2} = \text{Tan}^{-1} \frac{-15 \cdot \cos(37,4)}{16,75} = -35,43$$

$$\alpha_{AD3} = \text{Tan}^{-1} \frac{-15 \cdot \cos(56,1)}{16,75} = -26,53$$

$$\alpha_A = \text{Tan}^{-1} \frac{-15 \cdot \cos(0)}{16,75} = -41,84$$

- Punto C:

$$\alpha_C = \text{Tan}^{-1} \frac{15 \cdot \cos(74,86)}{16,75} = 35,43$$

$$\alpha_{BC1} = \text{Tan}^{-1} \frac{15 \cdot \cos(18,7)}{16,75} = 40,3$$

$$\alpha_{BC2} = \text{Tan}^{-1} \frac{15 \cdot \cos(37,4)}{16,75} = 35,43 \quad \alpha_{BC3} = \text{Tan}^{-1} \frac{15 \cdot \cos(56,1)}{16,75} = 26,53$$

$$\alpha_B = \text{Tan}^{-1} \frac{15 \cdot \cos(0)}{16,75} = 41,84$$

Con los resultados anteriores se grafica el flujo luminoso en la matriz de intensidad luminosa proporcionada por el fabricante de la luminaria. Ver figura 54.

Una vez graficada la distribución luminosa, es posible determinar el flujo útil del proyector. Se calcula de la siguiente manera.

$$CBU = \frac{\phi_U}{\phi_L} \quad (\text{Ec. 28})$$

$$CBU = \frac{33\,075}{50\,000}$$

$$CBU = 0,66$$

Tabla XXI. **Coordenadas para matriz de intensidad luminosa**

Ubicación	Coordenada Vertical	Coordenada Horizontal
Θ_E	37,2	0
Θ_L	-18,6	0
Θ_P	0	0
Θ_G	18,6	0
Θ_O	-37,2	0
Θ_D	37,45	-35,43
Θ_{AD1}	-18,7	-40,3
Θ_{AD2}	0	-35,43
Θ_{AD3}	18,7	-26,53
Θ_A	-37,4	-41,84
Θ_C	37,4	35,43
Θ_{BC1}	-18,75	40,3
Θ_{BC2}	0	35,43
Θ_{BC3}	18,7	26,53
Θ_B	-37,4	41,84

Fuente: elaboración propia, utilizando Microsoft Word 2016.

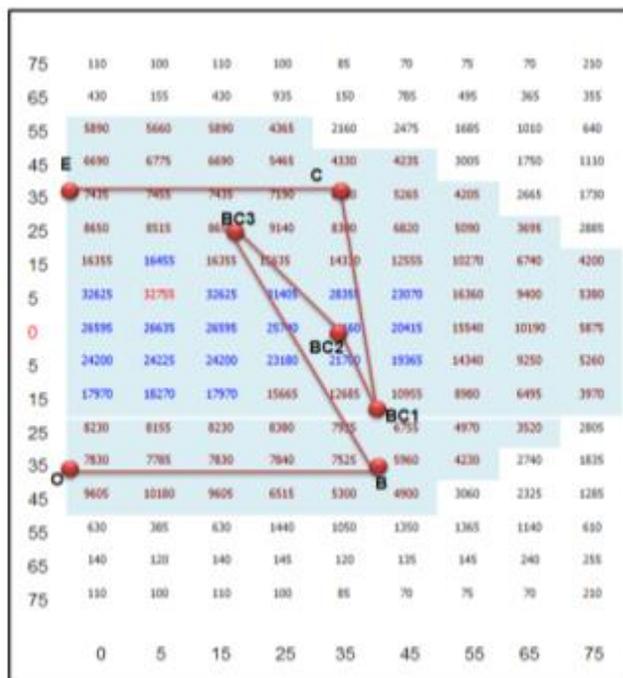
El factor de mantenimiento se calcula mediante la ecuación 23. Para esto considera un factor de pérdidas de 0,66, expresado de la relación entre el flujo útil y el flujo de la luminaria con un factor de depreciación de luminaria de 0,93, para un sistema muy limpio de configuración cerrada, tal como se detalla en la tabla VIII.

$$F_m = 0,66 * 0,93$$

$$F_m = 0,61$$

En la figura 54 se observa la distribución del haz para las coordenadas de la tabla XXI, junto con las intensidades luminosas proporcionadas por el fabricante.

Figura 54. **Matriz de Intensidad Luminosa – Zona 230 kV**



Fuente: elaboración propia, utilizando Microsoft Excel 2016.

Figura 55. **Candela Luminaria Lithonia Lightning 400 W Sodio Alta Presión**

Candela Table - Type B																			
	-90	-75	-65	-55	-45	-35	-25	-15	-5	0	5	15	25	35	45	55	65	75	90
90	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
85	0	0	0	10	20	25	30	40	50	35	50	40	30	25	20	10	0	0	0
75	0	0	210	70	75	70	85	100	110	100	110	100	85	70	75	70	210	0	0
65	0	175	355	365	495	785	150	935	430	155	430	935	150	785	495	365	355	175	0
55	0	425	640	1010	1685	2475	2160	4365	5890	5660	5890	4365	2160	2475	1685	1010	640	425	0
45	0	700	1110	1750	3005	4235	4330	5465	6690	6775	6690	5465	4330	4235	3005	1750	1110	700	0
35	0	1010	1730	2665	4205	5265	6360	7190	7435	7455	7435	7190	6360	5265	4205	2665	1730	1010	0
25	0	1325	2885	3695	5090	6820	8300	9140	8650	8515	8650	9140	8300	6820	5090	3695	2885	1325	0
15	0	1695	4200	6740	10270	12555	14330	15635	16355	16455	16355	15635	14330	12555	10270	6740	4200	1695	0
5	0	2115	5380	9400	16360	23070	28355	31405	32625	32755	32625	31405	28355	23070	16360	9400	5380	2115	0
0	0	2300	5875	10190	15540	20415	24160	25740	26595	26635	26595	25740	24160	20415	15540	10190	5875	2300	0
-5	0	2040	5260	9250	14340	19365	21700	23180	24200	24225	24200	23180	21700	19365	14340	9250	5260	2040	0
-15	0	1485	3970	6495	8980	10955	12685	15665	17970	18270	17970	15665	12685	10955	8980	6495	3970	1485	0
-25	0	1140	2805	3520	4970	6755	7935	8380	8230	8155	8230	8380	7935	6755	4970	3520	2805	1140	0
-35	0	945	1835	2740	4230	5960	7525	7840	7830	7785	7830	7840	7525	5960	4230	2740	1835	945	0
-45	0	715	1285	2325	3060	4900	5300	6515	9605	10180	9605	6515	5300	4900	3060	2325	1285	715	0
-55	0	465	610	1140	1365	1350	1050	1440	630	385	630	1440	1050	1350	1365	1140	610	465	0
-65	0	195	255	240	145	135	120	145	140	120	140	145	120	135	145	240	255	195	0
-75	0	0	60	60	65	80	110	115	135	120	135	115	110	80	65	60	60	0	0
-85	0	0	0	10	20	35	70	55	70	65	70	55	70	35	20	10	0	0	0
-90	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

Fuente: Lithonia Lightning. *Visual Photometric Tool*. <https://www.visual-3d.com/tools/PhotometricViewer/Default.aspx?ID=13675>. Consulta 10 de febrero de 2021.

Mediante la ecuación 12 se determina el número de proyectores necesarios para la instalación, cumpliendo los niveles establecidos según normativa, para esto se requiere conocer previamente el factor de mantenimiento, el coeficiente de utilización y el flujo luminoso de la luminaria.

$$N = \frac{160 * 1800}{50\,000 * 0,66 * 0,61}$$

$$N = 14,3 \text{ luminarias}$$

Para cumplir la normativa NOM 001 SEDE 2012, en cuanto al nivel de luminosidad de 160 lux para áreas de maniobra, es necesario tener un sistema lumínico que cuente como mínimo con 15 luminarias en esta zona.

Tabla XXII. **Cálculos obtenidos sistema de iluminación 230 kV**

ÁREA	Altura de instalación	Nivel de iluminación Normativa	Flujo Luminoso Luminaria	Cantidad de luminarias	Coefficiente de utilización	Factor de mantenimiento
Zona 230kV	16,75 m	160 lux	50 000 lm	15	0,66	0,61

Fuente: elaboración propia, utilizando Microsoft Word 2016.

Tabla XXIII. **Cálculo del alumbrado exterior para la zona de transformadores**

Ancho (m)	Largo (m)	Área (m ²)	Altura de montaje (h _m)	Nivel de iluminación mínimo (lux)
36,5	60	2 190	10	110

Fuente: elaboración propia, utilizando distanciómetro STEREN HER-430.

Primero se representa el haz de luz en un diagrama isocandela. Para esto es necesario determinar los ángulos del haz de luz que proporciona el proyector, determinado por el área cuadrada a iluminar y la altura del montaje de la luminaria. Ver figura 36.

Como primer paso se calculan los puntos E, D Y C.

- Punto E:

$$\theta_E = \tan^{-1} \frac{60 \text{ m}}{10 \text{ m}} = 80,54^\circ$$

$$\theta_L = \frac{80,54^\circ}{4} = 20,13^\circ$$

$$\theta_P = 20,13^\circ + 20,13^\circ = 40,26^\circ$$

$$\theta_G = 80,54^\circ * \frac{3}{4} = 60,4^\circ$$

$$\theta_O = 0$$

- Punto D:

$$D_x = \sqrt{60^2 + \frac{36,5^2}{2}} = 62,71 \text{ m}$$

$$\theta_D = \text{Tan}^{-1} \frac{62,71}{10} = 80,94^\circ$$

$$\theta_{AD1} = \frac{80,94^\circ}{4} = 20,23^\circ$$

$$\theta_{AD2} = 20,23^\circ + 20,23^\circ = 40,46^\circ$$

$$\theta_{AD3} = 80,94^\circ * \frac{3}{4} = 60,7^\circ$$

$$\theta_A = 0$$

- Punto C:

$$C_x = \sqrt{60^2 + \frac{36,5^2}{2}} = 62,71 \text{ m}$$

$$\theta_C = \text{Tan}^{-1} \frac{62,71}{10} = 80,94^\circ$$

$$\theta_{BC1} = \frac{80,94^\circ}{4} = 20,23^\circ$$

$$\theta_{BC2} = 20,23^\circ + 20,23^\circ = 40,46^\circ$$

$$\theta_{BC3} = 80,94^\circ * \frac{3}{4} = 60,7^\circ$$

$$\theta_B = 0$$

Para su representación en el gráfico isocandela, una vez obtenidos los ángulos de incidencia, se calculan las coordenadas verticales:

$$\theta_E = 80,54 - 40,26 = 40,28^\circ$$

$$\theta_D = 80,94 - 40,46 = 40,48^\circ$$

$$\theta_L = 20,13 - 40,26 = -20,13^\circ$$

$$\theta_{AD1} = 20,23 - 40,46 = -20,23^\circ$$

$$\theta_P = 40,26 - 40,26 = 0$$

$$\theta_{AD2} = 40,46 - 40,46 = 0$$

$$\theta_G = 60,4 - 40,26 = 20,14^\circ$$

$$\theta_{AD3} = 60,7 - 40,46 = 20,24^\circ$$

$$\theta_O = 0 - 40,26 = -40,26^\circ \quad \theta_A = 0 - 40,46 = -40,46^\circ$$

$$\theta_C = 80,94 - 40,46 = 40,48^\circ$$

$$\theta_{BC1} = 20,23 - 40,46 = -20,23^\circ$$

$$\theta_{BC2} = 40,46 - 40,46 = 0$$

$$\theta_{BC3} = 60,7 - 40,46 = 20,24^\circ$$

$$\theta_B = 0 - 40,46 = -40,46^\circ$$

Por último es necesario calcular las coordenadas horizontales:

- Punto E:

$$\alpha_E = \text{Tan}^{-1} \frac{0 \cdot \cos(80,54)}{10} = 0$$

$$\alpha_L = \text{Tan}^{-1} \frac{0 \cdot \cos(20,13)}{10} = 0$$

$$\alpha_P = \text{Tan}^{-1} \frac{0 \cdot \cos(40,26)}{10} = 0$$

$$\alpha_G = \text{Tan}^{-1} \frac{0 \cdot \cos(60,4)}{10} = 0$$

$$\alpha_O = \text{Tan}^{-1} \frac{0 \cdot \cos(0)}{10} = 0$$

- Punto D:

$$\alpha_D = \text{Tan}^{-1} \frac{-18,25 \cdot \cos(80,94)}{10} = -16,03$$

$$\alpha_{AD1} = \text{Tan}^{-1} \frac{-18,25 \cdot \cos(20,23)}{10} = -59,72$$

$$\alpha_{AD2} = \text{Tan}^{-1} \frac{-18,25 \cdot \cos(40,46)}{10} = -54,24$$

$$\alpha_{AD3} = \text{Tan}^{-1} \frac{-18,25 \cdot \cos(60,7)}{10} = -41,76$$

$$\alpha_A = \text{Tan}^{-1} \frac{-18,25 \cdot \cos(0)}{10} = -61,28$$

- Punto C:

$$\alpha_C = \text{Tan}^{-1} \frac{18,25 \cdot \cos(80,94)}{10} = 16,03$$

$$\alpha_{BC1} = \text{Tan}^{-1} \frac{18,25 \cdot \cos(20,23)}{10} = 59,72$$

$$\alpha_{BC2} = \text{Tan}^{-1} \frac{18,25 \cdot \cos(40,46)}{10} = 54,24$$

$$\alpha_{BC3} = \text{Tan}^{-1} \frac{18,25 \cdot \cos(60,7)}{10} = 41,76$$

$$\alpha_B = \text{Tan}^{-1} \frac{18,25 \cdot \cos(0)}{10} = 61,28$$

Con los resultados anteriores se grafica el flujo luminoso en la matriz de intensidad luminosa proporcionada por el fabricante de la luminaria. Ver figura 56.

Una vez graficada la distribución luminosa, es posible determinar el flujo útil del proyector. Se calcula de la siguiente manera.

$$CBU = \frac{\Phi_U}{\Phi_L} \quad (\text{Ec. 28})$$

$$CBU = \frac{38\ 400}{50\ 000}$$

$$CBU = 0,768$$

Tabla XXIV. **Coordenadas para matriz de intensidad luminosa**

Ubicación	Coordenada Vertical	Coordenada Horizontal
Θ_E	40,28	0
Θ_L	-20,13	0
Θ_P	0	0
Θ_G	20,14	0
Θ_O	-40,26	0
Θ_D	40,48	-16,03
Θ_{AD1}	-20,23	-59,72
Θ_{AD2}	0	-54,24
Θ_{AD3}	20,24	-41,76
Θ_A	-40,46	-61,28
Θ_C	40,48	16,03
Θ_{BC1}	-20,23	59,72
Θ_{BC2}	0	54,24
Θ_{BC3}	20,24	41,76
Θ_B	-40,4	61,28

Fuente: elaboración propia, utilizando Microsoft Word 2016.

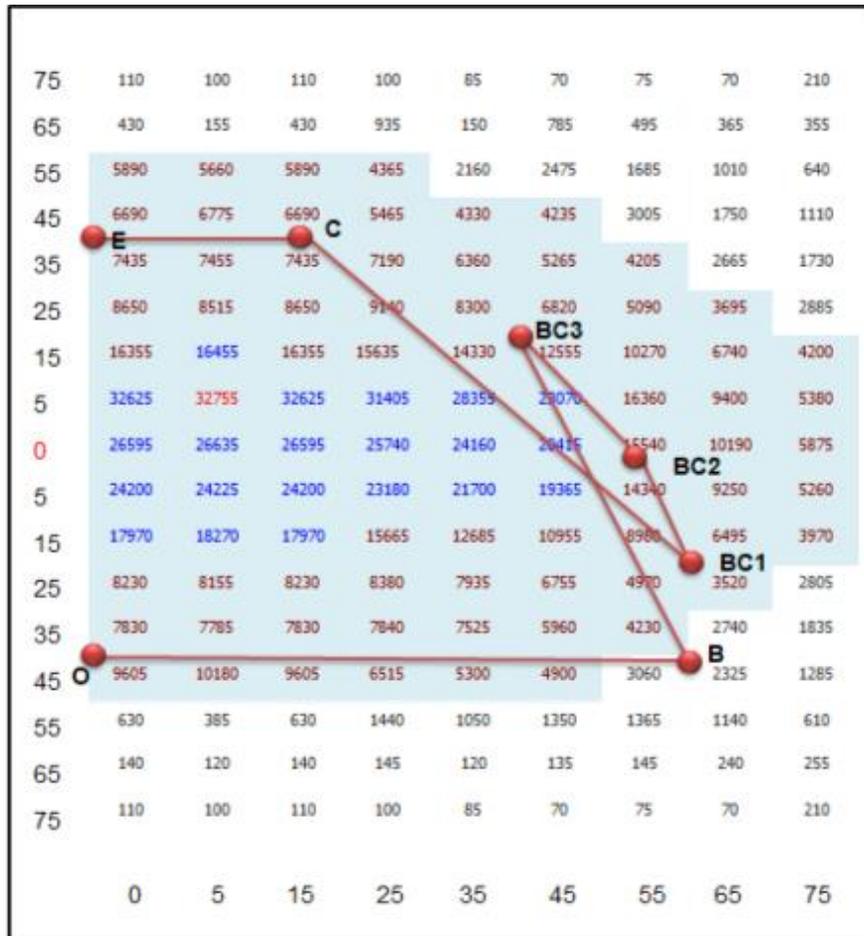
El factor de mantenimiento se calcula mediante la ecuación 23. Para esto considera un factor de pérdidas de 0,768, expresado de la relación entre el flujo útil y el flujo de la luminaria con un factor de depreciación de luminaria de 0,93, para un sistema muy limpio de configuración cerrada, tal como se detalla en la tabla VIII.

$$F_m = 0,768 * 0,93$$

$$F_m = 0,71$$

En la figura 56 se observa la distribución del haz para las coordenadas de la tabla XXIV, junto con las intensidades luminosas proporcionadas por el fabricante.

Figura 56. **Matriz de intensidad luminosa – Zona Transformadores**



Fuente: elaboración propia, utilizando Microsoft Excel 2016.

