

Universidad Nacional de Ingeniería

Facultad de Ingeniería Mecánica



Tesis

**Optimización Energética del Sistema de Alumbrado Público en el
Campus Universidad Nacional de Ingeniería basado en Criterios de
Visión Mesópica**

Para obtener el Título Profesional de Ingeniero Mecánico Electricista

Elaborado por

Zedrix Augusto Quispe Carrillo

 [0009-0006-5556-8703](https://orcid.org/0009-0006-5556-8703)

Asesor

Msc. Ing. Edgard Guadalupe Goñas

 [0000-0002-2144-6058](https://orcid.org/0000-0002-2144-6058)

Lima – Perú

2025

Citar/How to cite	(Quispe, 2025)
Referencia/Reference	Quispe, Z. (2025). <i>Optimización Energética del Sistema de Alumbrado Público en el Campus Universidad Nacional de Ingeniería basado en Criterios de Visión Mesópica</i> . [Tesis, Universidad Nacional de Ingeniería]. Repositorio institucional Cybertesis UNI.
Estilo/Style: APA (7ma ed.)	

Dedicatoria

Dedicado a mis padres, Carlos y Elizabeth; mis hermanos, mi pareja y toda mi familia. Este es el fruto de nuestro esfuerzo. Nuestros sueños e ilusiones se están haciendo realidad.

Agradecimientos

Quiero agradecer a mi gran familia, a quienes amo y admiro; a mis queridos amigos que acompañaron este proceso, a mis mentores y asesores, y de manera especial a todos los miembros del grupo de investigación que aportaron en sobremanera a que esta tesis sea una realidad.

Resumen

La presente investigación evalúa el impacto de la aplicación de criterios de visión mesópica en el diseño de sistemas de alumbrado público en entornos urbanos, específicamente en el campus universitario de la Universidad Nacional de Ingeniería. El estudio parte del reconocimiento de que los sistemas tradicionales, basados en tecnologías como vapor de sodio o halogenuros metálicos, presentan limitaciones tanto en eficiencia energética como en la adecuación a la fisiología visual en condiciones nocturnas. Se propuso un rediseño luminotécnico sustentado en criterios de visión mesópica, utilizando luminarias LED acondicionadas específicamente para optimizar la percepción visual en condiciones de baja iluminancia. La metodología combinó mediciones de campo, simulaciones computacionales y análisis comparativo de parámetros luminotécnicos entre sistemas tradicionales y el sistema propuesto. Los resultados evidencian una reducción significativa en el consumo energético mensual, así como un incremento considerable en la eficacia luminosa mesópica. Además, el nuevo diseño cumple con los requisitos normativos de iluminancia media, uniformidad y limitación del deslumbramiento establecidos por la normativa EN 13201 y la Norma DGE - "Alumbrado de Vías y Espacios Públicos". Esta normativa europea establece criterios técnicos rigurosos para asegurar un rendimiento visual adecuado y eficiente en condiciones reales de circulación. Se concluye que el enfoque mesópico no solo representa una alternativa técnicamente viable, sino que permite avanzar hacia sistemas de iluminación pública más sostenibles, eficientes y adaptados a la realidad visual del entorno nocturno urbano.

Palabras clave: Visión mesópica, eficiencia energética, alumbrado público, sostenibilidad urbana, diseño luminotécnico, calidad visual.

Abstract

This research evaluates the impact of applying mesopic vision criteria in the design of public lighting systems in urban environments, with a case study focused on the campus of the National University of Engineering. The study addresses the limitations of conventional lighting systems, such as sodium vapor and metal halide lamps, which often fail to optimize energy efficiency and visual perception under nighttime conditions. A new lighting design was proposed based on mesopic vision parameters, using LED luminaires specifically adapted to improve visibility under low-light environments. The methodology involved field measurements, lighting simulations, and comparative analysis of key photometric parameters between traditional technologies and the proposed system. The findings demonstrate a significant reduction in monthly energy consumption and a notable increase in mesopic luminous efficacy. Furthermore, the new system complies with the required standards of average illuminance, uniformity, and glare control, according to EN 13201 and DGE Public Lighting Standard [Lighting of Roads and Public Spaces]. This European standard sets rigorous technical criteria to ensure proper visual performance and energy efficiency under real circulation conditions. It is concluded that mesopic-based lighting design offers a technically sound and sustainable alternative, enhancing the performance and adaptability of public lighting in modern urban contexts.

Key words: Mesopic vision, energy efficiency, street lighting, urban sustainability, lighting design, visual quality.

Tabla de Contenido

Resumen.....	v
Abstract.....	vi
Introducción.....	xv
CAPÍTULO I. Generalidades.....	1
1.1. Antecedentes de la Investigación.....	1
1.2. Identificación y Descripción del Problema de Estudio	5
1.3. Formulación del Problema	6
1.3.1. Problema General.....	6
1.3.2. Problemas Específicos	6
1.4. Justificación e Importancia	6
1.5. Objetivos.....	8
1.5.1. Objetivo General.....	8
1.5.2. Objetivos Específicos	8
1.6. Hipótesis	9
1.6.1. Hipótesis General	9
1.6.2. Hipótesis Específicas.....	9
1.7. Variables y Operacionalización de Variables	9
1.8. Metodología de la Investigación.....	11
1.8.1. Unidad de Análisis	11
1.8.2. Tipo, enfoque, nivel y diseño de investigación	11

1.8.3.	Fuentes de Información	12
1.8.4.	Población y Muestra	12
1.8.5.	Técnicas e Instrumentos de recolección de Datos	13
1.8.6.	Análisis y Procesamiento de Datos.....	14
CAPÍTULO II. Marco Teórico y Marco Conceptual		15
2.1.	Marco Teórico	15
2.1.1.	Conceptos de Visión Humana.....	15
2.1.2.	Fundamentos Teóricos de la Luz	25
2.1.3.	Visión Mesópica.....	29
2.1.4.	Tecnologías de Alumbrado Público	31
2.1.5.	Normativas y Estándares.....	35
2.1.6.	Visión Mesópica y su Importancia en el Alumbrado Público.....	37
2.1.7.	Sistemas de Alumbrado Público y Criterios de Diseño.....	38
2.1.8.	Eficiencia Energética y Alumbrado Público	38
2.1.9.	Aplicación en Zonas Urbanas	39
2.2.	Marco Conceptual.....	41
CAPÍTULO III. Desarrollo del Trabajo de Investigación.....		46
3.1.	Revisión del estado situacional del diseño de Alumbrado Público Actual	46
3.1.1.	Norma Técnica Vigente	46
3.2.	Trabajo de Campo y Recolección de Datos	48
3.2.1.	Selección de puntos de medición	48

3.2.2.	Medición de Iluminancia	50
3.2.3.	Tabulación de Datos	52
3.3.	Desarrollo en Laboratorio	55
3.3.1.	Construcción del banco de pruebas.....	55
3.3.2.	Pruebas de iluminancia.....	57
3.3.3.	Reducción progresiva de voltaje	62
3.4.	Análisis de Datos	71
3.4.1.	Análisis estadístico	71
3.4.2.	Análisis Comparativo de Normativas Nacionales e Internacionales	74
3.4.3.	Situación real versus Estándares Nacionales e Internacionales	78
3.5.	Diseño del Sistema con Parámetros según Criterios de Visión Mesópica	79
3.5.1.	Evaluación del consumo energético.....	84
CAPÍTULO IV. Resultados, Contrastación de Hipótesis y Discusión de Resultados .87		
4.1.	Resultados	87
4.1.1.	Resultados de eficiencia energética.....	92
4.1.2.	Resultados de calidad visual	94
4.2.	Discusión de Resultados.....	95
4.3.	Contraste de Hipótesis.....	97
CONCLUSIONES.....		99
RECOMENDACIONES		101
Referencias		103