Mediante la ecuación 12 se determina el número de proyectores necesarios para la instalación, cumpliendo los niveles establecidos según normativa, para esto se requiere conocer previamente el factor de mantenimiento, el coeficiente de utilización y el flujo luminoso de la luminaria.

$$N = \frac{110 * 2190}{50000 * 0,768 * 0,71}$$

$$N = 8,83 \text{ luminarias}$$

Para cumplir la normativa NOM 001 SEDE 2012, en cuanto al nivel de luminosidad de 110 *lux* para áreas de maniobra, es necesario tener un sistema lumínico que cuente como mínimo con 9 luminarias en esta zona.

Tabla XXV. **Cálculos obtenidos sistema de iluminación transformadores**

Área	Altura de instalación	Nivel de iluminación Normativa	Flujo Luminoso Luminaria	Cantidad de luminarias	Coefficiente de utilización	Factor de mantenimiento
Zona Trafos	10 m	110 lux	50 000 lm	9	0,768	0,71

Fuente: elaboración propia, utilizando Microsoft Word 2016.

Tabla XXVI. **Cálculo del alumbrado exterior para la zona de 69 kV**

Ancho (m)	Largo (m)	Área (m ²)	Altura de montaje (h _m)	Nivel de iluminación mínimo (lux)
26,5	60	1 590	8,5	160

Fuente: elaboración propia, utilizando distanciómetro STEREN HER-430.

Primero se representa el haz de luz en un diagrama isocandela. Para esto es necesario determinar los ángulos del haz de luz que proporciona el proyector, determinado por el área cuadrada a iluminar y la altura del montaje de la luminaria. Ver figura 36.

Como primer paso se calculan los puntos E, D Y C.

- Punto E:

$$\theta_E = \text{Tan}^{-1} \frac{60 \text{ m}}{8,5 \text{ m}} = 81,93^\circ$$

$$\theta_L = \frac{81,93^\circ}{4} = 20,48^\circ$$

$$\theta_P = 20,48^\circ + 20,48^\circ = 40,96^\circ$$

$$\theta_G = 81,93^\circ * \frac{3}{4} = 61,45^\circ$$

$$\theta_O = 0$$

- Punto D:

$$D_x = \sqrt{60^2 + \frac{26,5^2}{2}} = 61,45 \text{ m}$$

$$\theta_D = \text{Tan}^{-1} \frac{61,45}{8,5} = 82,12^\circ$$

$$\theta_{AD1} = \frac{82,12^\circ}{4} = 20,53^\circ$$

$$\theta_{AD2} = 20,53^\circ + 20,53^\circ = 41,06^\circ$$

$$\theta_{AD3} = 82,12^\circ * \frac{3}{4} = 61,59^\circ$$

$$\theta_A = 0$$

- Punto C:

$$C_x = \sqrt{60^2 + \frac{26,5^2}{2}} = 61,45 \text{ m}$$

$$\theta_C = \text{Tan}^{-1} \frac{61,45}{8,5} = 82,12^\circ$$

$$\theta_{BC1} = \frac{82,12^\circ}{4} = 20,53^\circ$$

$$\theta_{BC2} = 20,53^\circ + 20,53^\circ = 41,06^\circ$$

$$\theta_{BC3} = 82,12^\circ * \frac{3}{4} = 61,59^\circ$$

$$\theta_B = 0$$

Para su representación en el gráfico isocandela, una vez obtenidos los ángulos de incidencia, se calculan las coordenadas verticales:

$$\begin{aligned}\theta_E &= 81,93 - 40,96 = 40,97^\circ & \theta_D &= 82,12 - 41,06 = 41,06^\circ \\ \theta_L &= 20,48 - 40,96 = -20,48^\circ & \theta_{AD1} &= 20,53 - 41,06 = -20,53^\circ \\ \theta_P &= 40,96 - 40,96 = 0 & \theta_{AD2} &= 41,06 - 41,06 = 0 \\ \theta_G &= 61,45 - 40,96 = 20,49^\circ & \theta_{AD3} &= 61,59 - 41,06 = 20,53^\circ \\ \theta_O &= 0 - 40,96 = -40,96^\circ & \theta_A &= 0 - 41,06 = -41,06^\circ\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}\theta_C &= 82,12 - 41,06 = 41,06^\circ \\ \theta_{BC1} &= 20,53 - 41,06 = -20,53^\circ \\ \theta_{BC2} &= 41,06 - 41,06 = 0 \\ \theta_{BC3} &= 61,59 - 41,06 = 20,53^\circ \\ \theta_B &= 0 - 41,06 = -41,06^\circ\end{aligned}$$

Por último, es necesario calcular las coordenadas horizontales:

- Punto E:

$$\alpha_E = \text{Tan}^{-1} \frac{0 * \cos(81,93)}{8,5} = 0$$

$$\alpha_L = \text{Tan}^{-1} \frac{0 * \cos(20,48)}{8,5} = 0$$

$$\alpha_P = \text{Tan}^{-1} \frac{0 * \cos(40,96)}{8,5} = 0$$

$$\alpha_G = \text{Tan}^{-1} \frac{0 * \cos(61,45)}{8,5} = 0$$

$$\alpha_O = \text{Tan}^{-1} \frac{0 * \cos(0)}{8,5} = 0$$

- Punto D:

$$\alpha_D = \text{Tan}^{-1} \frac{-13,25 \cdot \cos(82,12)}{8,5} = -12,06 \quad \alpha_{AD1} = \text{Tan}^{-1} \frac{-13,25 \cdot \cos(20,53)}{8,5} = -55,59$$

$$\alpha_{AD2} = \text{Tan}^{-1} \frac{-13,25 \cdot \cos(41,06)}{8,5} = -49,6 \quad \alpha_{AD3} = \text{Tan}^{-1} \frac{-13,25 \cdot \cos(61,59)}{8,5} = -36,56$$

$$\alpha_A = \text{Tan}^{-1} \frac{-13,25 \cdot \cos(0)}{8,5} = -57,3$$

- Punto C:

$$\alpha_C = \text{Tan}^{-1} \frac{13,25 \cdot \cos(82,12)}{8,5} = 12,06 \quad \alpha_{BC1} = \text{Tan}^{-1} \frac{13,25 \cdot \cos(20,53)}{8,5} = 55,59$$

$$\alpha_{BC2} = \text{Tan}^{-1} \frac{13,25 \cdot \cos(41,06)}{8,5} = 49,6 \quad \alpha_{BC3} = \text{Tan}^{-1} \frac{13,25 \cdot \cos(61,59)}{8,5} = 36,56$$

$$\alpha_B = \text{Tan}^{-1} \frac{13,25 \cdot \cos(0)}{8,5} = 57,3$$

Con los resultados anteriores se grafica el flujo luminoso en la matriz de intensidad luminosa proporcionada por el fabricante de la luminaria. Ver figura 57

Una vez graficada la distribución luminosa, es posible determinar el flujo útil del proyector. Se calcula de la siguiente manera.

$$CBU = \frac{\Phi_U}{\Phi_L} \quad (\text{Ec. 28})$$

$$CBU = \frac{37\,500}{50\,000}$$

$$CBU = 0,75$$

Tabla XXVII. **Coordenadas para matriz de intensidad luminosa**

Ubicación	Coordenada Vertical	Coordenada Horizontal
Θ_E	40,97	0
Θ_L	-20,48	0
Θ_P	0	0
Θ_G	20,49	0
Θ_O	-40,96	0
Θ_D	41,06	-12,06
Θ_{AD1}	-20,53	-55,59
Θ_{AD2}	0	-49,6
Θ_{AD3}	20,53	-36,56
Θ_A	-41,06	-57,3
Θ_C	41,06	12,06
Θ_{BC1}	-20,53	55,59
Θ_{BC2}	0	49,6
Θ_{BC3}	20,53	36,56
Θ_B	-41,06	57,3

Fuente: elaboración propia, utilizando Microsoft Word 2016.

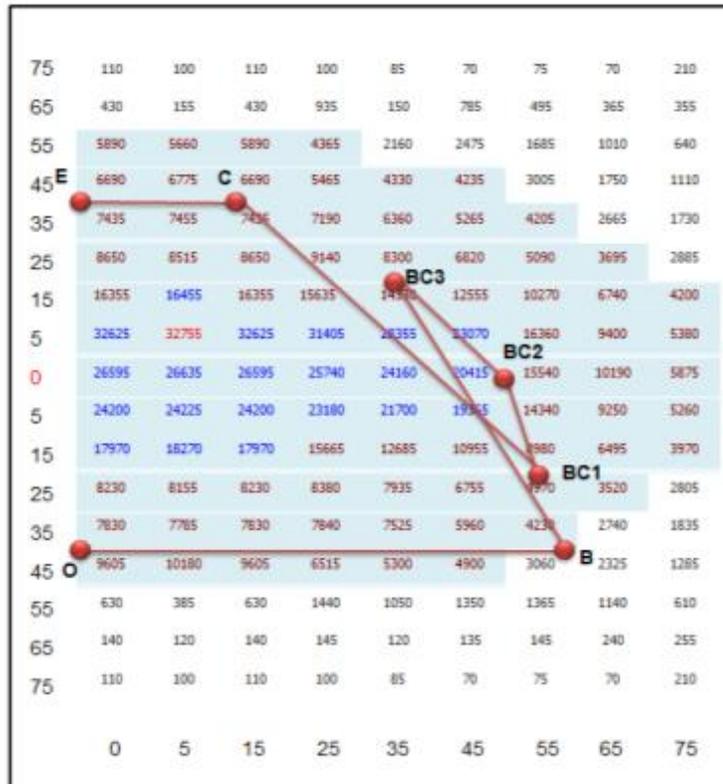
El factor de mantenimiento se calcula mediante la ecuación 23. Para esto considera un factor de pérdidas de 0,75, expresado de la relación entre el flujo útil y el flujo de la luminaria con un factor de depreciación de luminaria de 0,93, para un sistema muy limpio de configuración cerrada, tal como se detalla en la tabla VIII.

$$F_m = 0,75 * 0,93$$

$$F_m = 0,70$$

En la figura 57 se observa la distribución del haz para las coordenadas de la tabla XXVII, junto con las intensidades luminosas proporcionadas por el fabricante.

Figura 57. Matriz de intensidad luminosa – Zona 69 kV



Fuente: elaboración propia, utilizando Microsoft Excel 2016.

Mediante la ecuación 12 se determina el número de proyectores necesarios para la instalación, cumpliendo los niveles establecidos según normativa, para esto se requiere conocer previamente el factor de mantenimiento, el coeficiente de utilización y el flujo luminoso de la luminaria.

$$N = \frac{160 * 1590}{50\,000 * 0,75 * 0,70}$$

$$N = 9,69 \text{ luminarias}$$

Para cumplir la normativa NOM 001 SEDE 2012 en cuanto al nivel de luminosidad de 160 lux para áreas de maniobra, es necesario tener un sistema lumínico que cuente como mínimo con 10 luminarias en esta zona.

Tabla XXVIII. **Cálculos obtenidos sistema de iluminación 69 kV**

Área	Altura de instalación	Nivel de iluminación Normativa	Flujo Luminoso Luminaria	Cantidad de luminarias	Coefficiente de utilización	Factor de mantenimiento
Zona 69 kV	8,5 m	160 lux	50 000 lm	10	0,75	0,70

Fuente: elaboración propia, utilizando Microsoft Word 2016.

5.2.1. Niveles de iluminación para áreas de trabajo

El objetivo de mantener un sistema de iluminación apto para la tarea que se realiza recae en priorizar la salud en un entorno amigable para prevenir de posibles errores humanos en la realización.

Definir los requisitos de iluminación según las áreas utilizadas en los lugares de trabajo, para obtener la iluminación mínima que es necesaria para el desarrollo de cada actividad visual, para recrear un ambiente óptimo y capacitado en la realización de las tareas que desarrollen los empleados.¹⁵

Para la iluminación de áreas de trabajo, la Normativa Oficial Mexicana NOM 025-STPS-2008, proporciona las condiciones adecuadas que necesita un ambiente para el buen desempeño de las funciones del trabajador; mientras que la Normativa Oficial Mexicana NOM-001-SEDE-2012, referente a las instalaciones eléctricas, menciona aspectos a considerar para su implementación en Subestaciones Eléctricas.

¹⁵ NORMA Oficial Mexicana NOM-025-STPS-2008. *Condiciones de iluminación en los centros de trabajo*. http://dof.gob.mx/nota_detalle.php?codigo=5076393&fecha=30/12/2008. Consulta: 1 de febrero de 2021.

En el caso del circuito que alimenta el sistema de iluminación, será independiente de otras cargas “En subestaciones, el circuito definido para este tipo de iluminación debe ser exclusivo y poseer la protección necesaria contra sobrecorriente”¹⁶.

Es deber del operador de la subestación mantener en constante supervisión el sistema de alumbrado, identificando puntos con baja luminosidad o poca uniformidad “Es preciso que el operador actualice a su jefe superior las condiciones del sistema de iluminación”¹⁷.

El área de trabajo de la zona de maniobras se considera una tarea difícil, esto debido a las reparaciones y rondas visuales a las que se encuentra sometido el operador, un nivel de iluminación de 160 lux tal como se detalló en la sección anterior es imprescindible.

5.2.2. Comparación del nivel de iluminancia del sistema de iluminación actual vs., sistema de iluminación ideal

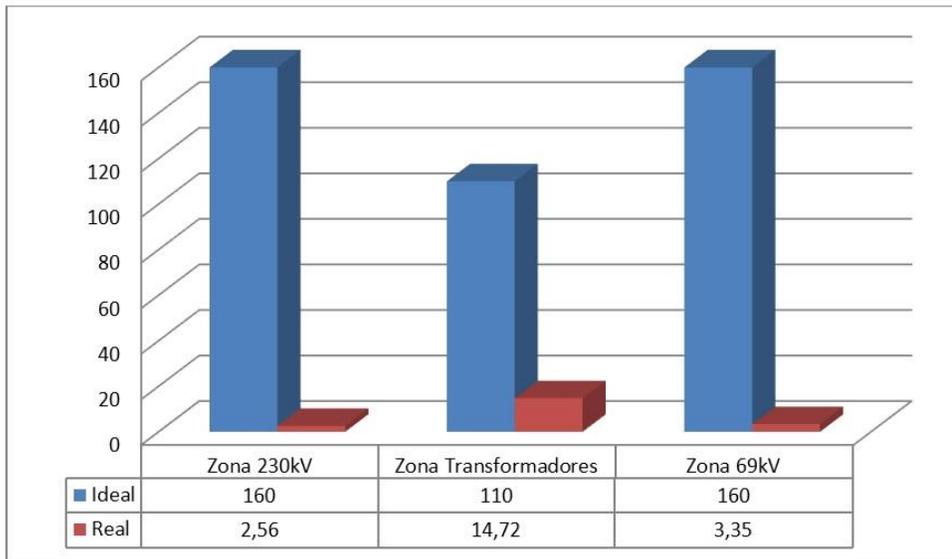
El sistema de iluminación evaluado presenta una distribución no uniforme, se observa en los puntos de medición, la existencia de zonas que carecen de buena luminosidad y otras que varían drásticamente.

Un sistema de iluminación ideal como lo establece la Normativa NOM-001-SEDE-2012, postula un nivel de iluminación mínimo de 160 lux para áreas de maniobra y de 110 lux para zonas de circulación.

¹⁶ Norma Oficial Mexicana NOM-001-SEDE-2012. *Instalaciones eléctricas (utilización)*. Artículo 924-5. <http://pandora.fime.uanl.mx/~omeza/pro/LEYES/NOM-001-SEDE-2012%20.pdf>. Consulta: 1 de febrero de 2021.

¹⁷ Norma Oficial Mexicana NOM-025-STPS-2008. *Condiciones de iluminación en los centros de trabajo*. Artículo 6.1. http://dof.gob.mx/nota_detalle.php?codigo=5076393&fecha=30/12/2008. Consulta: 1 de febrero de 2021.

Figura 58. **Comparación nivel de iluminación Ideal vs., real**



Fuente: elaboración propia, utilizando Microsoft Excel 2016.

En la figura 58 se observa que los niveles de iluminación reales están muy lejos del valor ideal. Dado que las mediciones se realizaron a 1,6 m de altura, considerando un nivel de iluminación de 110 lux para todas las zonas, se obtiene un 97,68 % de déficit de iluminación para la zona de 230 kV, un 86,62 % en la zona de transformadores y un 96,95 % en la zona de 69 kV.

Estos resultados reflejan distintos errores que se deben considerar a la hora del análisis de un sistema de iluminación, la falta de mantenimiento a las luminarias causando un bajo rendimiento de estas unidades con bombillos estropeados, la poca uniformidad en la distribución de estas, una mala elección de la luminaria o una incorrecta dirección del haz luminoso.

5.2.3. Confort visual

El *confort* visual de un sistema de iluminación no corresponde únicamente al nivel de iluminación para el área de trabajo sino que incluye, con la misma importancia, la temperatura del color. “La temperatura de color es muy importante en los centros de trabajo, puesto que tiene mucha influencia en el rendimiento y la concentración”¹⁸.

La temperatura de una luminaria varía según los grados kelvin; magnitud utilizada para definir el tipo de color que emite una fuente de luz. Si una luminaria posee valores por debajo de los 3 500 K tiende a emitir una luz con un tono más cálido, por el contrario, una luminaria comprendida entre los 3 500 K a 5 000 K posee un tono de luz neutro y si la misma supera los 6 000 K se caracteriza por emitir un tono de luz blanca (frío).

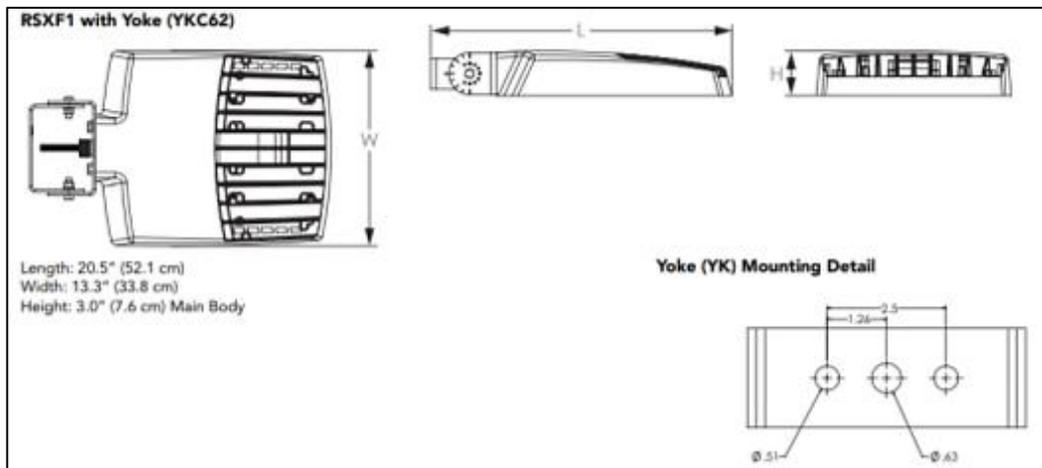
La temperatura de color que proporciona una luminaria de vapor de sodio de alta presión se encuentra alrededor de los 2 100 K siendo esta de un tono cálido, ideal para crear un ambiente agradable, pero dificulta la realización de actividades minuciosas. Por el contrario, una luminaria led ofrece una amplia variedad de colores, una selección de temperatura entre 5 000 K a 6 000 K, un tono de luz más fría, parece ser el adecuado para el tipo de actividad que se realiza en una subestación eléctrica, en definitiva permite una mejor visibilidad en el desempeño de las tareas básicas y no propicia la fatiga visual, por esfuerzos innecesarios, al momento de efectuar mantenimientos.

¹⁸ Factorled. Iluminación led. *Qué temperatura de color he de escoger.* <https://www.factorled.com/blog/es/iluminacion-led-y-la-importancia-de-la-temperatura-de-color/>. Consulta: 1 de febrero de 2021.

5.3. Selección de equipo a utilizar

Para el diseño de iluminación se utiliza 2 tipos de luminarias de la marca Lithonia Lighting de la serie RSXF1 led. El montaje para utilizar será de tipo Yoke (YKC62) las características físicas se detallan en la figura 59.

Figura 59. Diseño RSXF1 led



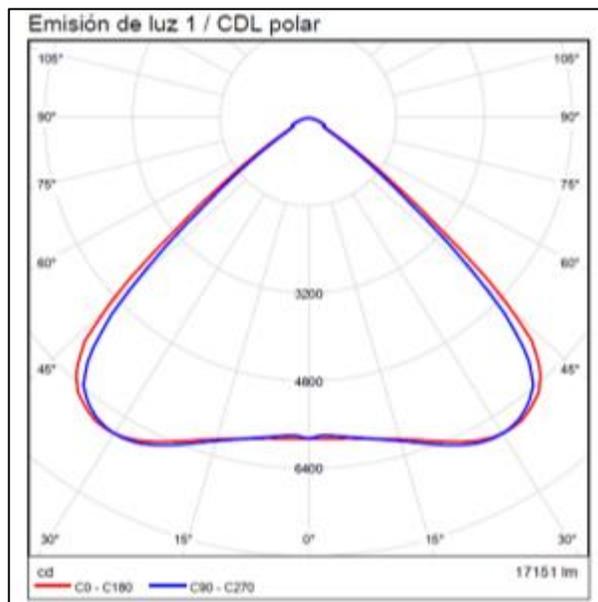
Fuente: Lithonia Lighting. *RSXF1 led Floodlight*. https://img.acuitybrands.com/public-assets/catalog/854432/lithonia-rsxf1-flood-led.pdf?abl_version=04%2f15%2f2021+12:49:53&DOC_Type=SPEC_SHEET. Consulta: 5 de abril de 2021.

Se equipan con el paquete de rendimiento P4 a una temperatura de color de 5 000 K y un voltaje de 240 V. Vida útil de 100 000 horas.

Se utiliza la luminaria RSXF1 led P4 50K MFL RSXF Flood Fixture Size 1 P4 Lumen Package 5000K CCT Type MFL Distribution 1x, la cual posee una distribución de luz amplia, para la iluminación de zonas que posean un plano de trabajo cercano a las luminarias. Ver figura 60.

Posee un flujo luminoso de 17 151 lm y una potencia de 133,1 W, proporcionando de esta manera, un rendimiento lumínico de 128,8 lm/W.

Figura 60. **Emisión de luz distribución MFL**



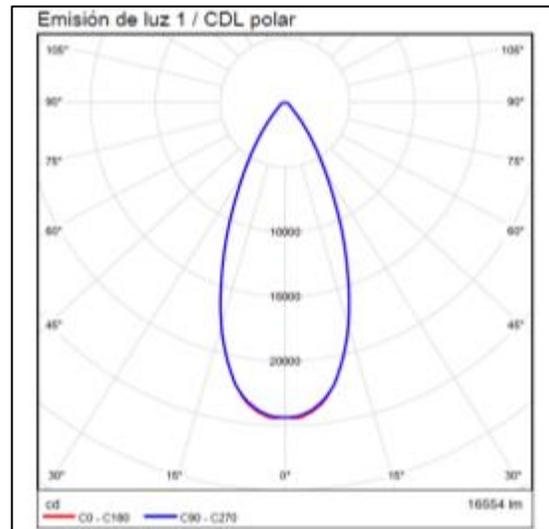
Fuente: Lithonia Lighting. *RSXF1 led Floodlight*.

<https://lithonia.acuitybrands.com/products/detail/854432/lithonia-lighting/rsxf1-led-floodlight/up-to-17000-lumens>. Consulta: 6 de abril de 2021.

La segunda luminaria seleccionada es la RSXF1 led P4 50K NFL RSXF Flood Fixture Size 1 P4 Lumen Package 5000K CCT Type NFL Distribution 1x, a diferencia de la anterior, esta posee una distribución de haz focalizada y de mayor alcance. Ver figura 61.

Posee un flujo luminoso de 16 554 lm y una potencia de 133,1 W, proporcionando de esta manera, un rendimiento lumínico de 124,3 lm/W.

Figura 61. **Emisión de luz distribución NFL**



Fuente: Lithonia Lighting. *RSXF1 led Floodlight*.

<https://lithonia.acuitybrands.com/products/detail/854432/lithonia-lighting/rsxf1-led-floodlight/up-to-17000-lumens>. Consulta: 6 de abril de 2021.

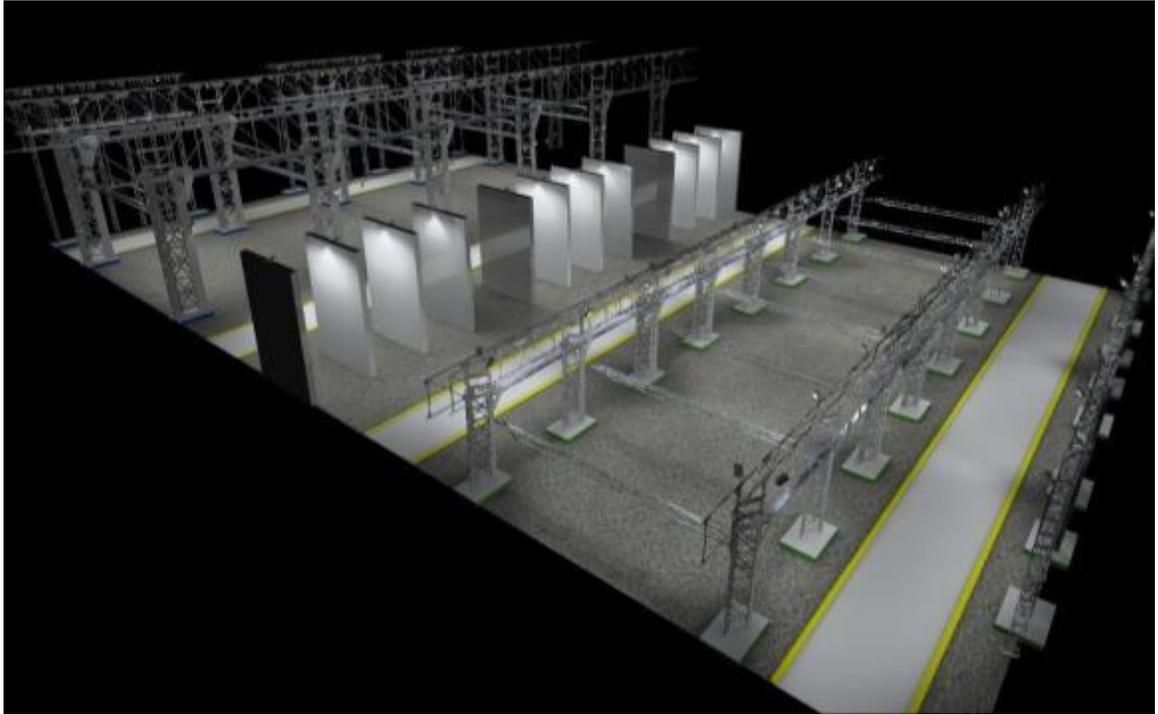
5.4. **Diseño de iluminación led mediante el software DIALux EVO 8,1**

DIALux es un software de iluminación capaz de realizar cálculos lumínicos en diseños de interior o exterior. Para instalación del software ver anexo 4.

El diseño se elaboró implementando el software con las medidas físicas mencionadas anteriormente. Consta de 3 zonas: 230 kV, transformadores y 69 kV. Todas comprendidas en un terreno total de 5 580 m².

En la figura 62 se aprecia el diseño, modelado en 3D, en la cual se observa la zona 230 kV representada por las bases inferiores en color azul, la zona central de transformadores con sus respectivos muros cortafuegos y la zona 69 kV representadas por las bases inferiores en color verde.

Figura 62. **Vista 3D Subestación Externa, de alta tensión, con tecnología led**



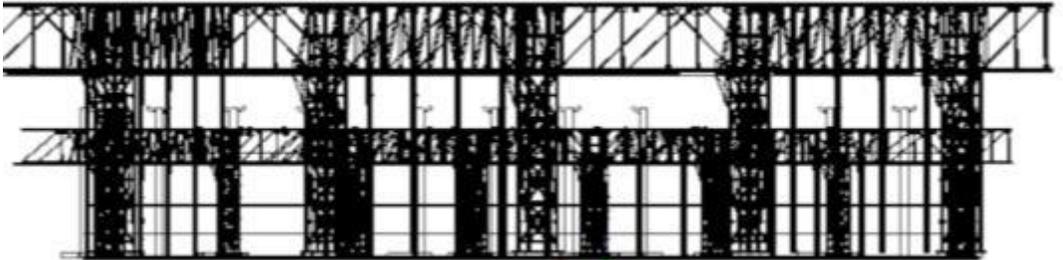
Fuente: elaboración propia, utilizando DIALux.

La aparamenta de la zona de 230 kV se diseñó con una altura de 17 m, mientras que la de 69 kV posee una altura de 8,5 m y los muros cortafuegos alcanzan una altura de 10 m a nivel del suelo.

En las figuras 63, 64 y 65 se detalla las vistas del diseño constructivo de la subestación eléctrica. Para los pasos del diseño de iluminación ver apéndice 5.

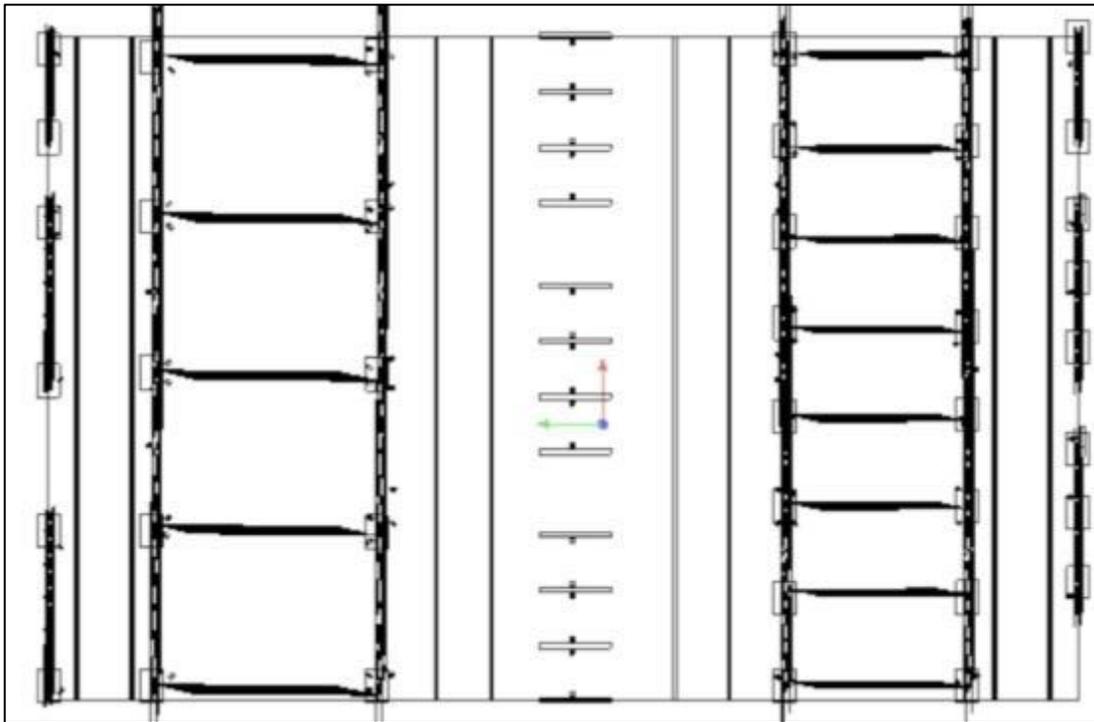
El sistema de iluminación se realizó con proyectores de tecnología led ubicados en la aparamenta y los muros de la subestación.

Figura 63. **Vista Lateral Izquierda**



Fuente: elaboración propia, utilizando DIALux.

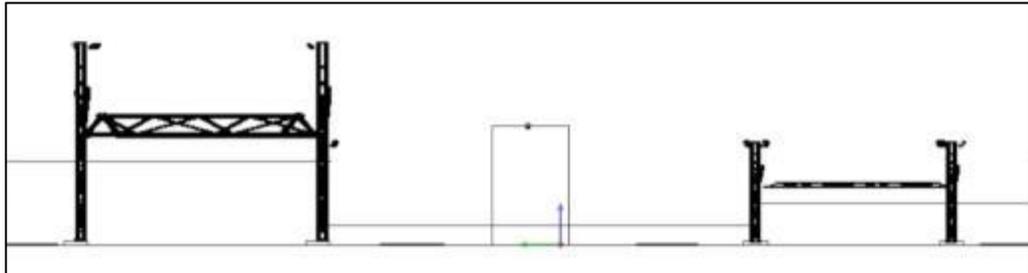
Figura 64. **Vista de planta**



Fuente: elaboración propia, utilizando DIALux.

La selección de materiales se escogió de manera que se asemejaran a la realidad, para que al momento del cálculo los factores de reflectancia, no representaran una variación significativa en el resultado.

Figura 65. **Alzado**

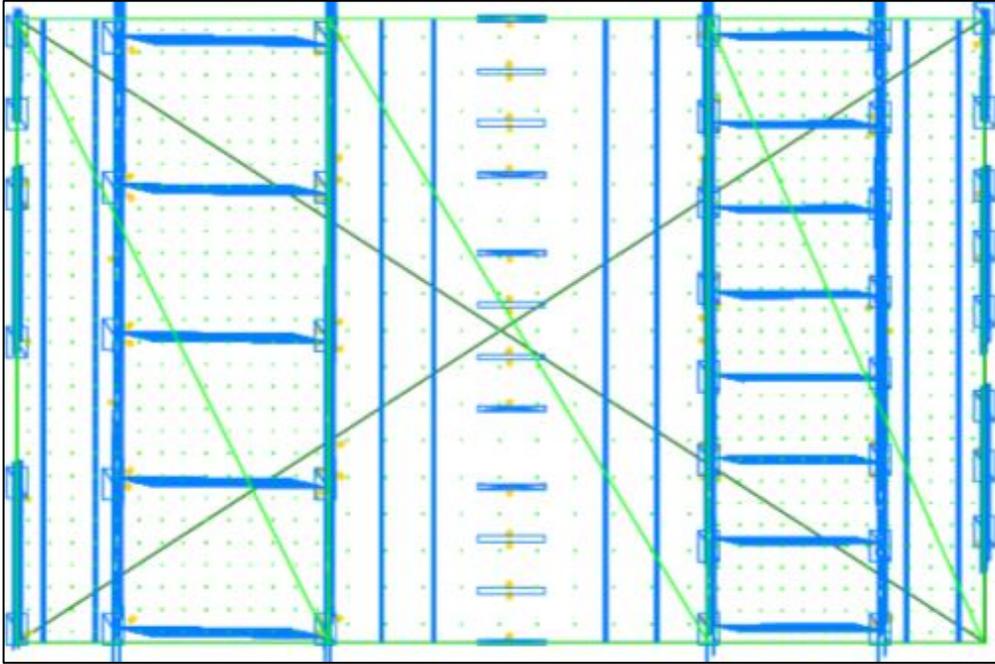


Fuente: elaboración propia, utilizando DIALux.

5.4.1. **Plano de distribución de luminarias**

En la figura 66 se observa la distribución de las luminarias en el diseño de iluminación, estas son representadas en color amarillo.

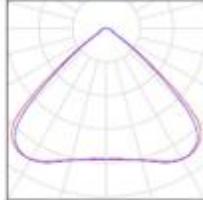
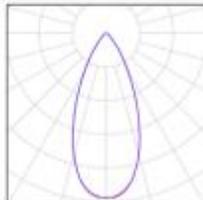
Figura 66. **Distribución de luminarias en el sistema de iluminación**



Fuente: elaboración propia, utilizando DIALux.

En la figura 67 se observa la dirección del haz luminoso para todas las luminarias instaladas, posteriormente observaremos los niveles de iluminación y como el cruce de su proyección se refleja en un aumento puntual en su nivel de iluminación.

Figura 68. Cantidad de luminarias instaladas

ILUMINACION SUBESTACION ELÉCTRICA EXTERNA DE ALTA TENSIÓN - DIALUX -			
Número de unidades	Luminaria (Emisión de luz)		
48	Lithonia Lighting - RSXF1 LED P4 50K MFL RSXF Flood Fixture Size 1 P4 Lumen Package 5000K CCT Type MFL Distribution Emisión de luz I Lámpara: 1x Fotometría absoluta Flujo luminoso de las luminarias: 17151 lm Potencia: 133.1 W Rendimiento lumínico: 128.8 lm/W Indicaciones colorimétricas Ix: CCT 3000 K, CRI 100		
42	Lithonia Lighting - RSXF1 LED P4 50K NFL RSXF Flood Fixture Size 1 P4 Lumen Package 5000K CCT Type NFL Distribution Emisión de luz I Lámpara: 1x Fotometría absoluta Flujo luminoso de las luminarias: 16554 lm Potencia: 133.1 W Rendimiento lumínico: 124.3 lm/W Indicaciones colorimétricas Ix: CCT 3000 K, CRI 100		
Flujo luminoso total de lámparas: 1518516 lm, Flujo luminoso total de luminarias: 1518516 lm, Potencia total: 11979.0 W, Rendimiento lumínico: 127.6 lm/W			

Fuente: Lithonia Lighting. *RSXF1 led Floodlight*.