Anexos 107

Índice de Figuras

Figura 1 El ojo humano y sus principales componentes _____	15
Figura 2 Descripción de la conformación del ojo en sus diferentes capas _____	16
Figura 3 Imagen histológica de la córnea normal (200x) con sus capas _____	17
Figura 4 Perfil con los Principales Componentes de la Túnica Vasculat _____	18
Figura 5 Foto-receptores de la retina: conos y bastones _____	19
Figura 6 Fóvea y distribución de conos y bastones _____	20
Figura 7 Sensibilidad de los Conos y Bastones en Función de la Luz Recibida _____	21
Figura 8 Distribución de conos y bastones en la retina _____	22
Figura 9 Rangos de Iluminación Ambiente y Tipo de Visión que Proporciona a un Observador Patrón _____	24
Figura 10 Curvas de eficiencia fotópica, mesópica y escotópica para el espectro visible _____	25
Figura 11 Vía Pública con Luminarias de Vapor de Sodio _____	32
Figura 12 Iluminación de tipo LED en Vía Pública _____	33
Figura 13 Esquema de Funcionamiento de un Sistema Inteligente de Alumbrado _____	34
Figura 14 Farolas Solares para Ciudades Inteligentes _____	35
Figura 15 Ubicación Satelital - Exteriores InfoUni _____	49
Figura 16 Ubicación Satelital - Luminaria Facultad de Ingeniería Química y Textil _____	49
Figura 17 Ubicación Satelital - Facultad de Ingeniería Industrial y de Sistemas _____	50
Figura 18 Medición Estándar de Iluminancia _____	51
Figura 19 Esquema de Medición InfoUNI _____	53
Figura 20 Esquema de Medición FIQT _____	53
Figura 21 Esquema de Medición FIIS _____	54
Figura 22 Banco de Pruebas para Iluminación _____	56
Figura 23 Medidor Digital de Potencia, Corriente y Voltaje _____	56
Figura 24 Vista Interior del Tablero de Fuerza - Bando de Pruebas _____	57

Figura 25	Banco de Pruebas con Luminaria LED Encendida _____	58
Figura 26	Esquema de Medición de Iluminancia en Banco de Pruebas _____	59
Figura 27	Banco de Pruebas con Luminaria de Vapor de Sodio Encendida _____	60
Figura 28	Banco de Pruebas con Luminaria de Vapor de Halogenuro Metálico _____	61
Figura 29	Registro con Espectrofotómetro _____	63
Figura 30	Correlación de Iluminancia respecto al Voltaje - LED _____	64
Figura 31	Espectrogramas para Reducción Progresiva de Voltaje - Luminaria tipo LED _____	65
Figura 32	Correlación de Iluminancia respecto al Voltaje - Vapor de Mercurio _____	67
Figura 33	Correlación de Iluminancia respecto al Voltaje - Vapor de Sodio _____	68
Figura 34	Espectrograma Luminaria de Vapor de Sodio _____	69
Figura 35	Correlación de Iluminancia respecto al Voltaje - Halogenuro Metálico _____	70
Figura 36	Espectrograma Luminaria de Halogenuro Metálico _____	71
Figura 37	Rendimiento Lumínico por Tipo de Luminaria _____	88
Figura 38	Consumo Energético Mensual Estimado (kWh) _____	89
Figura 39	Factor S/P y Eficiencia Mesópica por Luminaria _____	90
Figura 40	Reducción Porcentual de Consumo Energético con Criterios Mesópicos (%) _____	91

Índice de Tablas

Tabla 1 Variables y Operacionalización de Variables	10
Tabla 2 Niveles de Iluminancia Normativa Peruana - 2003	46
Tabla 3 Estándares Lumínicos por Tipo de Alumbrado - DGE 2021.....	47
Tabla 4 Medición de Iluminancia - InfoUNI.....	53
Tabla 5 Medición de Iluminancia - FIQT.....	54
Tabla 6 Medición de Iluminancia - FIIS	55
Tabla 7 Medición de Iluminancia en Luminaria LED - Banco de Pruebas	59
Tabla 8 Medición de Iluminancia en Luminaria de Vapor de Mercurio - Banco de Pruebas.....	60
Tabla 9 Medición de Iluminancia en Luminaria de Vapor de Sodio - Banco de Pruebas	61
Tabla 10 Medición de Iluminancia en Luminaria de Halogenuro Metálico - Banco de Pruebas .	62
Tabla 11 Medición de Iluminancia con Reducción de Voltaje - Luminaria LED.....	64
Tabla 12 Correlación de Iluminancia respecto al Voltaje - Vapor de Mercurio	66
Tabla 13 Correlación de Iluminancia respecto al Voltaje - Vapor de Sodio	67
Tabla 14 Correlación de Iluminancia respecto al Voltaje - Halogenuro Metálico.....	69
Tabla 15 Reducción Porcentual de Voltaje e Iluminancia - Luminaria LED	72
Tabla 16 Reducción Porcentual de Voltaje e Iluminancia - Luminaria de Vapor de Mercurio.....	73
Tabla 17 Reducción Porcentual de Voltaje e Iluminancia - Luminaria de Vapor de Sodio	73
Tabla 18 Reducción Porcentual de Voltaje e Iluminancia - Luminaria de Halogenuro Metálico .	74
Tabla 19 Comparativa entre Normativa Peruana e Internacional de Iluminación Pública	75
Tabla 20 Comparación de Estándares Luminotécnicos entre la Norma Internacional y las Normativas Peruanas.....	76
Tabla 21 Tabla Referencial de Valores S/P para Fuentes de Luz Comunes.....	81
Tabla 22 Factor S/P y Factor de Corrección Mesópico Para Cada Tipo de Luminaria	82
Tabla 23 Luxes Mesópicos Corregidos para cada Tipo de Luminaria	82
Tabla 24 Análisis del Flujo Mesópico	83

Tabla 25 Validación de Hallazgos Después de la Corrección a Flujos Mesópicos.....	83
Tabla 26 Iluminancia Mesópica Corregida para Mediciones en Campus Universitario.....	84
Tabla 27 Consumo Energético Luminaria LED - Casos de Estudio.....	86
Tabla 28 Rendimiento Lumínico Promedio por Tipo de Luminaria	87
Tabla 29 Consumo energético mensual estimado por tipo de luminaria instalada en banco de pruebas (kWh/mes).....	88
Tabla 30 Factor S/P y Eficiencia Mesópica por Luminaria.....	90
Tabla 31 Reducción Porcentual de Consumo Energético al Implementar Criterios Mesópicos .	91
Tabla 32 Tabla comparativa consolidada de tecnologías analizadas.....	92
Tabla 33 Comparación del consumo energético mensual estimado para 250 luminarias (kWh)	93
Tabla 34 Comparación de potencia instalada total para cada tecnología (W)	94
Tabla 35 Eficacia luminosa del sistema (lux/W)	94
Tabla 36 Iluminancia media por tecnología (lux).....	95
Tabla 37 Uniformidad de iluminancia (U_0).....	95
Tabla 38 Índice de deslumbramiento (TI).....	95

Introducción

En la actualidad, la eficiencia energética en los sistemas de alumbrado público representa un desafío importante para las ciudades que buscan avanzar hacia modelos de desarrollo urbano sostenibles. Tradicionalmente, el diseño de estos sistemas se ha basado en criterios fotópicos, es decir, adaptados a condiciones de visión diurna. Sin embargo, durante las horas nocturnas, la percepción visual humana cambia significativamente, situándose en el rango mesópico, donde intervienen tanto los conos como los bastones de la retina. Este cambio implica que el ojo humano responde de manera diferente a la luz, lo que abre una oportunidad para optimizar los sistemas de iluminación urbana ajustándolos a las características de la visión mesópica.

El presente estudio aborda el problema de la ineficiencia en los sistemas actuales de alumbrado público en zonas urbanas, que muchas veces presentan sobredimensionamientos lumínicos, deslumbramientos innecesarios y altos niveles de consumo energético. A partir de este diagnóstico, se plantea el rediseño de un sistema de iluminación pública basado en parámetros de visión mesópica como alternativa viable para mejorar la eficiencia energética sin comprometer la calidad visual ni la seguridad vial.

El objetivo general de esta investigación es diseñar un sistema de alumbrado público con nuevos parámetros de iluminación adaptados a la visión mesópica, con el fin de incrementar la eficiencia energética en contextos urbanos. Para lograrlo, se plantean objetivos específicos como: determinar la influencia de estos parámetros en la calidad visual de los usuarios, optimizar el consumo energético de distintos tipos de luminarias y cuantificar el incremento de eficiencia energética alcanzado con esta modificación.