<https://lithonia.acuitybrands.com/products/detail/854432/lithonia-lighting/rsxf1-led-floodlight/up-to-17000-lumens>. Fecha: 19 de abril de 2021.

Para cumplir con los niveles mínimos de luminosidad según la normativa, se necesitó emplear 48 luminarias del tipo Lithonia Lighting- RSXF1LED P4 50K MFL RSXF Flood Fixture Size 1 P4 Lumen Package 5000K CCT Type MFL Distribution. Y 42 luminarias del tipo Lithonia Lighting- RSXF1LED P4 50K NFL RSXF Flood Fixture Size 1 P4 Lumen Package 5000K CCT Type NFL Distribution.

5.4.3. Altura de instalación de luminarias

La altura de instalación de las luminarias se encuentra determinada por la altura de la aparamenta, para el área de 230 kV, se instalaron a 16,75 m de alto.

En el área de transformadores se instalaron a 8,5 m en los alrededores de la apartamenta, mientras en los muros cortafuegos fueron colocadas a 10 m de altura.

El área de 69 kV posee la instalación de las luminarias a 8,5 m, colocadas de igual manera en la estructura de la subestación.

Figura 69. **Lithonia Lighting RSXF1 led P4 50 K NFL**

Lithonia Lighting RSXF1 LED P4 50K NFL RSXF Flood Fixture Size: 1 P4 Lumen Package 5000K CCT Type NFL Distribution

N°	X [m]	Y [m]	Altura de montaje [m]	Factor de degradación
1	-22.816	39.000	16.750	0.80
2	-9.976	39.449	16.750	0.80
3	3.850	39.250	16.750	0.80
4	3.800	21.000	16.750	0.80
5	5.054	21.000	16.750	0.80
6	-8.500	21.000	16.750	0.80
7	-10.822	21.000	16.750	0.80
8	-24.167	49.000	16.750	0.80
9	19.260	49.249	16.750	0.80
10	33.497	49.350	16.750	0.80
11	-22.741	21.000	16.750	0.80
12	19.323	21.000	16.750	0.80
13	32.017	39.000	16.750	0.80
14	19.792	39.272	16.750	0.80
15	17.856	39.151	16.750	0.80
16	-8.521	39.262	16.750	0.80
17	5.479	39.250	16.750	0.80
18	17.713	21.000	16.750	0.80
19	31.774	21.009	16.750	0.80
20	17.063	49.250	16.750	0.80
21	-11.068	49.055	16.750	0.80
N°	X [m]	Y [m]	Altura de montaje [m]	Factor de degradación
22	-22.741	19.115	8.500	0.80
23	3.266	19.121	8.500	0.80
24	5.807	19.115	8.500	0.80
25	33.274	19.121	8.500	0.80
26	-22.937	-15.884	8.500	0.80
27	6.172	-15.884	8.500	0.80
28	4.106	-15.884	8.500	0.80
29	33.465	-15.677	8.500	0.80
30	3.937	49.055	16.750	0.80
31	-1.950	40.876	16.750	0.80
32	-8.914	-15.884	8.500	0.80
33	-5.914	-15.884	8.500	0.80
34	21.494	-15.884	8.500	0.80
35	19.428	-15.884	8.500	0.80
36	21.555	19.154	8.500	0.80
37	19.593	19.159	8.500	0.80
38	-5.914	18.982	8.500	0.80
39	-8.914	18.982	8.500	0.80
40	33.929	21.009	16.750	0.80
41	-23.990	21.009	16.750	0.80
42	11.925	40.876	16.750	0.80

Fuente: elaboración propia, utilizando DIALux.

En las figuras 69 y 70 se detallan las coordenadas de posición, para cada luminaria numerada en la figura 67; así como también la altura de instalación para las mismas.

Figura 70. **Lithonia Lighting RSXF1 LED P4 50K MFL**

N°	X [m]	Y [m]	Altura de montaje [m]	Factor de degradación
43	-23.401	-32.213	8.500	0.80
44	-8.862	-32.308	8.500	0.80
45	-5.862	-32.213	8.500	0.80
46	7.287	-31.921	8.500	0.80
47	9.999	-32.213	8.500	0.80
48	24.036	-32.145	8.500	0.80
49	33.504	-32.308	8.500	0.80
50	-6.500	-42.298	8.500	0.80
51	-1.383	-42.417	8.500	0.80
52	32.699	-42.298	8.500	0.80
53	18.043	-42.417	8.500	0.80
54	11.988	-42.298	8.500	0.80
55	-22.728	-33.761	8.500	0.80
56	-23.386	-17.102	8.500	0.80
57	-8.914	-17.304	8.500	0.80
58	-6.261	-17.260	8.500	0.80
59	7.610	-17.304	8.500	0.80
60	10.213	-17.260	8.500	0.80
61	34.666	-17.304	8.500	0.80
62	33.243	-17.304	8.500	0.80
63	-15.522	-42.417	8.500	0.80
64	-20.479	2.750	10.000	0.80
65	-24.479	2.750	10.000	0.80
66	-15.479	2.750	10.000	0.80
67	-19.521	2.750	10.000	0.80
68	-10.462	2.750	10.000	0.80
69	-14.521	2.750	10.000	0.80
N°	X [m]	Y [m]	Altura de montaje [m]	Factor de degradación
70	2.021	2.750	10.000	0.80
71	-2.021	2.750	10.000	0.80
72	7.021	2.750	10.000	0.80
73	2.979	2.750	10.000	0.80
74	12.021	2.750	10.000	0.80
75	7.979	2.750	10.000	0.80
76	24.521	2.750	10.000	0.80
77	20.479	2.750	10.000	0.80
78	29.521	2.750	10.000	0.80
79	25.479	2.750	10.000	0.80
80	34.062	2.750	10.000	0.80
81	30.521	2.750	10.000	0.80
82	-15.404	-32.308	8.500	0.80
83	0.494	-32.504	8.500	0.80
84	18.847	-32.504	8.500	0.80
85	25.536	-32.213	8.500	0.80
86	27.116	-17.260	8.500	0.80
87	0.746	-17.192	8.500	0.80
88	18.903	-17.192	8.500	0.80
89	-15.055	-17.192	8.500	0.80
90	5.000	-33.677	8.500	0.80

Fuente: elaboración propia, utilizando DIALux.

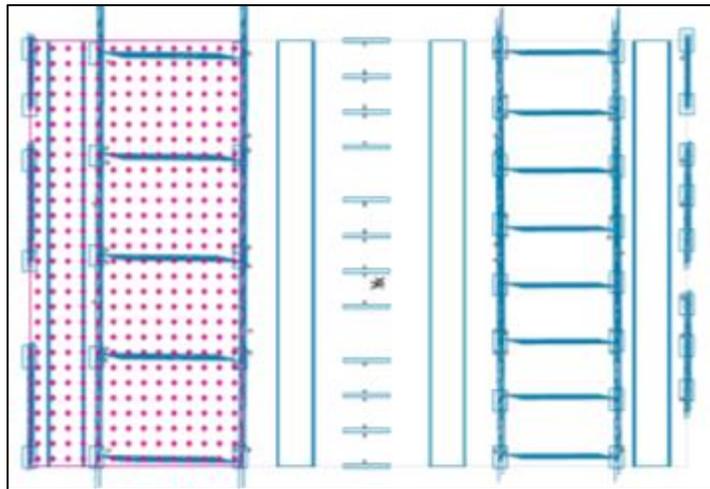
5.4.4. Análisis de las gráficas fotométricas

En la figura 71 se muestra el plano de la subestación, indicando la zona punteada en la cual se estableció un área de medición de intensidad lumínica perpendicular, para la zona de 230 kV.

La altura de medición, o plano de trabajo, en el cual se desea obtener el nivel de luminosidad requerido, se determinó a 7 metros de altura, mismos a los cuales se encuentra elevado el equipo de maniobra que el operador de la subestación requiere maniobrar.

Para las zonas evaluadas se consideró un factor de degradación de 0,8 para las luminarias.

Figura 71. Zona 230 kV / Intensidad lumínica perpendicular

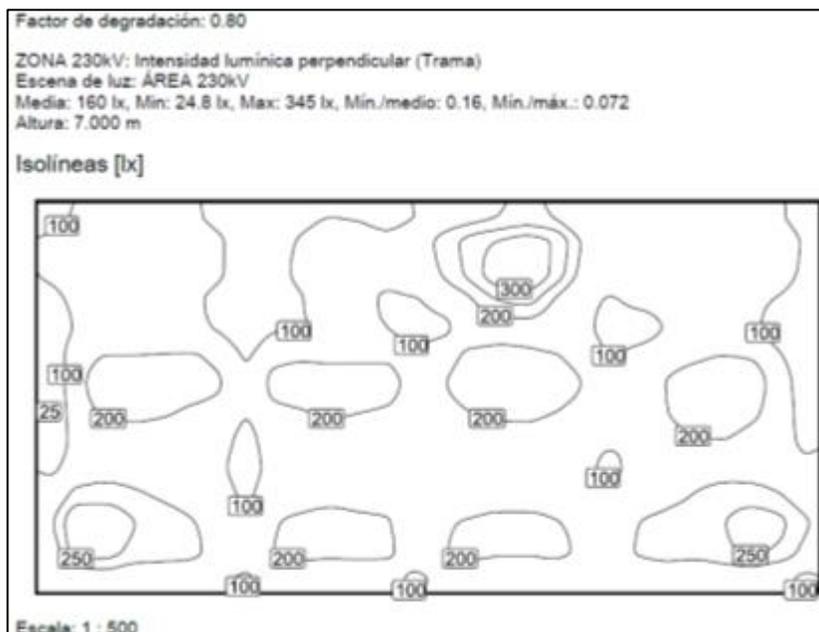


Fuente: elaboración propia, utilizando DIALux.

En la figura 72 se muestra la gráfica de distribución luminosa representada por líneas que plasman la concentración de la luz, para diferentes puntos de la superficie analizada.

En la gráfica se observa que, en la simulación, en la mayoría de la superficie se obtienen por lo menos 200 luxes para el área objetivo. Las zonas que presentan una mayor acumulación de intensidad luminosa es debido a que, por la altura de la instalación, se utilizaron las luminarias de haz estrecho RSXF1 con distribución NFL, pero al poseer un mayor alcance y una altura considerable, el haz incidía en el plano de medición relativamente disperso, con la ventaja de proveer de los lúmenes necesarios para cumplir el nivel de iluminación mínimo requerido.

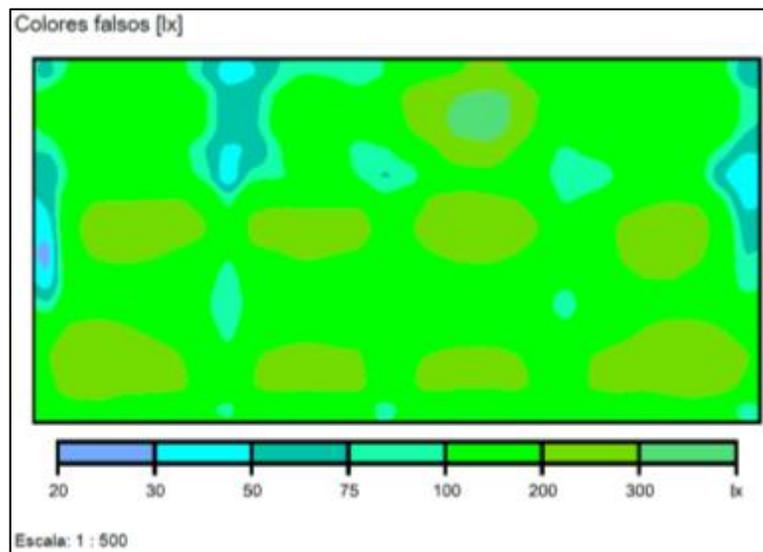
Figura 72. **Diagrama de isólinas de intensidad lumínica / Zona 230 kV**



Fuente: elaboración propia, utilizando DIALux.

En la figura 73 se muestra la gráfica de colores falsos, la cual facilita observar la uniformidad del sistema de iluminación. Como se representa en la gráfica, los niveles de iluminación presentan una mayor paridad en los resultados, en el rango entre 100 a 200 lux. Esta uniformidad se complementa con zonas de mayor incidencia de lux, que complementan el área objetivo, llegando en el rango de 200 a 300 lux. Las zonas con niveles de iluminación intermedia, por su posición en el plano, no afectan en la operación de los equipos, del mismo modo que estas representan un área menor a su contraparte.

Figura 73. **Colores falsos de intensidad lumínica / Zona 230 kV**

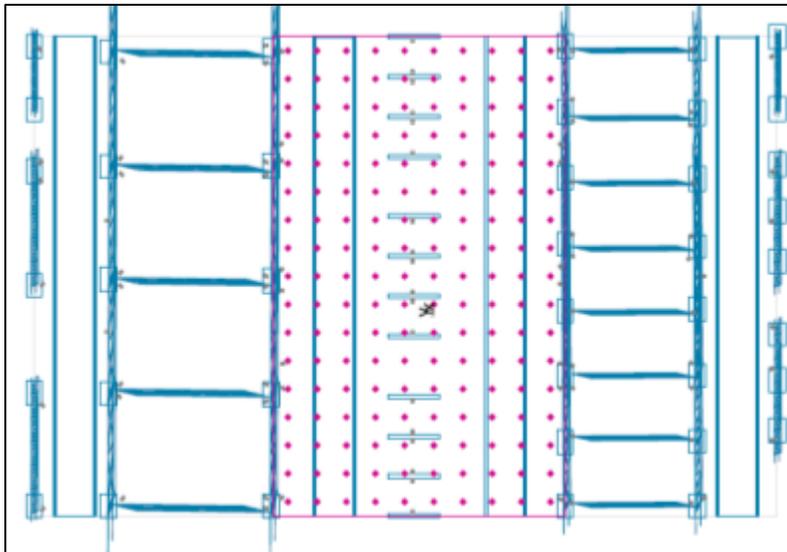


Fuente: elaboración propia, utilizando DIALux.

Corresponde ahora evaluar la zona de transformadores, la cual se observa en la figura 74. El plano de la subestación, indicado con la zona punteada, se refiere al área de medición de intensidad lumínica perpendicular que se calculó en la simulación.

La altura de medición o plano de trabajo, en el cual se desea obtener el nivel de luminosidad requerido, se determinó a 1,6 metros de altura, que corresponde a la zona de circulación de vehículos y personas. Esta zona, al precisar de los transformadores el centro de la zona, se considerará como área de maniobra.

Figura 74. **Zona Transformadores / Intensidad lumínica perpendicular**



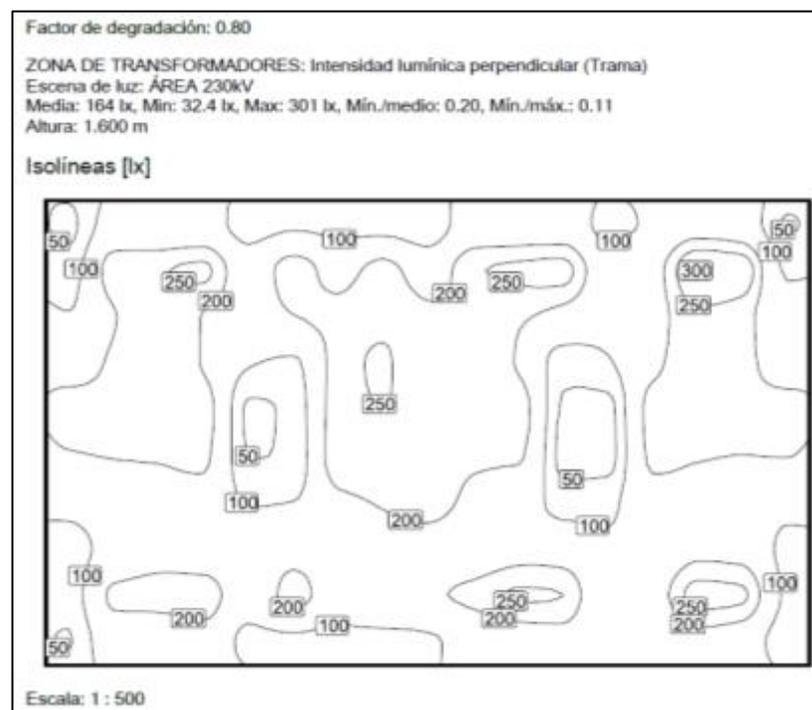
Fuente: elaboración propia, utilizando DIALux.

Dado que el área a iluminar es considerablemente más ancho, se utilizaron las luminarias led RSXF1 con distribución NFL de haz estrecho, instaladas en los extremos del área objetivo, con el fin de proveer la cantidad suficiente de iluminación en el plano perpendicular. Mientras que al centro de la zona, donde se ubican los transformadores junto a sus respectivos muros corta fuegos, en los mismos se instalaron luminarias del tipo led RSXF1 con distribución MFL de haz amplio; esto debido a que los muros corta fuegos no

permiten la correcta distribución de la luz entre ellos y se requería una distribución de luz que compensara las zonas de circulación a sus laterales.

En la figura 75 se observa, mediante las curvas de las isólineas, como a los laterales se encuentran concentraciones en el rango de 100 a 200 luxes, mientras que al centro, donde se ubican los transformadores, la luminosidad aumenta, con concentraciones en el orden de los 250 lux.

Figura 75. **Diagrama de isólineas de intensidad lumínica / Zona Transformadores**

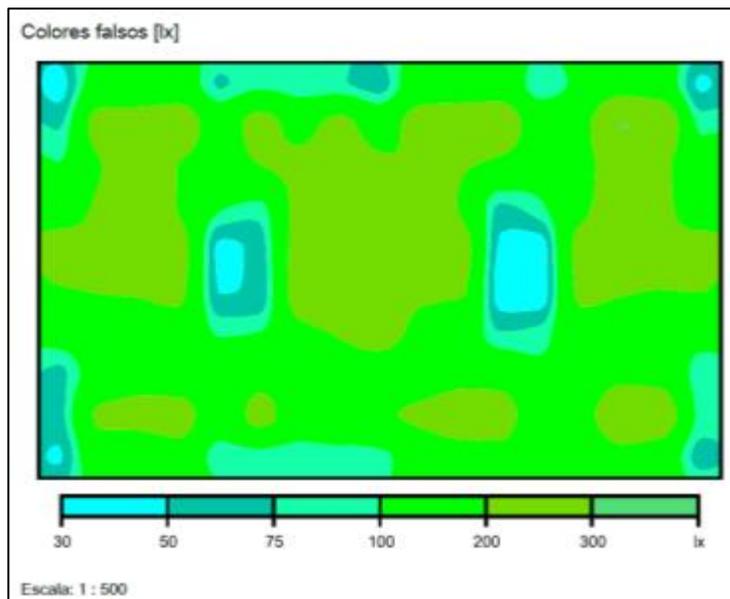


Fuente: elaboración propia, utilizando DIALux.

En la figura 76, mediante la representación gráfica de los colores falsos, se observa simplificado el resultado. Cabe resaltar la uniformidad promedio

entre 100 a 200 lux en la mayor parte del área objetivo. Mientras que en la zona central, se observan concentraciones entre 200 a 300 lux, destinados a los transformadores de potencia, pero como el plano de medición se encuentra situado a 1,6 m de altura, esta concentración se favorece, al ser considerada como área de maniobra.

Figura 76. **Colores falsos de intensidad lumínica / Zona Transformadores**



Fuente: elaboración propia, utilizando DIALux.

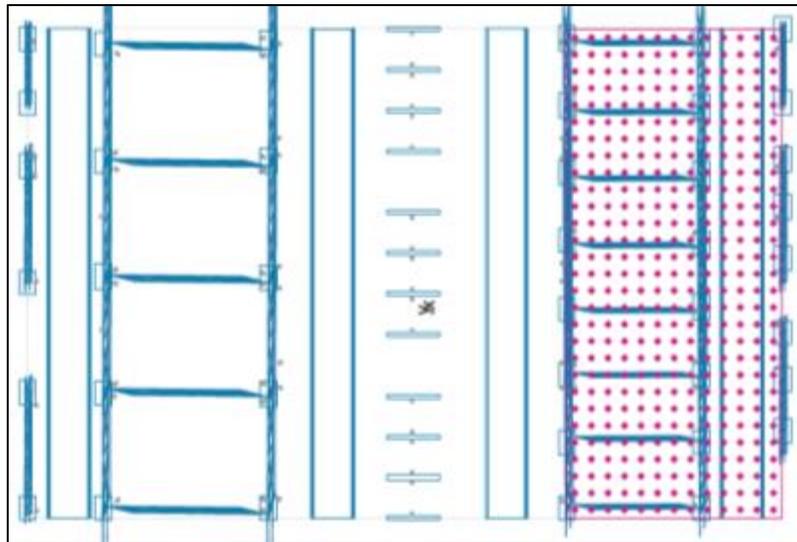
Por último se simuló la zona de 69 kV, correspondiente al área punteada mostrada en la figura 77.

La altura de medición o plano de trabajo, en el cual se desea obtener el nivel de luminosidad requerido, se determinó a 3,5 metros de altura, los cuales corresponden a equipos de maniobra.

La altura de instalación de luminarias se fijó a 8,5 m de altura. Al ser su superficie cuadrada, de menor tamaño, se utilizaron las luminarias led RSXF1 con distribución de luz amplia tipo MFL, para lograr una mayor uniformidad en el plano de medición.

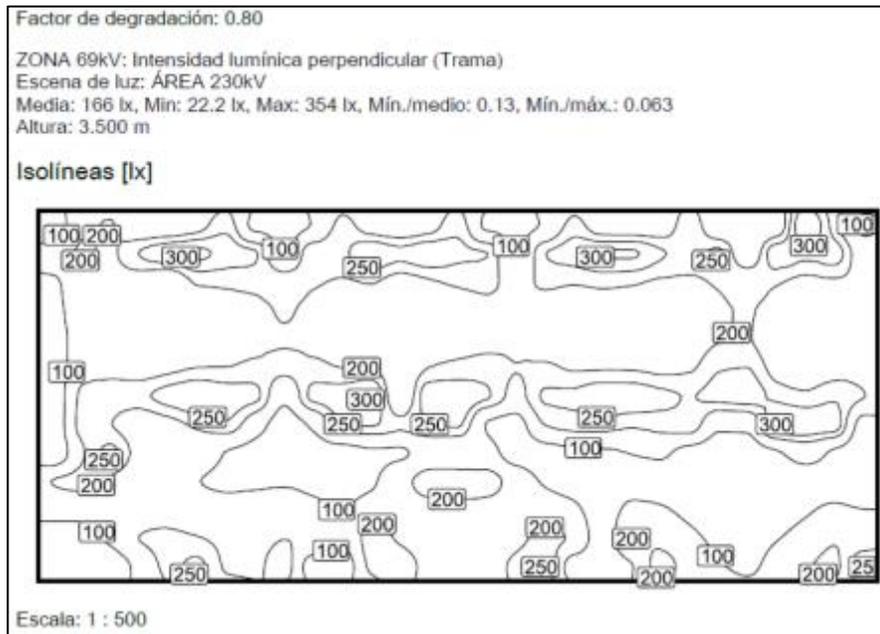
En la figura 78, en la representación gráfica de isolíneas, se observa una incidencia de luz perpendicular visiblemente más amplia.

Figura 77. **Zona 69 kV / Intensidad lumínica perpendicular**



Fuente: elaboración propia, utilizando DIALux.

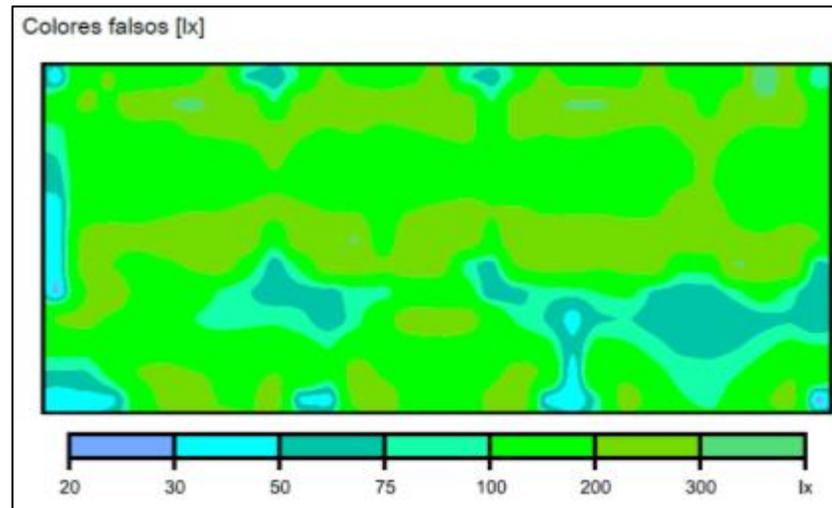
Figura 78. Diagrama de isólinas de intensidad lumínica / Zona 69 kV



Fuente: elaboración propia, utilizando DIALux.

En la figura 79 se observa claramente la uniformidad que se obtiene de esta luminaria, con distribución de tipo MFL, al tiempo que se cumplen los niveles de iluminación mínimos, requeridos en el área de interés

Figura 79. **Colores falsos de intensidad lumínica / Zona 69 kV**



Fuente: elaboración propia, utilizando DIALux.

5.4.5. **Análisis de los niveles de iluminación**

Para el cálculo del diseño de iluminación de la subestación eléctrica detallado en la figura 80, se utilizó el *software* DIALux EVO 8,1, que realiza la simulación mediante el cálculo del método de lúmenes promedio para proyectores, utilizado anteriormente.

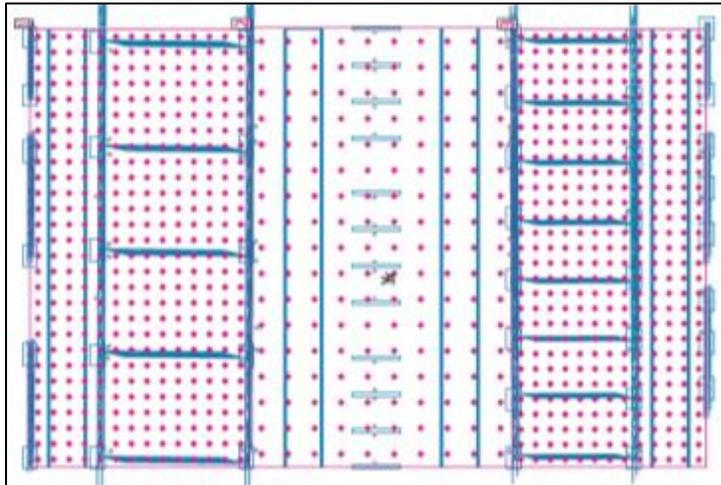
Para la zona 230 kV, la normativa establece un nivel mínimo de iluminación de 160 lux, siendo esta un área de maniobra. Posterior a la simulación, el cálculo del sistema lumínico refleja un nivel de iluminancia media de 160 lux, con un punto máximo de 345 lux y un mínimo de 24,8 lux. Ver figura 81.

Para la zona de transformadores, la normativa establece un nivel mínimo de iluminación de 110 lux, para las áreas de circulación de vehículos y personal.

Posterior a la simulación, el cálculo del sistema lumínico refleja un nivel de iluminancia media de 164 lux, un punto máximo de 301 lux con un mínimo de 32,4 lux. En este caso, como se observó anteriormente en las gráficas Isolíneas, la distribución luminosa se divide en las 2 áreas perfectamente.

Para la zona 69 kV, la normativa establece un nivel mínimo de iluminación de 160 lux, siendo esta un área de maniobra. Posterior a la simulación, el cálculo del sistema lumínico refleja un nivel de iluminancia media de 166 lux, con un punto máximo de 354 lux y un mínimo de 22,2 lux. Ver figura 81.

Figura 80. **Evaluación luminotécnica del sistema de iluminación**



Fuente: elaboración propia, utilizando DIALux.

Con los datos obtenidos de la simulación, se comprueba que se cumplen satisfactoriamente los estándares lumínicos establecidos en la Normativa Oficial Mexicana NOM 001 SEDE 2012 para subestaciones eléctricas.

Figura 81. Resultados de iluminación

Factor de degradación: 0.80						
General						
Superficie	Resultado	Media (Nominal)	Min	Max	Mín./medio	Mín./máx.
1 ZONA 230kV	Intensidad lumínica perpendicular [lx] Altura: 7.000 m	160	24.8	345	0.16	0.072
2 ZONA DE TRANSFORMADORES	Intensidad lumínica perpendicular [lx] Altura: 1.600 m	164	32.4	301	0.20	0.11
3 ZONA 69kV	Intensidad lumínica perpendicular [lx] Altura: 3.500 m	166	22.2	354	0.13	0.063

Fuente: elaboración propia, utilizando DIALux.

En la figura 82 se detallan las características generales que conforman el diseño de iluminación, siendo estas: cantidad de luminarias, potencia de conexión, flujo luminoso, descripción de las luminarias empleadas, factor de degradación, el tipo de parámetro examinado y los resultados de iluminancia obtenidos de la evaluación.

Figura 82. Resumen general del sistema de iluminación

Lista de luminarias								
Índice	Fabricante	Nombre del artículo	Número de artículo	Lámpara	Flujo luminoso	Factor de degradación	Potencia de conexión	Cantidad
1	Lithonia Lighting	RSXF Flood Fixture Size 1 P4 Lumen Package 5000K CCT Type NFL Distribution	RSXF1 LED P4 50K NFL	1x	16554 lm	0.80	133.1 W	42
2	Lithonia Lighting	RSXF Flood Fixture Size 1 P4 Lumen Package 5000K CCT Type MFL Distribution	RSXF1 LED P4 50K MFL	1x	17151 lm	0.80	133.1 W	48
#	Nombre	Parámetros	Mín	Max	Media	Mín./medio	Mín./máx.	
1	ZONA 230kV	Intensidad lumínica perpendicular	24.6 lx	345 lx	160 lx	0.16	0.072	
2	ZONA DE TRANSFORMADORES	Intensidad lumínica perpendicular	32.4 lx	301 lx	164 lx	0.20	0.11	
3	ZONA 69kV	Intensidad lumínica perpendicular	22.2 lx	354 lx	166 lx	0.13	0.063	

Fuente: elaboración propia, utilizando DIALux.

5.4.6. Análisis del consumo energético

El consumo energético del sistema de iluminación, se determina utilizando la potencia de la luminaria y la cantidad de unidades instaladas.

Tabla XXIX. **Consumo energético sistema de iluminación exterior con tecnología led**

Luminaria	Cantidad	Potencia kW	Total kW	Tiempo Horas/año	Consumo kWh/año
RSXF1 LED P4 50K NFL RSXF Flood Fixture Size 1 P4 Lumen Package 5000K CCT Type NFL Distribution 1x	42	0,1331	5,59	4 745	26 524,5
RSXF1 LED P4 50K MFL RSXF Flood Fixture Size 1 P4 Lumen Package 5000K CCT Type NFL Distribution 1x	48	0,1331	6,3888	4 745	30 314,86
TOTAL	90		11,9788		56 839,4

Fuente: elaboración propia, utilizando Microsoft Word 2016.

El tiempo horas/año de la tabla XXIX, se calculó con un promedio de uso diario de las luminarias de 13 horas, para una cantidad de 365 días por año.

El consumo energético anual del sistema de iluminación comprendido por 90 luminarias Lithonia Lighting con tecnología led de la serie RSXF1 de 133,1 W, es de 56 839,4 kWh/año.

El consumo energético, previamente calculado, de un sistema de iluminación ideal con luminarias vapor de sodio alta presión fue de 79 716 kWh/año. Los 56 839,4 kWh/año que corresponden a la tecnología equivalen al 71,3 % del consumo energético anual de las luminarias de 400 W.

Esto se traduce como un ahorro del 28,7 % anual solo en consumo energético. Aunado a esto la vida útil de las luminarias vapor de sodio de la serie Contour es de 36 000 horas frente a las 100 000 horas de operación de las luminarias RSXF1 LED. Esto se traduce en una mejora del 277,78 % de operación a un nivel de iluminación adecuado.

Tabla XXX. **Costo/beneficio de luminarias en el diseño de subestación**

Cantidad	Descripción	Costo unitario	Costo total	Vida útil	Horas/año	Consumo kWh/año	Precio del kWh	Factura por consumo de energía anual	Años estimados de vida útil
90	Luminaria Lithonia Lightning LED RSXF1 133.1W 17,151 Lm	Q 2 687,3	Q 241 857	100 000 horas	4 745 horas (13 horas diarias)	56 839,4	Q 1,31 / kWh	Q 74 459.6	21,1 años
42	Luminaria Lithonia Lightning VSAP 400W 50,000 Lm	Q 960	Q 40 320	36 000	4 745 horas (13 horas diarias)	79 716		Q 104 428	7,59 años

Fuente: elaboración propia, utilizando Microsoft Word 2016.

Las luminarias con tecnología led, representan un costo por consumo eléctrico de Q 74 459,6 anuales, mientras que, las luminarias con tecnología de vapor de sodio de alta presión, tiene un costo de Q 104 428. Se fija un precio por kWh de Q 1,31 y se obtuvo un beneficio anual de Q 29 968,4 al implementar el led.

Tabla XXXI. **Período de recuperación**

Año	Inversión Inicial	Beneficios	Flujos de efectivo
0	241 857	0,00	241857,0
1		29968,4	211888,6
2		29968,4	181920,2
3		29968,4	151951,8
4		29968,4	121983,4
5		29968,4	92015,0
6		29968,4	62046,6
7		29968,4	32078,2
8		70 288,40	0,0

Fuente: elaboración propia, utilizando Microsoft Excel 2016.

En la tabla XXXI se detalla el flujo de efectivo del diseño de iluminación con tecnología led al sustituir las luminarias de vapor de sodio de alta presión, y se obtuvo un período de recuperación de la inversión inicial de 8 años.

En la tabla XXXII se realizó el cálculo del VAN que es el valor actual neto y la tasa interna de retorno o TIR, los cuales determinan la rentabilidad que posee un proyecto de inversión.

Tabla XXXII. **Cálculo del VAN y TIR para luminarias RSXF1 led**

Datos														
Inversión	241,857	Tasa de descuento										5%		
LUMINARIA	INVERSION	AÑO 1	AÑO 2	AÑO 3	AÑO 4	AÑO 5	AÑO 6	AÑO 7	AÑO 8	AÑO 9	AÑO 10	AÑO 11	VAN	TIR
LED RSXF1	-241,857	29968,4	29968,4	29968,4	29968,4	29968,4	29968,4	29968,4	29968,4	29968,4	29968,4	29968,4	28677,62	7,12%

Fuente: elaboración propia, utilizando Microsoft Excel 2016.

En la tabla anterior se obtuvo un VAN de 28 677,62 y un TIR de 7,12 % para una tasa de descuento del 5 %.

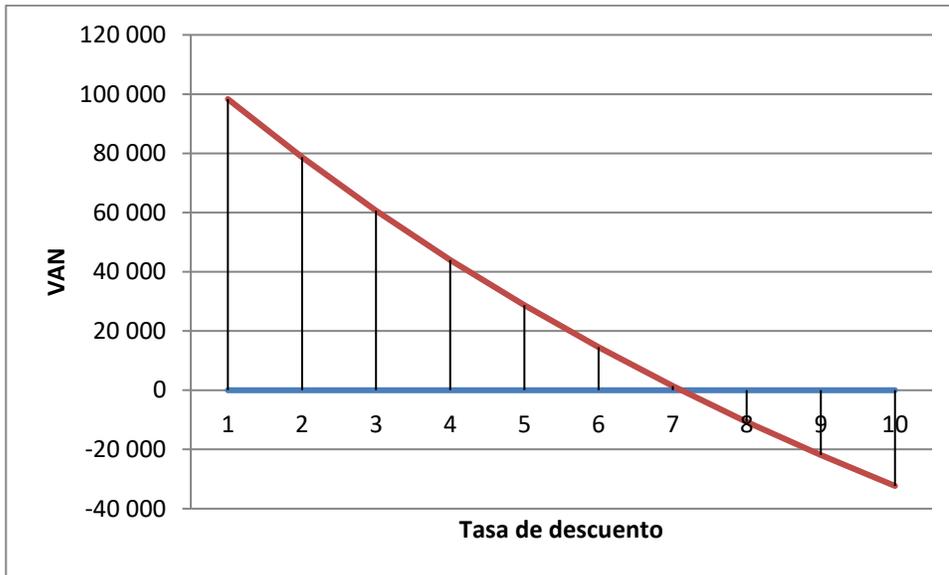
De los resultados se concluye que al obtener un VAN positivo y dado que la tasa de descuento es menor a la TIR el proyecto se acepta siendo este factible.