La hipótesis central sostiene que un sistema de alumbrado público diseñado con criterios mesópicos permite incrementar la eficiencia energética del alumbrado en zonas urbanas. Esta hipótesis será evaluada mediante un diseño experimental, con mediciones de campo y

simulaciones en software especializado, tomando como escenario de aplicación el campus de la Universidad Nacional de Ingeniería.

La importancia de esta investigación radica en su potencial para contribuir al diseño de políticas públicas en eficiencia energética y sostenibilidad urbana. Además, se alinea con los Objetivos de Desarrollo Sostenible, específicamente el ODS 7, promoviendo una energía más asequible, limpia y eficiente.

La metodología empleada incluye un enfoque cuantitativo y experimental, donde se compararán dos grupos (sistema convencional y sistema propuesto) para evaluar variables como iluminancia, consumo energético y calidad visual. Las luminarias serán analizadas tanto en condiciones reales de uso como en entornos controlados de laboratorio.

Esta tesis está estructurada en cuatro capítulos: el primero presenta las generalidades de la investigación; el segundo desarrolla el marco teórico y conceptual; el tercero expone el trabajo experimental y análisis de datos; y el cuarto, finalmente, presenta los resultados, su discusión y la validación de las hipótesis planteadas.

CAPÍTULO I.

Generalidades

1.1. Antecedentes de la Investigación

Prado, I. (2024), en su tesis para optar por el título profesional "Evaluación de la viabilidad técnica de un diseño de iluminación que promueve el bienestar en oficinas en base a la guía de diseño UL 24480"; realiza el estudio de viabilidad técnica para una mejora en el diseño de iluminación interior que promueva la sincronización del ritmo circadiano, para esto, propone utilizar la Guía de Diseño UL 24480, la cual utiliza la medida del estímulo circadiano (CS) como métrica para validar el grado de sincronización del ritmo circadiano que se consigue con cada tipo de diseño. Además de ello, realiza una comparación entre las recomendaciones de dicha norma con parámetros como iluminancia, deslumbramiento y uniformidad, dado que no los contempla al momento de realizar el diseño, sin embargo, propone dos casos de diseño para un sistema de alumbrado interior que promueva la sincronización del ritmo circadiano y a su vez cumpla con los estándares mínimos de iluminancia y deslumbramiento fijados por la normativa local. Si bien este estudio no se centra en el diseño de alumbrado público, que refiere a exteriores; el uso de la calculadora del parámetro estímulo circadiano (CS) propone a la misma como una herramienta para validar que los flujos de iluminación nocturnos estén dentro del rango establecido según el horario y permite realizar un contraste con los criterios de visión mesópica asociados al mismo horario (p. 4).

Meza, R. (2024). En su tesis para título profesional "Mejora del diseño de iluminación en la vía arterial Tupac Amaru (Frontis UNI), para reducir el impacto de la contaminación lumínica", propone evaluar el estado actual de la vía en estudio, realizar correcciones de ingeniería teniendo en cuenta la normativa nacional e internacional respecto a la contaminación lumínica y su influencia en el ciclo circadiano, así como realizar una comparación cuantitativa entre el estado actual y la propuesta de diseño con las correcciones propuestas previamente simulada en el

software Dialux. Luego del desarrollo de la tesis, concluye que la disposición actual del alumbrado público tiene un exceso de 28.57% en la relación de entorno respecto a la simulación, que contempla la normativa vigente y las recomendaciones para disminuir la contaminación lumínica, además de ello reduce en un 58.8% el consumo energético con su propuesta. Esto quiere decir que la situación actual de la iluminación en dicha vía arterial se encuentra sobredimensionada aún si se consideran los parámetros establecidos en la normativa local vigente. Respecto al objetivo de regular el ciclo circadiano con la propuesta de diseño, contrasta su hipótesis y concluye que la calidad del cielo nocturno y el ciclo circadiano no tiene una relación directa, sin embargo, menciona que se requiere un estudio más minucioso para contrastarlo (p. 5).

Zúñiga, L. (2023), en su trabajo de tesis para optar el título profesional "Análisis de la reducción de costos del servicio de alumbrado público en una empresa de distribución de energía eléctrica del sur del Perú con luminarias led respecto a los de vapor de sodio de alta presión - VSAP"; analiza concisamente la reducción de la demanda energética del alumbrado público gracias al reemplazo de las luminarias de vapor de sodio por luminarias de tipo LED. Concluye su estudio con una reducción del 45% en la demanda de energía, una reducción del 39% en la facturación del servicio de alumbrado público y una reducción del 43% de las emisiones de dióxido de carbono durante el periodo de análisis. Los resultados de este trabajo se condicen con los resultados de Meza, R. (2024), en donde se evidencia el sobredimensionamiento del sistema de alumbrado público respecto a los parámetros de iluminación normados, lo cual a priori nos lleva a pensar que existe un consumo excesivo de energía eléctrica, y se validan las cifras calculadas en ambos estudios (p. 5).

Gamarra, M. (2021), en su tesis para optar por el título profesional "Propuesta de mejora del diseño de iluminación del alumbrado público actual del Perú, basado en estándares de calidad según el comité europeo de normalización"; analiza la factibilidad de diseñar un sistema de iluminación de alumbrado público para los distintos tipos de iluminación según la norma

técnica peruana DGE 2003 pero usando parámetros de luminancia, iluminancia, incremento de percepción TI (%) y clasificación de alumbrado vial según lo dispuesto por el Comité Europeo De Normalización, esto garantiza la aplicación de altos estándares europeos en la propuesta de diseño, aun cuando dicho estándar no considere la influencia de los flujos de luz en los tipos de visión del ojo humano. Durante el desarrollo se contrastan los valores reales medidos en la avenida Tupac Amaru con la simulación realizada en el software Dialux del diseño realizado según los estándares del Comité Europeo de Normalización para obtener como resultado una reducción del consumo energético debido a la redistribución de luminarias y al reemplazo de luminarias antiguas por luminarias con tecnología LED. Se menciona como una de las conclusiones que la norma técnica de alumbrado público implementado actualmente fue diseñada para satisfacer la necesidad de muchos años atrás, por lo cual necesita una actualización de acuerdo con las nuevas tecnologías y a las nuevas necesidades (p. 5).

Segama, R. (2017), en su tesis para título profesional "Propuesta de implementación de un sistema de telegestión de alumbrado público para el campus universitario de la Universidad Nacional de Ingeniería"; plantea la necesidad de mejorar el servicio de alumbrado público del campus universitario de la UNI y propone implementar un sistema de telegestión para mejorar la calidad del servicio, reducir el consumo y generar un ahorro económico; para esto, propone el uso de tecnologías que permitan el control a distancia de las luminarias para establecer la potencia que recibirán de acuerdo al rango de horario, de esta manera se pasa de una potencia constante durante las horas de la noche a una potencia variable en el tiempo, de acuerdo a la demanda promedio de los usuarios, así se reduce el consumo de energía y el costo asociado. El autor concluye que la iluminación pública en el campus universitario no cumple con los estándares definidos en la norma técnica DGE, con niveles de uniformidad promedio mucho mayores a los estipulados en la norma y sugiere la implementación de sistemas inalámbricos de control, con un estudio de viabilidad económica a un horizonte de 18 años y un periodo de recuperación de la inversión de tres años (p. 5).

Navarro, J. (2012), en su tesis de fin de doctorado "Efecto de la luz cenital difusa sobre la agudeza visual y la sensibilidad al contraste en la conducción mesópica"; estudia a fondo la agudeza visual y la sensibilidad al contraste en los entornos de conducción mesópica, que para fines prácticos significan condiciones de poca iluminación; el estudio se centra en comprobar si un sistema de iluminación difusa proporciona un incremento en la función visual mesópica, lo cual es medible por el incremento en la agudeza visual mesópica de alto y bajo contraste como también por la mejora de la sensibilidad al contraste mesópico (p. 5).

Fryc, I.; Czyzewski, D.; Fan, J.; Galatanu, C.D. (2021) en el artículo "The Drive towards Optimization of Road Lighting Energy Consumption Based on Mesopic Vision - A Suburban Street Case Study"; presentan la investigación para optimizar el consumo energético en el alumbrado público vial utilizando el hecho de la dependencia del crepúsculo humano y la visión mesópica (visión nocturna) con el nivel de luminancia y la composición espectral de la luz de la luminaria. Luego de evaluar diversos escenarios, el estudio concluye que es posible un ahorro del 15% anual en el consumo de electricidad en carretera, lo cual indica que la eficiencia energética de una instalación de alumbrado público puede mejorarse ajustando los niveles de iluminación previstos por la norma a los previstos por la visión mesópica (Fryc et al., 2021).

Min, L.; Peiyu, W.; Jianhua, D.; Qi, Y.; Jiaqi, J. (2020) en el artículo científico "The Circadian Effect Versus Mesopic Effect in Road Lighting Applications"; mencionan que tanto en los estudios del ciclo circadiano, en donde se analiza el lux melanópico equivalente (EML) la luz circadiana (CLA) y el estímulo circadiano (CS) que representan el efecto circadiano, y la relación S/P que representa el efecto de visión mesópica se correlacionan mucho más que la temperatura de color con el efecto circadiano. Concluyen así que el efecto circadiano no es un problema significativo en visión mesópica en la mayoría de las condiciones y que la optimización para lograr una eficiencia mesópica es una mejor estrategia (Li et al., 2020).

1.2. Identificación y Descripción del Problema de Estudio

El alumbrado público en contextos universitarios representa un componente fundamental para la seguridad de los usuarios, la eficiencia energética institucional y la calidad visual del entorno. En el campus de la Universidad Nacional de Ingeniería (UNI), específicamente en el circuito de circulación peatonal comprendido entre la entrada principal y la Facultad de Ingeniería Mecánica, se ha identificado una problemática recurrente en el sistema de alumbrado actual, tanto en términos de desempeño fotométrico como de eficiencia energética.

Estudios previos desarrollados en esta misma zona de influencia, como los realizados por Meza (2024) y Segama (2017), evidencian condiciones deficientes de iluminancia, deslumbramiento excesivo y cobertura inadecuada del flujo luminoso. En particular, los valores de iluminancia horizontal medidos por Meza (2024) muestran un promedio de 4.6 lux, con mínimos de 1.7 lux, frente a los 15 lux exigidos por la RM N.º 460-2021-MINEM/DM que modifica la Norma DGE - “Alumbrado de Vías y Espacios Públicos” (Dirección General de Electricidad (DGE), 2021). Asimismo, se reportan valores del índice de deslumbramiento TI entre 25 y 30, muy por encima del umbral de TI = 15 recomendado por la EN 13201-2:2015 para vías peatonales seguras.

Estas deficiencias no solo tienen implicancias técnicas, sino también funcionales y sociales. La escasa iluminación afecta negativamente la percepción visual nocturna de los estudiantes, docentes y visitantes, limitando la identificación de rostros, objetos y peligros. Según una encuesta incluida por Meza (2024), un 67% de los estudiantes expresó sentirse incómodo al transitar por estas zonas durante la noche. Además, el sistema actual, basado en luminarias de descarga de alta intensidad, presenta rendimientos espectrales inadecuados para visión mesópica y consumos energéticos elevados —en torno a 3,2 MWh mensuales, según proyecciones—, lo cual incrementa los costos operativos institucionales.

Históricamente, este sistema fue concebido bajo criterios fotópicos convencionales, centrados en iluminancia sin considerar las condiciones visuales reales de entornos nocturnos.

Esto ha generado una brecha con los avances tecnológicos actuales, como el uso de luminarias LED optimizadas espectralmente y diseñadas para maximizar el rendimiento mesópico, los cuales permiten mantener niveles visuales adecuados con menor consumo energético.

Por tanto, la falta de adecuación del sistema existente no solo evidencia una ineficiencia técnica y energética, sino que también limita la capacidad de la universidad para cumplir estándares normativos nacionales e internacionales. Esta situación justifica la necesidad de diseñar una nueva propuesta de sistema de alumbrado público que incorpore parámetros de iluminación basados en visión mesópica, permitiendo así mejorar tanto la eficiencia energética como la calidad visual del entorno nocturno universitario.

1.3. Formulación del Problema

1.3.1. Problema General

¿Cómo influyen los criterios de visión mesópica en la optimización energética del Sistema de Alumbrado Público en el Campus de la Universidad Nacional de Ingeniería?

1.3.2. Problemas Específicos

- ¿Cuál es el nivel actual de eficiencia energética del sistema de alumbrado público en el campus?
- ¿Qué parámetros de iluminación bajo visión mesópica pueden aplicarse?
- ¿Cómo varía el consumo energético con la implementación de dichos parámetros?
- ¿Qué mejoras se evidencian en calidad de iluminación y ahorro energético?

1.4. Justificación e Importancia

El alumbrado público constituye un componente esencial de la infraestructura urbana que incide directamente en la seguridad vial, el confort visual y el consumo energético (Raynham & Saksvikronning, 2003). En entornos como el campus universitario, donde las actividades se extienden hasta horas nocturnas, la calidad de la iluminación adquiere particular relevancia. Sin

embargo, los sistemas actuales se basan predominantemente en parámetros fotópicos, sin considerar que en condiciones de baja iluminación el comportamiento visual humano cambia hacia una respuesta mesópica (Rea, 2000), lo que genera sobre iluminación innecesaria y consumo excesivo de energía.

Aunque la CIE 191:2010 establece criterios para condiciones mesópicas, no existe una aplicación sistemática de estos parámetros en diseños de alumbrado público en zonas urbanas intermedias del Perú, lo que limita la eficiencia energética real en contextos nocturnos.

Esta investigación plantea el diseño de un sistema de alumbrado público adaptado a la visión mesópica, evaluando sus efectos sobre la eficiencia energética y la calidad visual, y se justifica en los siguientes ejes:

Justificación Tecnológica: El estudio incorpora criterios de visión mesópica en el diseño luminotécnico, utilizando herramientas de simulación fotométrica (Dialux Evo) para modelar escenarios realistas de iluminación. Este enfoque permite optimizar el rendimiento de luminarias LED mediante ajustes en el espectro y nivel de iluminancia, lo cual responde a los lineamientos de la CIE 191:2010 sobre visión mesópica (Commission Internationale de l'Éclairage (CIE), 2010).

Justificación Económica: El alumbrado público puede representar hasta el 60 % del consumo eléctrico municipal en zonas urbanas (Illuminating Engineering Society of North America (IESNA), 2011). Diversos estudios muestran que implementar criterios mesópicos puede reducir el consumo energético en un rango de 30 % a 50 % en comparación con sistemas tradicionales de sodio (Kort, 2012), generando una significativa reducción de costos operativos para instituciones como universidades.

Justificación Ambiental: La eficiencia energética no solo implica ahorro económico, sino también un menor impacto ambiental. Al disminuir la demanda energética, se reducen proporcionalmente las emisiones de gases de efecto invernadero asociadas a la generación eléctrica (Ministerio de Energía y Minas, 2021). Además, la aplicación de niveles de iluminación

ajustados evita la sobre iluminación, reduciendo la contaminación lumínica y sus efectos sobre la fauna nocturna (Gaston, 2012).

Justificación Social: Una iluminación pública adecuada incrementa la percepción de seguridad, disminuye la incidencia de accidentes nocturnos y mejora el uso del espacio urbano. En contextos universitarios, esto se traduce en un entorno más seguro y funcional para estudiantes y trabajadores. Estudios han reportado mejoras significativas en la sensación de seguridad peatonal tras intervenciones en el sistema de alumbrado (Fotios S. &, 2016)

Conclusión: Este estudio integra fundamentos técnicos con impactos económicos, ambientales y sociales. La propuesta metodológica permite evaluar de forma cuantificable una solución viable, eficiente y replicable, que responde a necesidades reales del entorno universitario, pero con proyección hacia otros espacios urbanos, contribuyendo a una gestión más inteligente y sostenible del alumbrado público.