Tabla XXXIII. **Valores de VAN con Tasa de descuento variable**

TASA DE DESCUENTO	VAN
	RSXF1 LED
0 %	119715,35
1 %	98321,77
2 %	78682,55
3 %	60627,24
4 %	44004,07
5 %	28677,62
6 %	14526,98
7 %	1443,97
8 %	-10668,31
9 %	-21896,78
10 %	-32319,52

Fuente: elaboración propia, utilizando Microsoft Excel 2016.

Figura 83. Variación VAN vs., tasa de descuento



Fuente: elaboración propia, utilizando Microsoft Excel 2016.

En la figura 83 se visualiza el comportamiento del VAN a diferentes tasas de descuento variable, para una TIR de 7,12 % el VAN es igual a 0. Valores de tasa de descuento superiores a la TIR, el proyecto se vuelve inviable

CONCLUSIONES

1. Se observó un diseño de subestación con luminarias no uniformes que propiciaban una distribución de haz irregular (capítulo 5 conclusión general) lo que resultó necesario definir un diseño de alumbrado eficiente capaz de cumplir los niveles lumínicos adecuados.
2. Se realizó un estudio lumínico en una subestación eléctrica (sección 5.1.2.2) y se observó zonas con bajos niveles de iluminación asociado a una mala distribución de las luminarias.
3. Se seleccionó las luminarias del tipo RSXF1 LED (sección 5.3) con distribución de haz de tipo MFL Y NFL con las cuales se obtuvo una mejor eficiencia energética.
4. En el capítulo 5 (sección 5.4) se da a conocer el funcionamiento del *software* DIALux EVO 8.1 y se aplicó para el desarrollo de un sistema de iluminación de tipo exterior.
5. Se realizó un análisis de consumo energético (sección 5.4.6) en el que se determinó que las luminarias de tipo RSXF1 LED 133,1 W son un 28,7 % anual más ahorrativas frente a las luminarias de vapor de sodio de alta presión Contour 400 W.

RECOMENDACIONES

1. Definir un diseño de alumbrado eficiente y con una distribución de luz uniforme, colocando las luminarias de forma que su separación tenga relación respecto a las otras según lo establecido en la normativa mexicana NOM 001 SEDE 2012 Subestaciones, constatando su uniformidad mediante el uso del método de la cuadrícula.
2. Realizar estudios lumínicos previos en instalaciones que se desee actualizar el alumbrado para observar las deficiencias de la iluminación y así proponer mejoras que cumplan los requisitos mínimos de iluminación que presenta la normativa mexicana NOM 001 SEDE 2012 Subestaciones.
3. Seleccionar la luminaria adecuada en base al tipo de trabajo que se desarrollara en la instalación para aprovechar de esta manera todo su energía y obtener un sistema eficiente.
4. Utilizar el software de iluminación DIALux EVO 8.1 para realizar diseños de iluminación de tipo exterior precisos y eficientes, dado que a diferencia de Calculux 7.7 otro programa de diseño de iluminación gratuito, DIALux permite importar archivos externos del tipo DWG, con una interfaz de trabajo tridimensional mientras que su competidor no.
5. Realizar análisis de consumo energético entre las luminarias seleccionadas para observar si existe alguna mejora y un análisis

financiero para determinar si es económicamente viable su utilización en el proyecto.

BIBLIOGRAFÍA

1. Agencia Valenciana de la Energía. *Guía de ahorro y eficiencia energética en establecimientos hoteleros de la comunidad Valenciana*. [en línea]. <https://www.miteco.gob.es/es/cambio-climatico/planes-y-estrategias/GuiaEficienciaHoteles_CV_tcm30-70383.pdf>. [Consulta: 10 de septiembre de 2020].
2. Asociación de Higienista de la República de Argentina (AHRA). *Mediciones de iluminación por el método de la cuadrícula*. [en línea]. <<https://cie.gov.ar/web/images/Metodo-cuadrícula-HyST.pdf>>. [Consulta: 7 de enero de 2021].
3. BAUTISTA, Leandro. *Ley de Snell. Prisma óptico. Longitud de onda. Arco iris*. [en línea]. <<https://www.fisicanet.com.ar/fisica/ondas/ap12-dispersion-de-la-luz.php>>. [Consulta: 26 de febrero de 2020].
4. Biografía de Thomas Alva Edison. *Biografías y Vidas*. [en línea]. <<https://www.biografiasyvidas.com/biografia/e/edison.htm>>. [Consulta: 14 de abril de 2020].
5. BRATU, Neagu; CAMPERO, Eduardo. *Instalaciones eléctricas conceptos básico y diseño*. 2a ed. México: Editorial Alfaomega 1995. 227 p.

6. CANDIA, Sebastián. *Reflexión especular y difusa*. [en línea]. <<http://fisica1m.blogspot.com/2009/08/reflexion-especular.html>>. [Consulta: 4 de marzo de 2020].
7. CASTILLA CABANES, Nuria. *Criterio de elección de luminarias*. [en línea]. <<https://cie.gov.ar/web/images/Metodo-cuadrícula-HyST.pdf>>. [Consulta: 11 de abril de 2020].
8. CASTRO, Andrés. *Método para la determinación del factor de reflexión in situ de superficies*. [en línea]. <http://opac.pucv.cl/pucv_txt/txt-6000/UCC6141_01.pdf>. [Consulta: 2 de junio de 2020].
9. CAVANILLAS, Belen. *Análisis sobre iluminación led industrial, intentando arrojar alguna luz sobre los led industriales*. [en línea]. <<https://smart-lighting.es/analisis-sobre-iluminacion-led-industrial-intentando-arrojar-alguna-luz-sobre-los-led-industriales/>>. [Consulta: 14 de mayo de 2020].
10. CELLAI, Gianfranco. *Fondamenti di illuminotecnica*. [en línea]. <http://web.taed.unifi.it/fisica_tecnica/Scieurpi/illuminotecnica.pdf>. [Consulta: 28 de mayo de 2020].
11. Clases iluminación. *Método cavidad zonal*. [en línea]. <<https://clasesiluminacion.files.wordpress.com/2015/06/clases-iluminacion-metodo-cavidad-zonal.pdf>>. [Consulta: 7 de junio de 2020].

12. Comisión Federal de Electricidad (CFE). *Diseño de sistemas de alumbrado para centrales hidroeléctricas*. [en línea]. <<https://lapem.cfe.gob.mx/normas/pdfs/f/00F20-44.pdf>>. [Consulta: 4 de abril de 2020].
13. Comisión Internacional Electrotécnica (IEC). *Grados de protección proporcionados por los envoltentes (Código IP)*. [en línea]. <file:///C:/Users/erick/Downloads/EXT_zlnKE8zsjKkFxfOUavdW.pdf>. [Consulta: 17 de mayo de 2020].
14. Comisión Nacional de Energía Eléctrica (CNEE). *Alumbrado público en Guatemala. Alternativas para el ahorro y la eficiencia energética*. [en línea]. <<https://cie.gov.ar/web/images/Metodo-cuadrícula-HyST.pdf>>. [Consulta: 15 de marzo de 2021].
15. CURSO LUMINOTECNIA. *Como reemplazar luminarias de vapor de sodio por luminarias led*. [en línea]. <<http://iluminica.com/como-reemplazar-luminarias-de-vapor-de-sodio-por-luminarias-led/#:~:text=La%20eficiencia%20de%20las%20luminarias,y%20en%20consumo%20de%20energ%C3%ADa>>. [Consulta: 18 de septiembre de 2020].
16. DECO, Fernando. *La utilidad de las curvas fotométricas*. [en línea]. <https://www.editores-srl.com.ar/sites/default/files/lu139_deco_curvas_fotometricas.pdf>. [Consulta: 28 de mayo de 2020].
17. DIALUX. *DIALux es el estándar mundial en software de diseño de iluminación*. [en línea]. <<https://www.dialux.com/es-ES/>>. [Consulta: 21 de agosto de 2020].

18. ESPINOSA TINOCO, Mildred Penélope. *Propuesta de un laboratorio para pruebas fotométricas a luminarias led*. México: Universidad Universitaria Autónoma de México, 2013. 83 p.
19. Fisicalab. *Dispersión de la luz*. [en línea]. <<https://www.fisicalab.com/apartado/dispersion-luz>>. [Consulta: 4 de marzo de 2020].
20. FONTAL, Bernardo. *El espectro electromagnético y sus aplicaciones*. 1a ed. Venezuela: Escuela Venezolana para la Enseñanza de la Química, 2005. 151 p.
21. Fuente de luz y equipos auxiliares. *Lámparas incandescentes*. [en línea]. <<https://grlum.dpe.upc.edu/manual/sistemasIluminacion-fuentesDeLuz-LamparasIncandescentes.php>>. [Consulta: 20 de abril de 2020].
22. GRANERO, Andrés. *Maniobras en Instalaciones de alta tensión*. [en línea]. <<https://imseingenieria.blogspot.com/>>. [Consulta: 19 de noviembre de 2019].
23. HELLA TECH. *Faros led*. [en línea]. <<https://www.hella.com/techworld/es/Informacion-Tecnica/Iluminacion/Faros-led-833/>>. [Consulta: 13 de mayo de 2020].
24. IEC. *Grados de protección proporcionados por envolturas (Código IP)*. [en línea]. <<https://idoc.pub/documents/iec-60529-ip-en-espaol-on23dxddgj10>>. [Consulta: 20 de mayo de 2020].

25. INALTEN. *Elecnor finaliza la instalación de los equipos de iluminación exterior SE Cambutas 220kV*. [en línea]. <<https://www.inalten.com/2016/09/30/elecnor-finaliza-la-instalacion-de-los-equipos-de-iluminacion-se-cambutas-220kv>>. [Consulta: 22 de agosto de 2020].
26. Instalaciones Industriales. *Lámparas y sus componentes*. [en línea]. <http://www.profesores.frc.utn.edu.ar/industrial/InstalacionesIndustriales/Art_Interes/LampComp.pdf>. [Consulta: 16 de abril de 2020].
27. JIMÉNEZ, Erick. *Actualización del sistema eléctrico e iluminación en las torres del estadio olímpico universitario*. [en línea]. <<http://www.ptolomeo.unam.mx:8080/xmlui/bitstream/handle/132.248.52.100/286/A7.pdf?sequence=7>>. [Consulta: 1 de agosto de 2020].
28. La Vanguardia. *La bombilla de Edison*. [en línea]. <https://nanopdf.com/download/ia-bombilla-de-edison_pdf>. [Consulta: 15 de abril de 2020].
29. Lithonia Lighting. *Visor fotométrico*. [en línea]. <<https://www.visual3d.com/tools/PhotometricViewer/Default.aspx?ID=13675>>. [Consulta: 8 de enero de 2021].
30. LUMINOTECNIA. *Manual práctico de INDALUX*. [en línea]. <<https://es.slideshare.net/franksalinasg/08-lamparas>>. [Consulta: 9 de mayo de 2020].

31. MARIN, Pau. *Qué es el índice UGR Y cómo puede mejorar la iluminación en espacios laborales*. [en línea]. <<https://www.iluminet.com/indice-deslumbramiento-ugr/>>. [Consulta: 24 de marzo de 2020].
32. Norma Europea UNE-EN 12464-1:2003. *Iluminación de los lugares de trabajo. Tabla 5.6 Establecimientos educativos*. [en línea]. <https://enerfigente.files.wordpress.com/2015/08/une-en_12464-12003.pdf>. [Consulta: 2 de mayo de 2020].
33. Normas Técnicas de Diseño y Operación de las Instalaciones de Distribución (NTDOID). *Subestaciones*. [en línea]. <<https://www.cnee.gob.gt/pdf/resoluciones/1999/47-99.pdf>>. [Consulta: 15 de mayo de 2020].
34. Normativa Oficial Mexicana (NOM) 001-SEDE-2012. *Instalaciones eléctricas (utilización). Artículo 924 Subestaciones*. [en línea]. <<http://www.issste-cmn20n.gob.mx/Datos/Normas/136NOM.pdf>>. [Consulta: 17 de octubre de 2020].
35. PHILIPS. *Luminarias de exterior*. [en línea]. <https://www.lighting.philips.es/prof/luminarias-de-exterior#pfpath=0-OCOUTD_GR>. [Consulta: 14 de abril de 2020].
36. RAMOS, Sergi. *Cálculo luminotécnico alumbrado público de una calle en zona urbana*. [en línea]. <<http://deeea.urv.cat/public/PROPOSTES/pub/pdf/2394pub.pdf>>. [Consulta: 28 de mayo de 2020].
37. RODRIGUEZ, Julio. *El Proyecto de Iluminación. Instalaciones Eléctricas: proyectos residenciales e industriales*. [en línea].

<<https://librostrillas.blogspot.com/2017/05/instalaciones-electricas-proyectos.html?m=1>>. [Consulta: 6 de junio de 2020].

38. SANZ, José Luis; TOLEDANO, José Carlos. *Técnicas y procesos en las instalaciones eléctricas en media y baja tensión*. [en línea]. <<https://www.paraninfo.es/catalogo/9788497326636/tecnicas-y-procesos-en-las-instalaciones-electricas-en-media-y-baja-tension>>. [Consulta: 30 de mayo de 2020].
39. Superintendencia de Riesgos del Trabajo (SRT). *La iluminación en el ambiente laboral*. [en línea]. <https://www.srt.gob.ar/wp-content/uploads/2016/08/Guia_practica_1_Iluminacion_2016.pdf>. [Consulta: 17 de octubre de 2020].
40. VELOSO, Cristian. *Ley de Snell-Reflexión y Refracción*. [en línea]. <<https://www.electrontools.com/Home/WP/2018/03/19/ley-de-snell-reflexion-y-refraccion/>>. [Consulta: 19 de febrero de 2020].

APÉNDICES

Apéndice 1. Mediciones de iluminancia Área 230kV



Fuente: elaboración propia, utilizando luxómetro STEREN HER410.

Apéndice 2. **Mediciones de iluminancia Área de Transformadores**



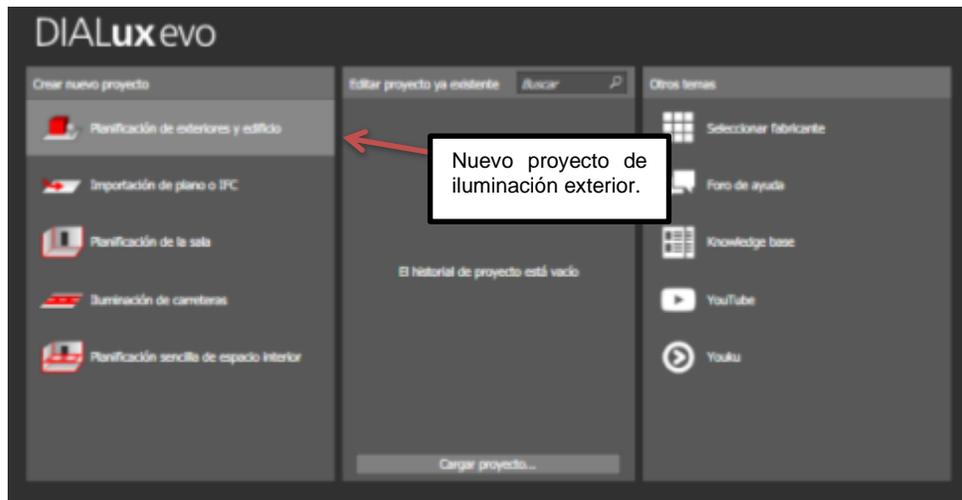
Fuente: elaboración propia, utilizando luxómetro STEREN HER410.

Apéndice 3. **Mediciones de iluminancia Área 69kV**



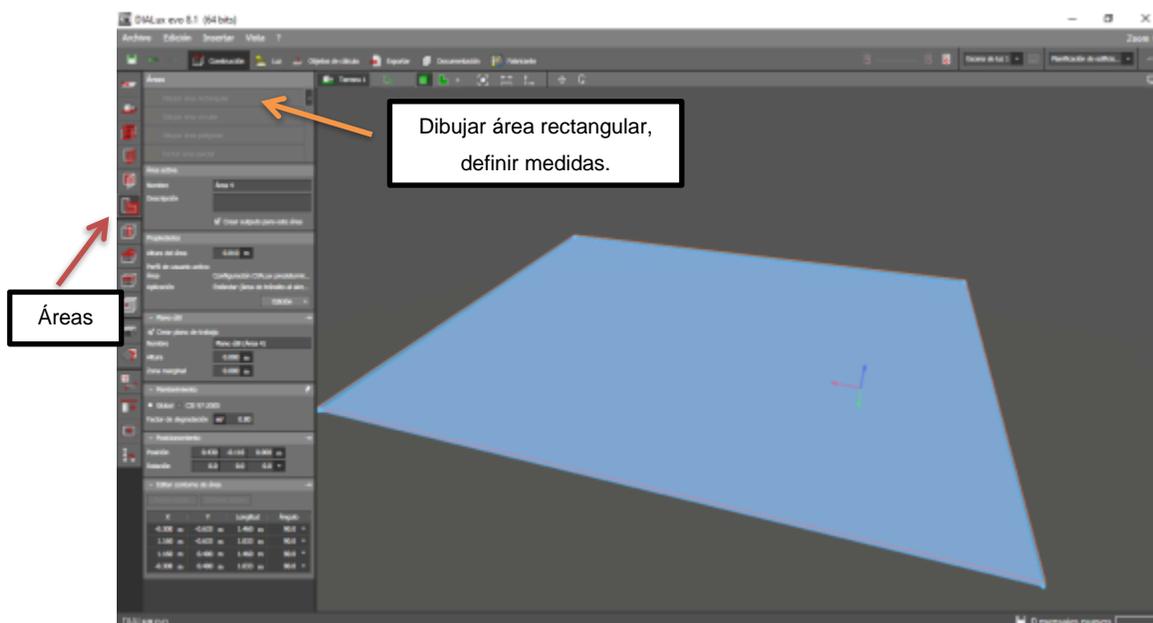
Fuente: elaboración propia, utilizando luxómetro STEREN HER410.