1.5. Objetivos

1.5.1. Objetivo General

Evaluar la influencia de la aplicación de parámetros de iluminación pública según criterios de visión mesópica en la eficiencia energética del sistema de alumbrado público en el campus de la UNI.

1.5.2. Objetivos Específicos

- Diagnosticar el estado actual del sistema de alumbrado público en cuanto a eficiencia energética.
- Seleccionar parámetros técnicos adecuados basados en visión mesópica.
- Diseñar un sistema de alumbrado que incorpore dichos parámetros basados en visión mesópica.
- Evaluar el impacto del nuevo diseño en la eficiencia energética.

1.6. Hipótesis

1.6.1. *Hipótesis General*

La aplicación de parámetros de iluminación pública basados en criterios de visión mesópica incrementa significativamente la eficiencia energética del sistema de alumbrado público en el campus de la UNI.

1.6.2. *Hipótesis Específicas*

El sistema actual presenta deficiencias energéticas.

Con iluminación mesópica se reduce el flujo luminoso sin que se afecte la visibilidad.

El nuevo diseño reduce el consumo energético.

La percepción visual mejora con el sistema propuesto.

1.7. Variables y Operacionalización de Variables

Tabla 1

Variables y Operacionalización de Variables

Variable	Definición Conceptual	Definición Operacional	Dimensiones	Indicadores	Escala de Medición
Variable Independiente	Conjunto de criterios luminotécnicos que consideran la respuesta del sistema visual humano en condiciones de luminancia intermedia (0.005 a 5 cd/m ²), donde coexisten los conos y bastones de la retina. Estos parámetros integran la relación espectral S/P, la iluminancia corregida y el desplazamiento espectral de la sensibilidad visual, permitiendo un diseño de alumbrado más eficiente en entornos de baja luz, típicos de la noche urbana.	Propuesta de diseño de un sistema de alumbrado público basado en criterios de visión mesópica, que considera parámetros como el factor espectral S/P, la corrección mesópica de la iluminancia y la adecuación espectral de la fuente de luz. Estos parámetros son integrados en modelos luminotécnicos elaborados con software de simulación (Dialux), y su efecto se evalúa mediante la comparación con un sistema convencional, utilizando como referencia los niveles de iluminancia, luminancia y eficiencia energética estimada.	Nivel de iluminancia Corrección de niveles de iluminancia Factor espectral S/P	Iluminancia mesópica (lux) Porcentaje de corrección de lux aplicado Valores del índice S/P	
Variable Dependiente	Relación cuantitativa entre la energía eléctrica consumida por el sistema de alumbrado público y la cantidad de luz útil (iluminancia efectiva) proyectada, considerando parámetros espectrales, distribución espacial de la luz y cumplimiento de niveles normativos. Representa la capacidad del sistema para maximizar el rendimiento lumínico con el mínimo consumo, garantizando la funcionalidad y seguridad vial.	Comparación del consumo energético (kWh/año) y del rendimiento lumínico (lm/W) entre sistemas de alumbrado público convencionales y sistemas adaptados a visión mesópica. Se mide a través de registros de consumo, luxómetros, análisis espectrales y simulaciones computacionales, determinando el ahorro energético y la mejora del rendimiento lumínico atribuible a la implementación de criterios mesópicos.	Consumo energético Rendimiento Lumínico Iluminancia	Consumo anual de energía eléctrica (kWh/año) Lúmenes por Watt (lm/W) Nivel de iluminación promedio (lux)	

Cuantitativa continua

Nota: Elaboración Propia

1.8. Metodología de la Investigación

1.8.1. Unidad de Análisis

Alumbrado Público dentro del Campus de la Universidad Nacional de Ingeniería.

1.8.2. Tipo, enfoque, nivel y diseño de investigación

La presente investigación se clasifica como aplicada, ya que está orientada a resolver un problema técnico concreto identificado en el campus de la Universidad Nacional de Ingeniería: las deficiencias del sistema de alumbrado público en términos de iluminancia, deslumbramiento y eficiencia energética. A diferencia de la investigación pura, que busca generar conocimientos teóricos, esta investigación persigue un propósito práctico y funcional, mediante el diseño de un sistema de iluminación adaptado a condiciones reales.

Desde el punto de vista del nivel de conocimiento, corresponde a una investigación explicativa, dado que no solo describe una situación observable, sino que explica la relación causal entre las variables técnicas del sistema de alumbrado y sus efectos sobre la percepción visual nocturna y el uso eficiente de la energía. Esta explicación se fundamenta en principios fotométricos, criterios de visión mesópica y normativas luminotécnicas nacionales e internacionales.

Respecto a su enfoque, se trata de una investigación cuantitativa, ya que emplea variables observables y medibles como la iluminancia (lux) y el consumo energético (kWh). Estas variables son evaluadas mediante mediciones técnicas, simulaciones con software especializado (Dialux Evo) y análisis comparativo de resultados.

En cuanto a su diseño metodológico, se trata de una investigación no experimental de tipo comparativo-simulado, ya que no se manipulan directamente las condiciones del entorno real, sino que se simulan escenarios mediante modelado digital y pruebas controladas en laboratorio. Se comparan dos condiciones: el sistema actual y una propuesta de rediseño bajo criterios mesópicos, lo cual permite analizar diferencias de rendimiento sin intervenir físicamente el sistema real.

La presente investigación tiene un alcance tecnológico y aplicado, centrado en el diseño de una solución luminotécnica basada en visión mesópica y su validación mediante simulación comparativa. No se pretende intervenir ni modificar directamente el sistema real, sino demostrar la factibilidad técnica y los beneficios potenciales de un rediseño eficiente, medible y replicable en contextos urbanos similares.

Finalmente, la validación de la propuesta se realiza mediante simulación técnica y contraste con estándares normativos como la Norma DGE - “Alumbrado de Vías y Espacios Públicos”. y la norma europea EN 13201. Esta estrategia permite evaluar objetivamente el rendimiento del diseño propuesto, asegurando su viabilidad y adecuación técnica antes de su eventual implementación.

1.8.3. Fuentes de Información

Fuentes primarias: Mediciones de campo.

Fuentes Secundarias: Revisión bibliográfica, bases de datos.

1.8.4. Población y Muestra

La población de este estudio está constituida por los sistemas de alumbrado público instalados en el campus de la Universidad Nacional de Ingeniería (UNI), los cuales comprenden luminarias LED distribuidas en vías peatonales, vehiculares y áreas comunes. Esta población se considera finita, acotada físicamente y de acceso controlado, lo cual permite un análisis integral en un entorno representativo y técnicamente viable.

Para el presente estudio se ha seleccionado una muestra no probabilística, de tipo intencional, conformada por los sistemas de alumbrado que presentan mayor tráfico peatonal nocturno y condiciones de medición favorables. Esta selección responde al enfoque experimental de la investigación, que requiere condiciones controladas y comparables entre el sistema actual y la propuesta basada en criterios mesópicos.

La muestra fue determinada con base en los siguientes criterios de inclusión:

- Sectores con luminarias LED operativas y sin interferencias lumínicas externas.

- Áreas con tránsito peatonal continuo durante la noche.
- Sectores técnicamente accesibles para mediciones de campo (lux, energía, deslumbramiento).

Esta metodología permite obtener datos representativos del comportamiento energético y visual del sistema, sin requerir inferencia estadística poblacional, dado que el objetivo central es comparar experimentalmente dos condiciones técnicas de diseño en el mismo entorno físico.

1.8.5. Técnicas e Instrumentos de recolección de Datos

Para la recolección de datos, se emplearon técnicas cuantitativas, con el propósito de obtener mediciones objetivas sobre los niveles de iluminancia, distribución espectral y consumo energético de las luminarias evaluadas. La investigación se estructuró en dos fases: mediciones en campo y pruebas en laboratorio, cada una con procedimientos y herramientas específicas.

En la fase de medición en campo, se utilizó un luxómetro digital para registrar los niveles de iluminancia en distintas ubicaciones del campus universitario, asegurando la recopilación de datos en condiciones reales de operación del alumbrado público. Los valores obtenidos fueron tabulados y comparados con los estándares internacionales de iluminación para entornos urbanos.

Durante la fase experimental en el laboratorio de electricidad, se emplearon los siguientes instrumentos:

- Luxómetro: para registrar los niveles de iluminancia a diferentes voltajes de operación.
- Espectrómetro: para analizar la distribución espectral de cada luminaria y evaluar su adecuación al rango mesópico.
- Multímetro digital: para medir los valores de voltaje y corriente en cada configuración de prueba.

- Software de simulación (Dialux y/o Relux): para modelar las condiciones lumínicas y evaluar la distribución de luz en distintos escenarios.

Los datos recolectados fueron registrados en bases de datos estructuradas y sometidos a análisis comparativos con las normativas de la Comisión Internacional de Iluminación (CIE) y ANSI/IES RP-8-21. Este enfoque permitió obtener una visión integral del desempeño de cada tipo de luminaria y fundamentar las conclusiones sobre la optimización del alumbrado público basado en criterios de visión mesópica.

1.8.6. Análisis y Procesamiento de Datos

Los datos recopilados en campo y en laboratorio fueron procesados y analizados utilizando herramientas estadísticas y software especializado en iluminación. Inicialmente, los valores de iluminancia obtenidos con el luxómetro fueron tabulados y comparados con los estándares normativos de la CIE y ANSI/IES RP-8-21. Posteriormente, en el laboratorio, se analizaron las variaciones en la distribución espectral y en la eficiencia lumínica conforme se reducía el voltaje de alimentación de cada luminaria.

Para el procesamiento de los datos, se emplearon técnicas de estadística descriptiva e inferencial, incluyendo el cálculo de promedios, desviaciones estándar y pruebas de hipótesis para determinar la relación entre la reducción del voltaje y los niveles de iluminancia obtenidos. Asimismo, se realizó una comparación de eficiencia energética mediante el cálculo del consumo en kilovatios-hora (kWh) y el rendimiento lumínico (lm/W) de cada luminaria. Finalmente, los datos fueron contrastados con las hipótesis planteadas, evaluando el estado inicial y el estado final con los parámetros de visión mesópica ya en uso, permitiendo la formulación de propuestas para la mejora del alumbrado público en entornos urbanos.

CAPÍTULO II.

Marco Teórico y Marco Conceptual

2.1. Marco Teórico

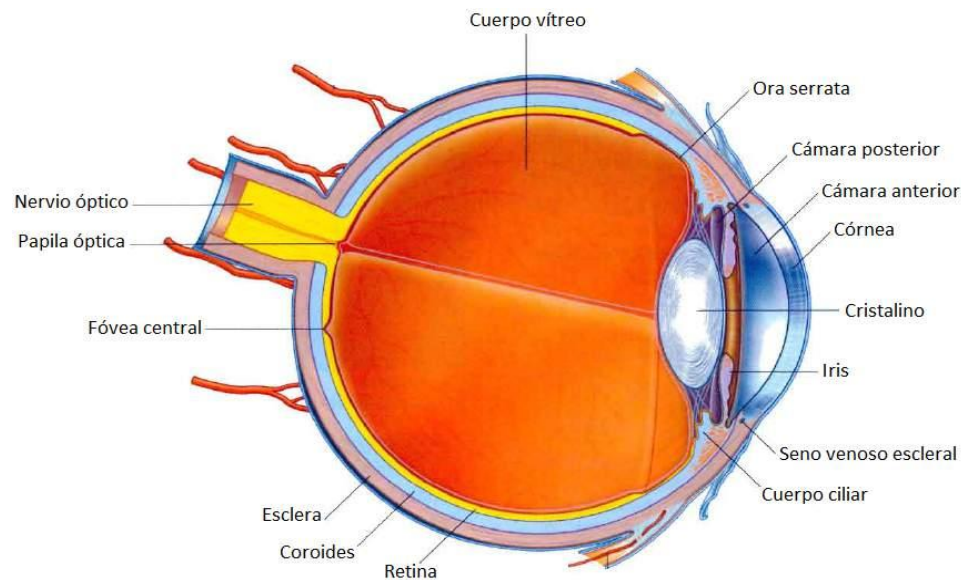
2.1.1. Conceptos de Visión Humana

2.1.1.1 Fisiología del ojo humano

Para comprender cómo se lleva a cabo el proceso de visión humana es necesario conocer cómo funciona y cómo se divide el ojo humano, en la Figura 1 se muestra un esquema del ojo humano con la distribución de sus partes y los respectivos nombres.

Figura 1

El ojo humano y sus principales componentes



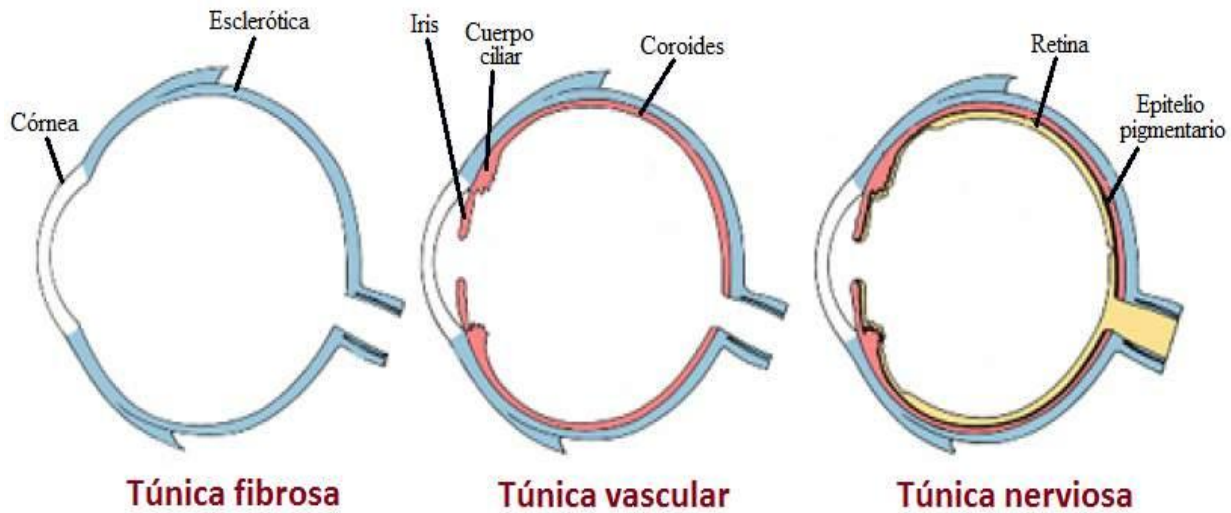
Nota: La anatomía del ojo humano es crucial para comprender los distintos tipos de visión.

(Marin, 2006)

Como se ve en la imagen, el ojo está compuesto en sus paredes por capas de estilo membranosas, cada una con nombres según su composición o la posición que ocupa, estas son la túnica fibrosa (la capa más externa del ojo), la túnica vascular (o media), y la túnica nerviosa (capa interna) y se muestran esquemáticamente en la figura 2.

Figura 2

Descripción de la conformación del ojo en sus diferentes capas



Nota: El ojo humano tiene 3 capas, las cuales tienen una función diferente en la visión humana. (Drake y otros, 2005)

En el párrafo siguiente se describirá a detalle los tipos de tónicas mencionadas.