Apéndice 4. Pasos para crear proyecto de iluminación para exteriores



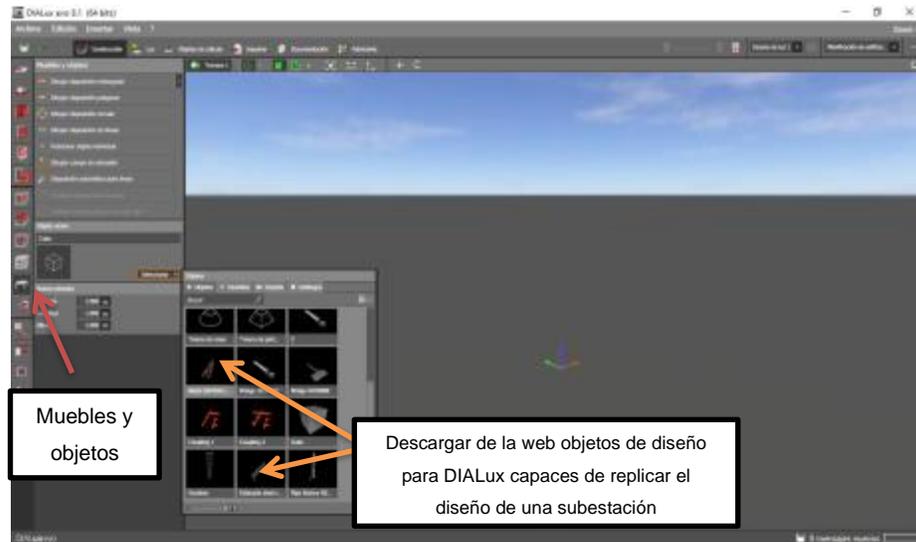
Fuente: elaboración propia, utilizando DIALux EVO 8.1.

Apéndice 5. Elaboración del plano de trabajo horizontal



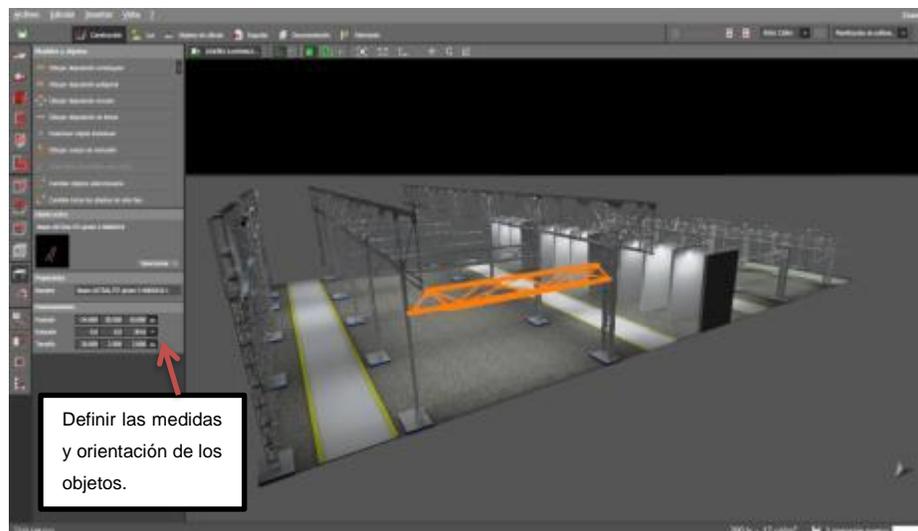
Fuente: elaboración propia, utilizando DIALux EVO 8.1.

Apéndice 6. Selección de objetos para realizar el diseño de subestación



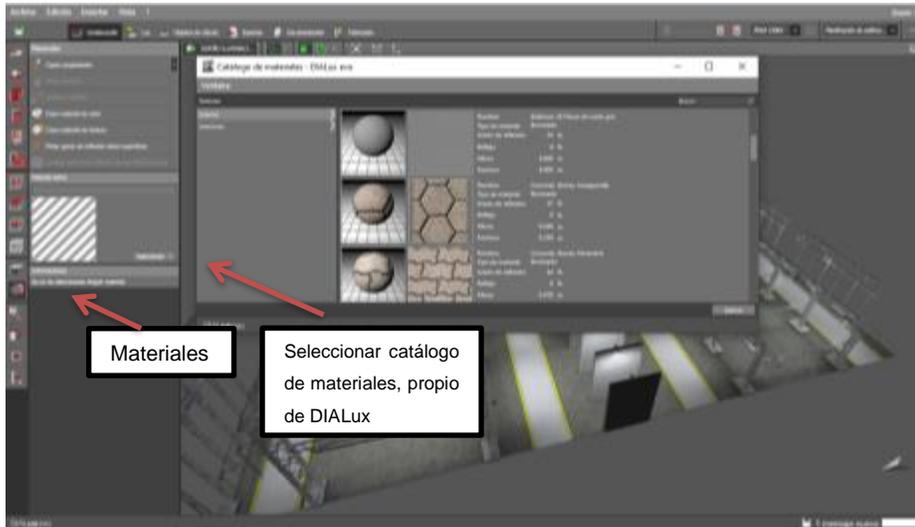
Fuente: elaboración propia, utilizando DIALux EVO 8.1.

Apéndice 7. Agrupar los objetos con las medidas requeridas



Fuente: elaboración propia, utilizando DIALux EVO 8.1.

Apéndice 8. Textura para objetos



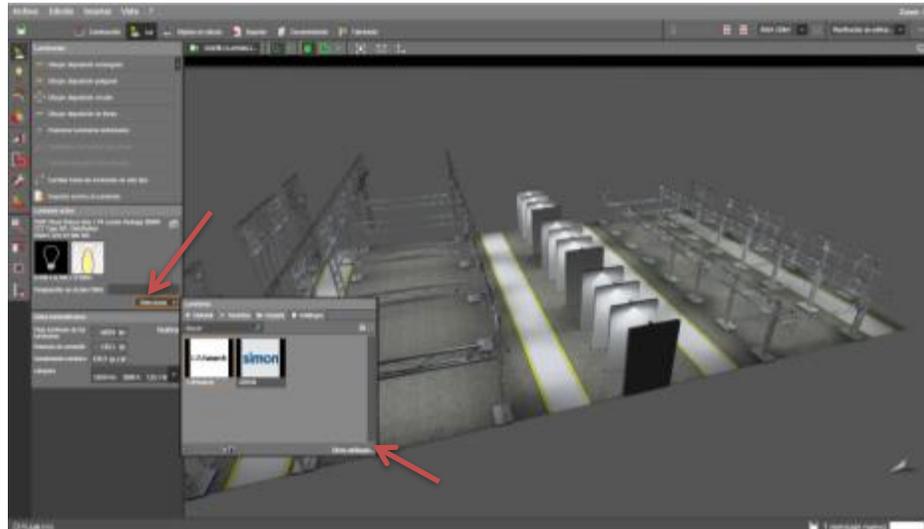
Fuente: elaboración propia, utilizando DIALux EVO 8.1.

Apéndice 9. Opción luz para selección de luminarias



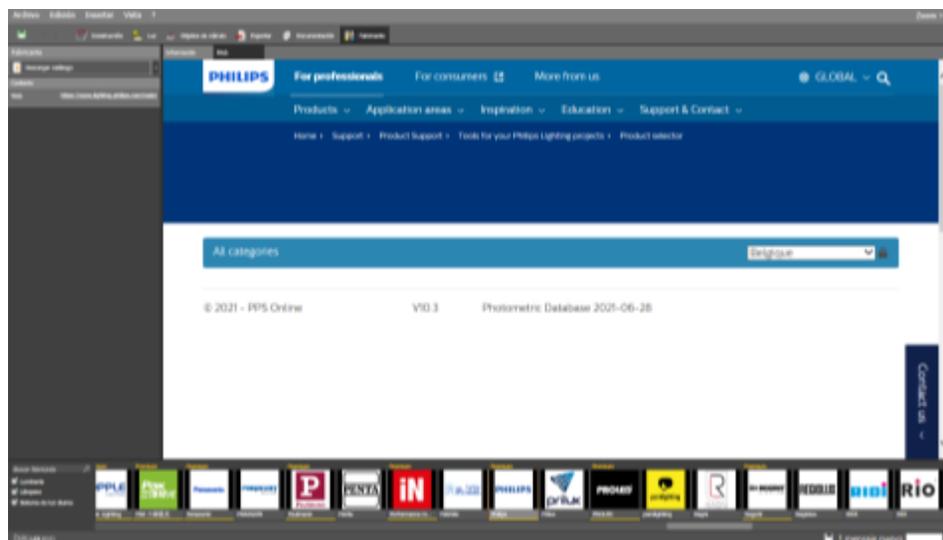
Fuente: elaboración propia, utilizando DIALux EVO 8.1.

Apéndice 10. Selección luminarias predeterminadas en DIALux



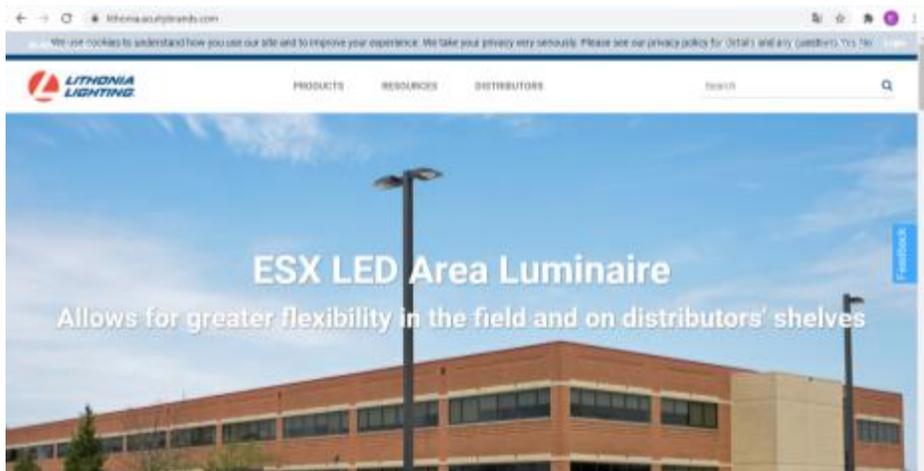
Fuente: elaboración propia, utilizando DIALux EVO 8.1.

Apéndice 11. Luminarias con fotometría disponible para DIALux



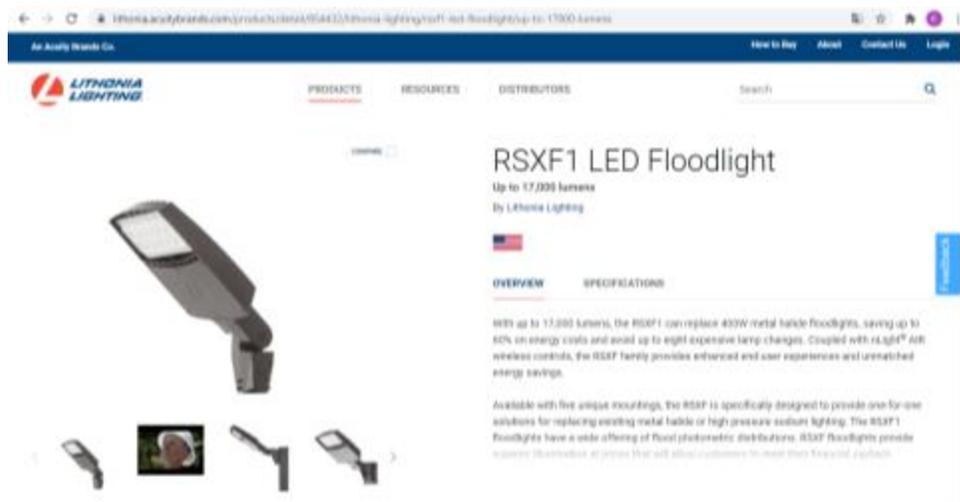
Fuente: elaboración propia, utilizando DIALux EVO 8.1.

Apéndice 12. **Luminarias Lithonia Lighting sitio web con fotometría disponible para DIALux**



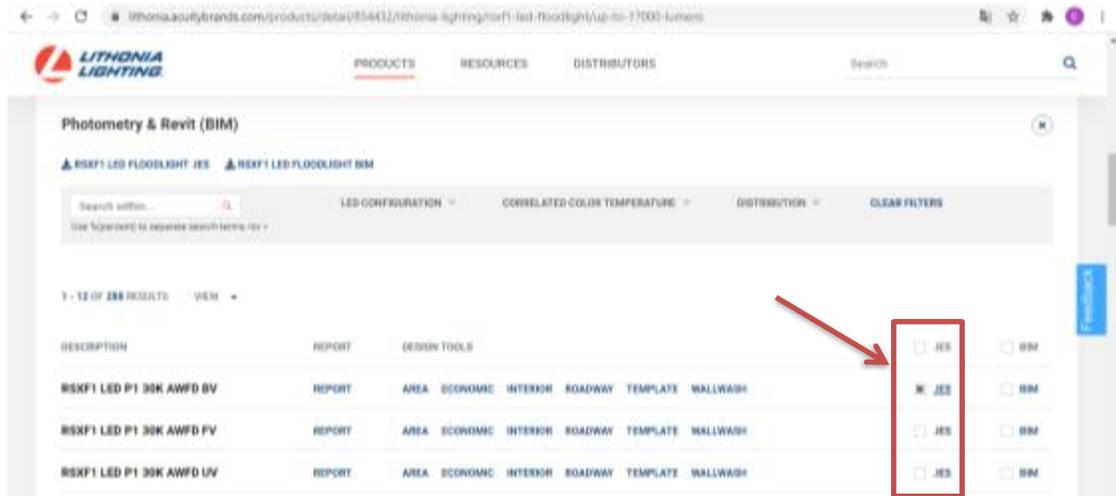
Fuente: elaboración propia, utilizando sitio web Lithonia Lighting.

Apéndice 13. **Luminaria del tipo RSXF1 led empleada en el diseño de subestación capítulo 5**



Fuente: elaboración propia, utilizando sitio web Lithonia Lighting.

Apéndice 14. Ubicación de archivo .IES de fotometría para DIALux



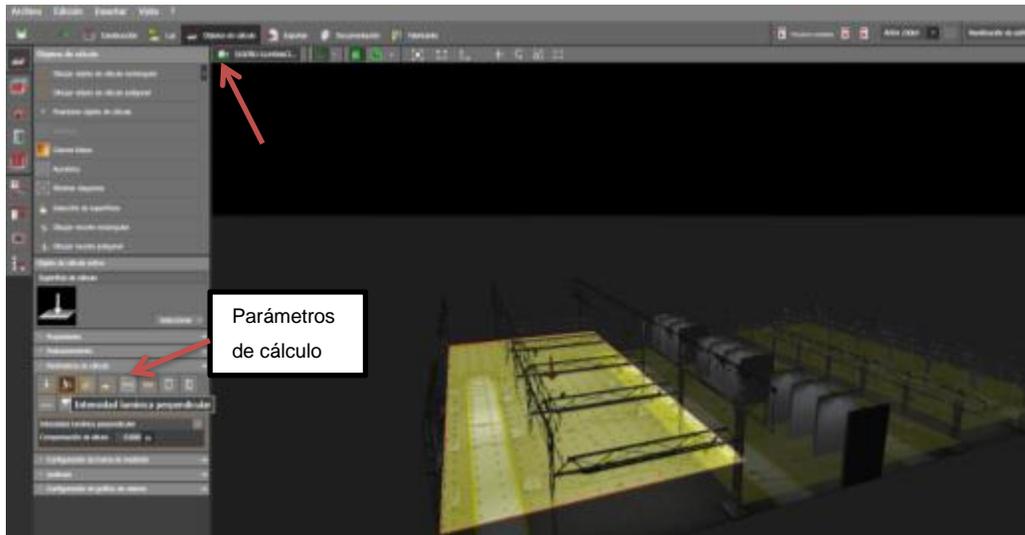
Fuente: elaboración propia, utilizando sitio web Lithonia Lighting.

Apéndice 15. Selección de luminaria con parámetros de fotometría dados por fábrica en DIALux



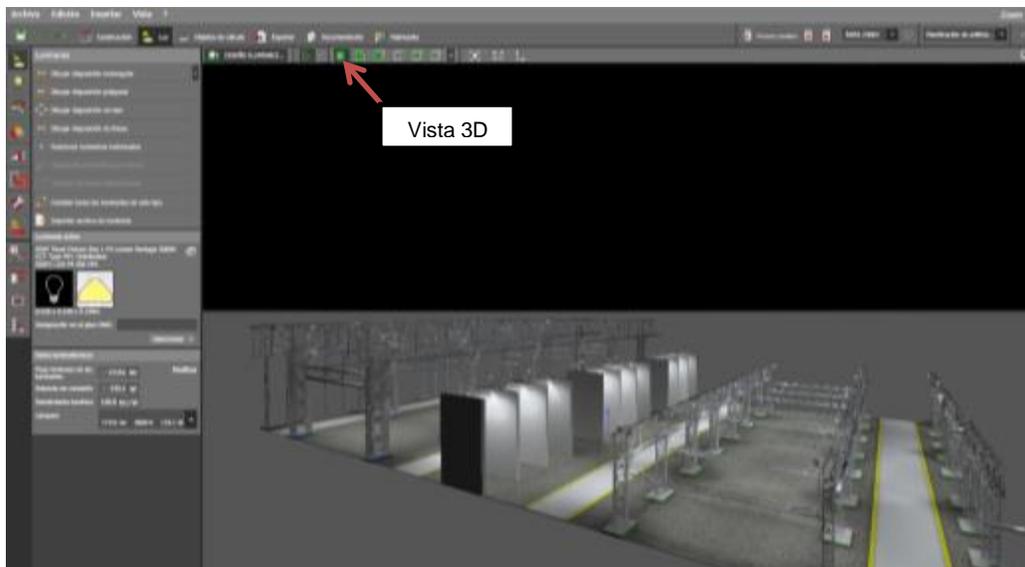
Fuente: elaboración propia, utilizando DIALux.

Apéndice 16. Selección de objeto de cálculo para medición



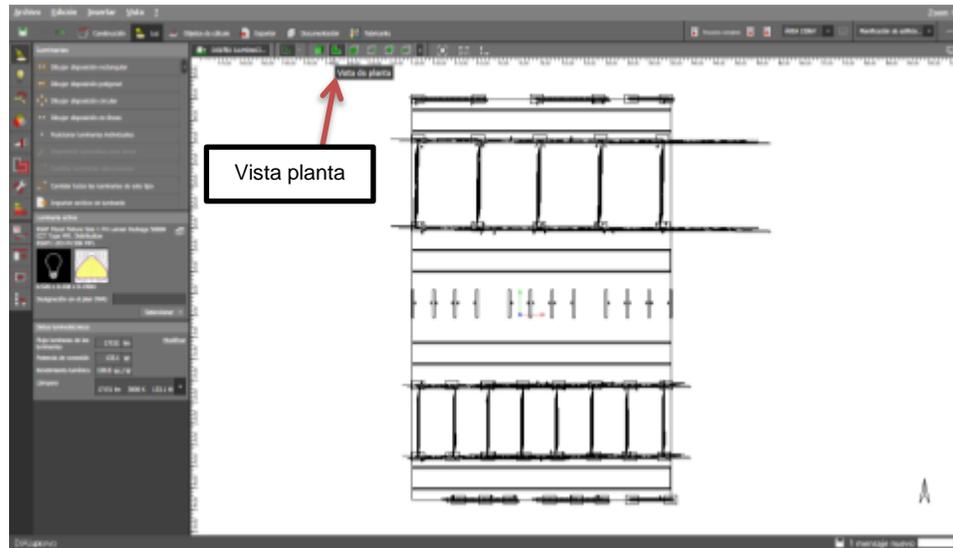
Fuente: elaboración propia, utilizando DIALux.

Apéndice 17. Selección de vista 3D



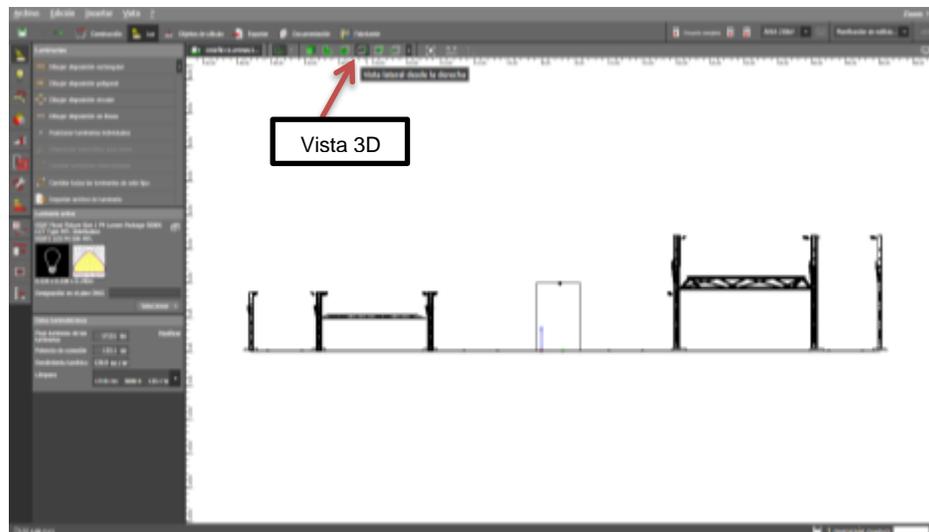
Fuente: elaboración propia, utilizando DIALux.

Apéndice 18. Selección de vista planta



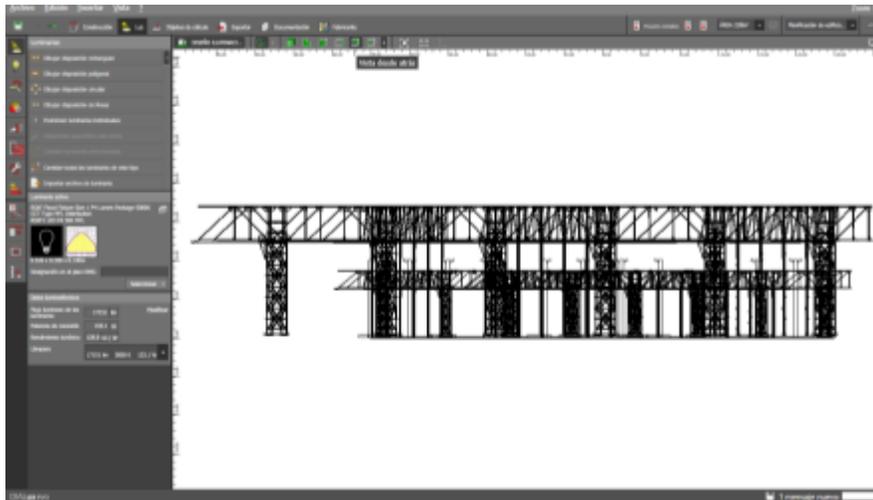
Fuente: elaboración propia, utilizando DIALux.

Apéndice 19. Selección de vista de alzado



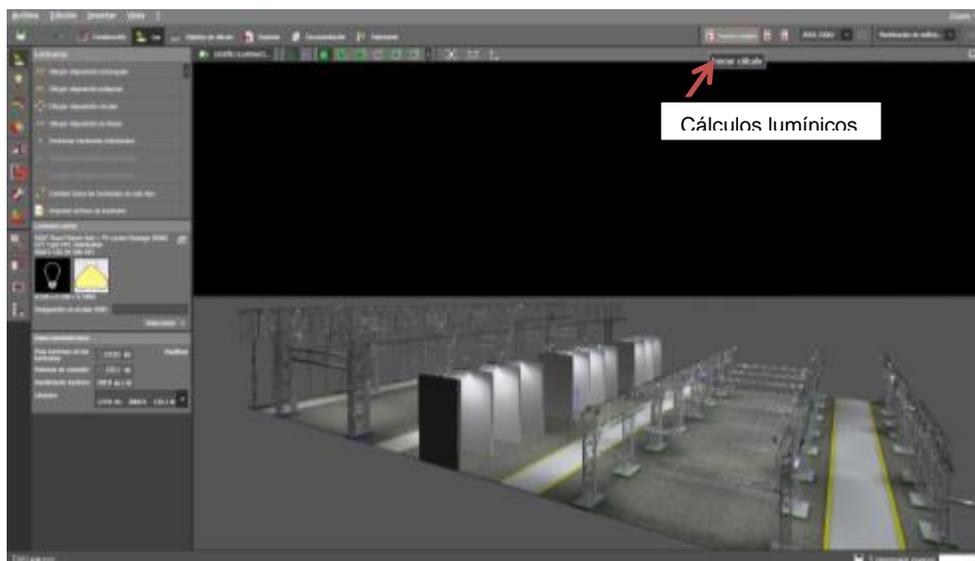
Fuente: elaboración propia, utilizando DIALux.

Apéndice 20. Selección de vista lateral izquierda



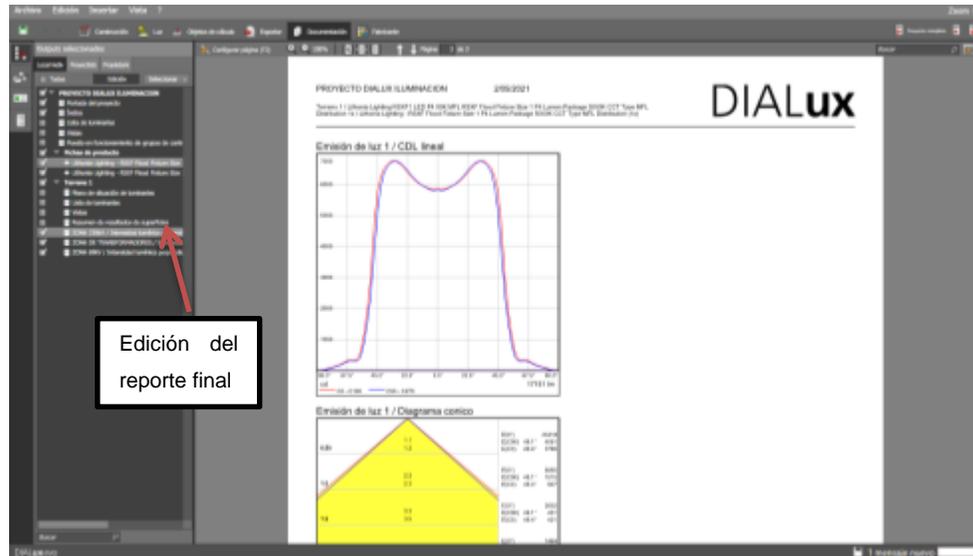
Fuente: elaboración propia, utilizando DIALux.

Apéndice 21. Inicio de cálculos lumínicos



Fuente: elaboración propia, utilizando DIALux.

Apéndice 22. Reporte de resultados DIALux



Fuente: elaboración propia, utilizando DIALux.

ANEXOS

Anexo 1. Normas de fabricación y pruebas de luminarias

NTC	900	Reglas generales y especificaciones para el alumbrado público
NTC	1000	Sistema Internacional de Unidades.
NTC	1156	Productos metálicos y recubrimientos. Ensayos cámara salina.
NTC	2230	Luminarias parte 1. Requisitos generales y ensayos
NTC	2470	Dispositivos de fotocontrol intercambiables para iluminación pública.
NTC	3279	Grados de protección dado por encerramiento de equipo eléctrico [Grados IP]
NTC	3547	Electrotecnia. Controles para sistemas de iluminación exterior.
NTC	ISO 2859-1	Procedimientos de muestreo para inspección por atributos. Parte 1: Planes de muestreo determinados por el nivel aceptable de calidad para inspección lote a lote.
NTC	2050	Código Eléctrico Nacional (conexiones internas).
IEC	60529	Degree of protection by enclosures [IP Code]
IEC	60598 1-2-3	Luminaries for road and street lighting. Particular requirements.
IEC	61347-1	Lamp controlgear - Part 1: General and safety requirements.
IEC	60929	Annex E Control Interface for controllable ballasts.
IEC	1931	Standard colorimetric system
IEC	31 - 1976	Glare and uniformity in road lighting instalations – 1976
IEC	115 - 1995	Recommendations for the lighting of roads for motor and pedestrian traffic
IEC	136 - 2000	Guide to the lighting of urban areas
IEC	140 - 2000	Métodos de cálculo para la iluminación de carreteras
ANSI	C 136-10	For physical and electrical interchangeability of photocontrol devices, plugs, and mating receptacles used in roadway lighting equipment
EN	50102	Grados de protección proporcionados por las envolventes de materiales eléctricos contra los impactos mecánicos externos (código IK)
ANSI	C136.41-2013	Roadway and Area Lighthing Equipment-Dimming Control Between an External Locking Type Photocontrol and Ballast or Driver
EN	61347-1	General and Safety Requirements. (Driver)
EN	61347-2-13	Particular Requirements for DC or AC Supplied Electronic Control Gear for LED Modules.
EN	62348	DC or AC Supplied Electronic Control Gear for LED Modules.
EN	55015: 2006 and 2007	Limits and methods of radio disturbance characteristics of electrical lighting.
EN	61547:1995 /+A1:2000	Equipment for general lighting purpose EMC immunity requirements
EN	61000-3-2:2006	Limitation of harmonic current emission.
EN	61000-3-3:2008	Limitation of voltage fluctuation and flicker.
IES	LM 80-08	Approved Method Measuring Lumen Maintenance of LED light
IES	TM 21	Projecting Long term Lumen Maintenance of LED Lighth Source

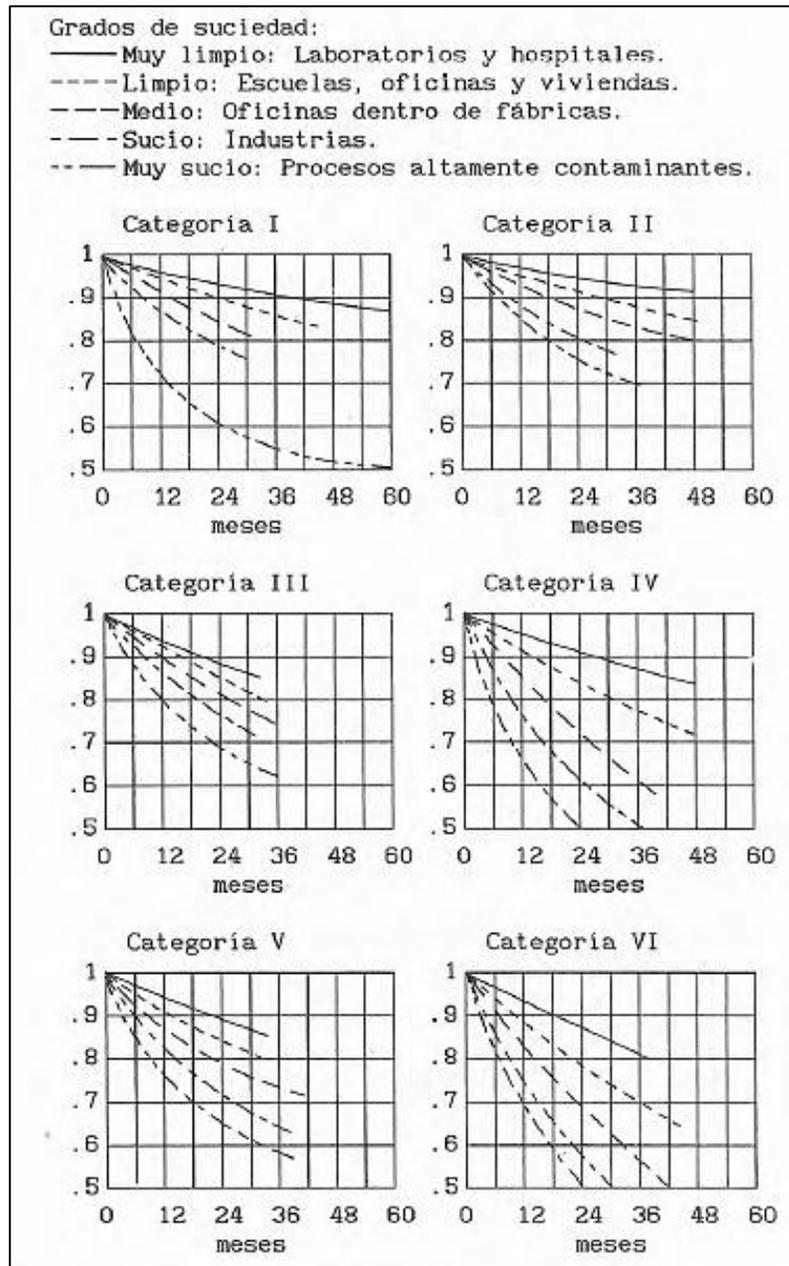
Fuente: Likinormas. Normas de fabricación y pruebas. https://likinormas.micodensa.com/Espesificacion/materiales_ap/et8081_luminaria_led_simplificada. Consulta: 16 de mayo de 2020.

Anexo 2. **Comparativa del IRC de distintas luminarias**

Tipo lámpara	IRC
Incandescentes	100
Halógenas	100
Fluorescentes	65-85
Bajo consumo	15-85
Vapor de sodio baja presión	0
Vapor de sodio alta presión	0-70
Vapor de mercurio	25-60
Halogenuro metálico	65-93
Inducción	79
LED	60-90

Fuente: Meetthings. *Que es el IRC o CRI*. <https://meetthings.com/blog/index.php/07-05-2014/que-es-el-irc-o-cri/>. Consulta: 6 de mayo de 2020.

Anexo 3. **Grados de suciedad instalaciones eléctricas conceptos básicos y diseño**



Fuente: BRATU, Neagu; CAMPERO, Eduardo. *Instalaciones Eléctricas Conceptos Básicos y Diseño*. p. 32.

Anexo 4. Instalación - Página de descarga sitio oficial DIALux EVO



Fuente: DIALux. *Descargar e instalar DIALux*. <https://es.linkedin.com/pulse/descargar-e-instalar-dialux-evo-8-julio-fragoso>. Consulta: 11 de julio de 2021.

Anexo 5. Descarga automática del software DIALux EVO



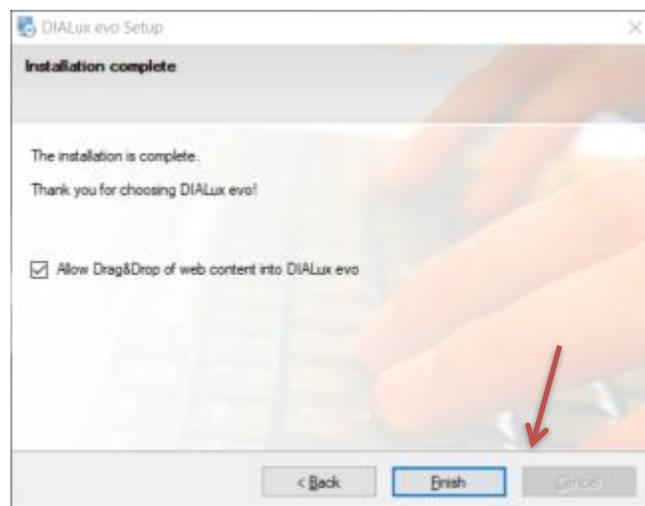
Fuente: DIALux. *Descargar e instalar DIALux*. <https://es.linkedin.com/pulse/descargar-e-instalar-dialux-evo-8-julio-fragoso>. Consulta: 11 de julio de 2021.

Anexo 6. Ventana principal de instalación DIALux EVO



Fuente: DIALux. *Descargar e instalar DIALux*. <https://es.linkedin.com/pulse/descargar-e-instalar-dialux-evo-8-julio-fragoso>. Consulta: 11 de julio de 2021.

Anexo 7. Finalización de la instalación DIALux EVO



Fuente: DIALux. *Descargar e instalar DIALux*. <https://es.linkedin.com/pulse/descargar-e-instalar-dialux-evo-8-julio-fragoso>. Consulta: 11 de julio de 2021.

Anexo 8. Encuesta de inicio DIALux EVO



Fuente: DIALux. *Descargar e instalar DIALux*. <https://es.linkedin.com/pulse/descargar-e-instalar-dialux-evo-8-julio-fragoso>. Consulta: 11 de julio de 2021.

Anexo 9. Interfaz de trabajo de DIALux



Fuente: DIALux. *Descargar e instalar DIALux*. <https://es.linkedin.com/pulse/descargar-e-instalar-dialux-evo-8-julio-fragoso>. Consulta: 11 de julio de 2021.