(1) **Túnica fibrosa del ojo**

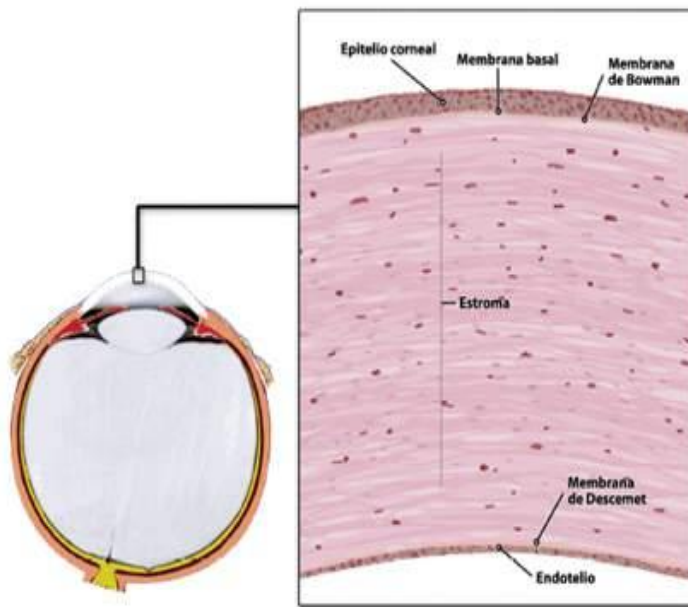
La túnica fibrosa del ojo es una estructura semi elástica que actúa como cápsula protectora del ojo, además determina la geometría óptica del aparato visual. Está constituida por la esclerótica, una membrana de consistencia relativamente dura, densa y de color blanco que cubre y protege el globo ocular; y la córnea, que es la parte anterior de la pared de colágeno del globo ocular, no tiene vasos sanguíneos, pero posee abundantes nervios procedentes de la rama del nervio oftálmico (Drake et al., 2005).

Gracias a las propiedades de la córnea la luz puede pasar y logra formar una imagen óptica en la retina, el grado de curvatura que posee varía de individuo a individuo, además de varias en cada individuo a lo largo de los años, siendo más pronunciado durante la juventud en comparación a edades avanzadas (Fischbarg, 2006).

En una vista microscópica de la córnea podemos ver cómo se compone por múltiples capas, en esta composición por capas se observan ver cinco principales capas: el epitelio corneal, la membrana basal, la membrana de Bowman, la estroma, la membrana de Descemet y el endotelio; que se muestran en la imagen histológica de la figura 3.

Figura 3

Imagen histológica de la córnea normal (200x) con sus capas



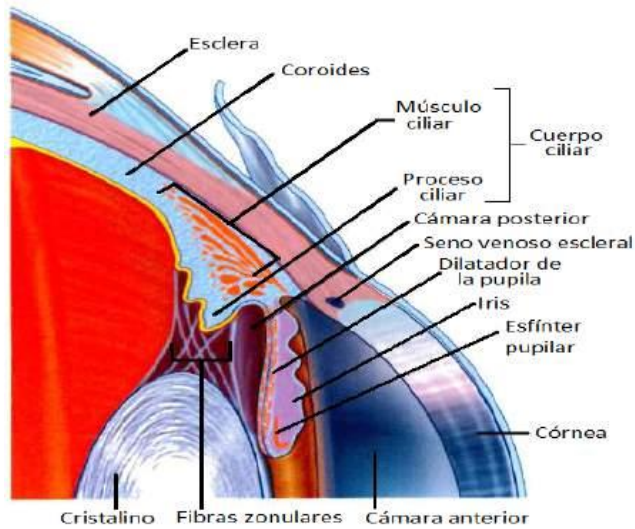
Nota: En la imagen histológica a 200 aumentos se puede observar la diferencia de profundidad entre cada capa que posee la córnea. (Drake y otros, 2005)

(2) *Túnica vascular*

Conocida también como tracto uveal, comprende la coroides, el cuerpo ciliar y el iris, formando una estructura continua. En la figura 4 se muestra un esquema de los componentes de la túnica vascular, mostrando capa por capa los componentes, señalando los nombres de cada componente y diferenciando la posición en donde se encuentran.

Figura 4

Perfil con los Principales Componentes de la Túnica Vascular



Nota: La túnica vascular tiene una gran cantidad de componentes. (Drake y otros, 2005)

(3) *Túnica nerviosa*

La retina es la encargada de limitar la parte interior de la porción posterior del globo ocular y es donde se forma la imagen, este tejido altamente sensorial es el que da inicio al procesamiento de la imagen. Como descripción general se podría decir que está compuesta por foto-receptores debajo de una capa de neuronas conectados a los mismos. Los receptores reciben la luz que pasa por casi todas las capas que tiene la retina y convierten estos fotones en señales neuronales que luego son procesadas a través de la red de células neuronales. Se considera que tenemos una mejor visión en el centro del campo visual que en los márgenes o en la periferia, esto porque hay una mayor población de foto receptores en el centro de la retina, en una región conocida como la Fóvea. Existe una depresión en la fóvea que se forma debido a que gran parte de las fibras del nervio óptico bordean dicha zona para facilitar el acceso a estos foto-receptores.

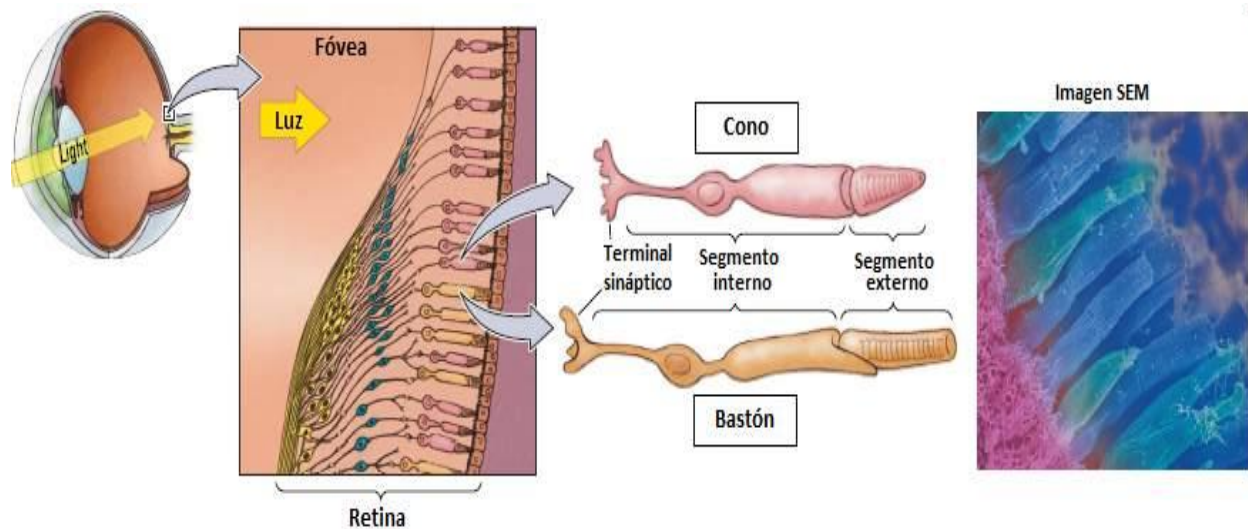
El trabajo combinado de los foto-receptores y las neuronas de la retina permite traducir la luz en potenciales de acción, discriminan longitudes de onda y por ende diferencian colores; y

además de ello trabajan en un rango muy amplio de intensidades de luz, desde intensidades muy elevadas con deslumbramiento muy elevado hasta situaciones de completa oscuridad. Existen dos principales tipos de foto-receptores, conos y bastones, que reciben su nombre debido a la forma que tienen en la porción de segmento externo.

En la figura 5 se muestra una representación de los conos y bastones, así como una imagen SEM (Scanning Electron Microscope).

Figura 5

Foto-receptores de la retina: conos y bastones



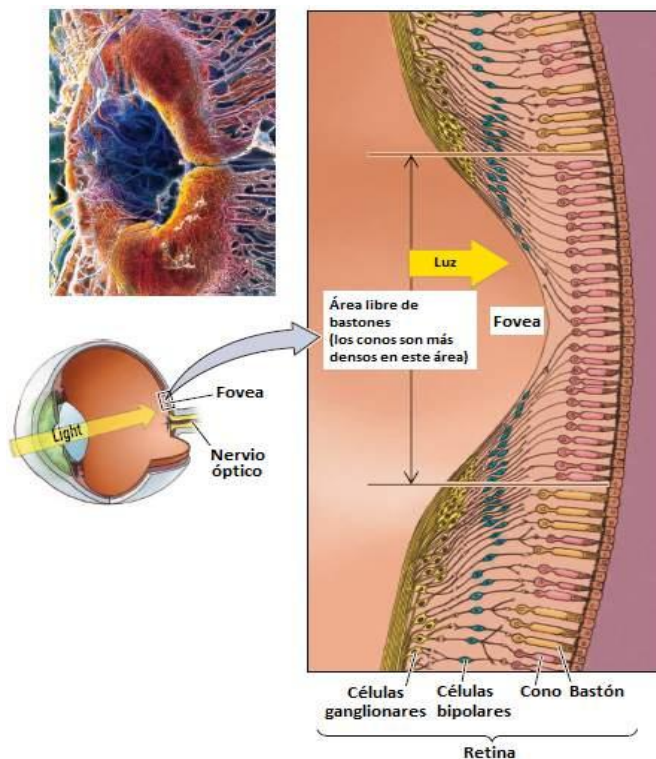
Nota: La diferencia de los foto-receptores se hace evidente en las imágenes microscópicas de gran aumento en los estudios especializados. (Drake y otros, 2005)

Estructuralmente los conos y bastones son distintos, los bastones son más largos que los conos y tienen una forma más cilíndrica en un extremo, mientras que los conos tienen una terminación cónica, de ahí sus nombres. Los bastones son más numerosos que los conos y son más sensibles a bajos niveles de luminosidad (iluminancia), por lo que son usados principalmente para la visión nocturna; a diferencia de ellos, los conos son altamente sensibles a la luz brillante, por lo que intervienen en nuestra habilidad para observar detalles finos y discriminar los colores.

La energía lumínica se convierte en energía química y luego en actividad neuronal gracias a estos foto-receptores, cuando la luz alcanza un foto-receptor inicia una serie de reacciones químicas que inducen un cambio de potencial en la membrana. Como ya se mencionó antes, en la zona denominada fovea tiene solamente conos y a medida que se va alejando de la zona de dicha zona de depresión la densidad de conos disminuye considerablemente y aparecen los bastones, esta distribución se puede observar en la figura 6.

Figura 6

Fóvea y distribución de conos y bastones



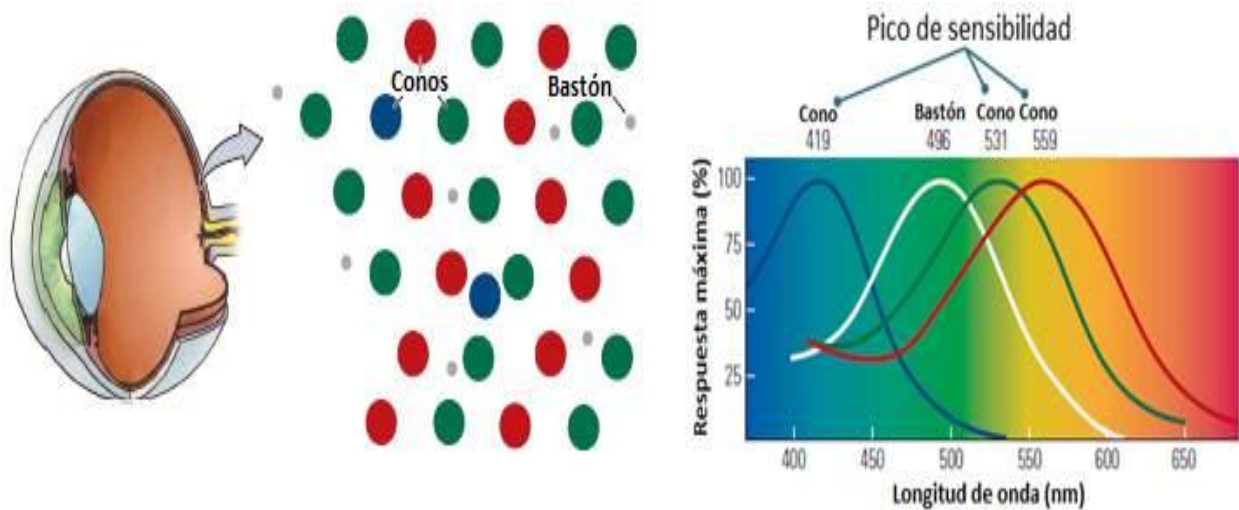
Nota: La Distribución de conos y bastones refleja la naturaleza del comportamiento de la visión humana en distintos entornos. (Drake y otros, 2005)

Finalmente, la diferencia fundamental de estos dos tipos de foto-receptores radica en sus pigmentos absorbentes, mientras todos los bastones tienen el mismo pigmento, los conos tienen tres tipos de distintos de pigmento que absorben luz en un rango determinado de longitudes de onda cuyos máximos de absorción son 419, 531 y 559 nm, respectivamente. Estos conos son

llamados “azul”, “verde” y “rojo” debido a los colores asociados a los picos de sensibilidad de las longitudes de onda mencionadas, esto se ilustra en la figura 7.

Figura 7

Sensibilidad de los Conos y Bastones en Función de la Luz Recibida



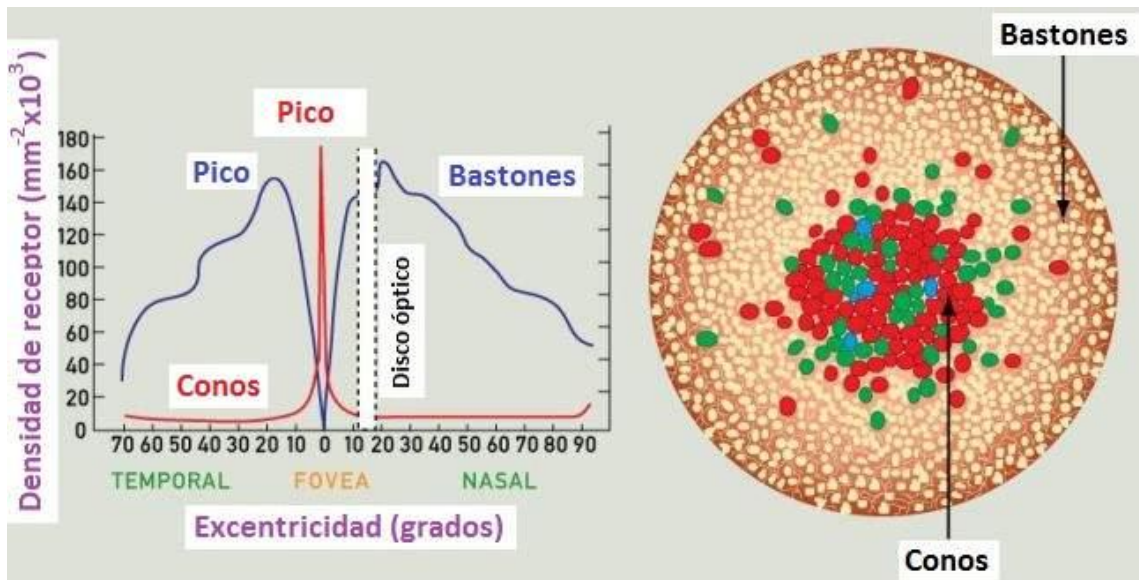
Nota: Los picos de sensibilidad de conos y bastones explican el comportamiento del ojo humano en las distintas situaciones de iluminación. (Drake y otros, 2005)

2.1.1.2 Formación de la imagen

Los fotones que son emitidos o reflejados por los objetos atraviesan secuencialmente la córnea, el humor acuoso, la pupila, el cristalino, el humor vítreo y la retina neural completa hasta alcanzar los foto-receptores, conos y bastones, los cuales transforman esta energía luminosa en estímulos nerviosos. En la figura 8 se aprecia mejor la distribución de estos foto-receptores alrededor de la zona conocida como fovea (Cussó et al., 2004).

Figura 8

Distribución de conos y bastones en la retina



Nota: Nótese en el gráfico de densidad los picos que hay por tipo de foto-receptor, esto resultará concluyente al momento de proponer las mejoras en el presente trabajo. (Puelles López y otros, 2008)

Estas células foto-receptoras tienen en su interior capas bi-lipídicas apiladas, dentro de las cuales se encuentran las proteínas sensibles a la luz, la rodopsina en el caso de los bastones y la conopsina en el caso de los conos. “Estas capas fotosensibles superpuestas actúan como “trampas” de luz y sólo son detectados los rayos de luz que chocan con una de las proteínas en alguna de las capas, transmitiendo así su energía” (Puelles López et al., 2008).

La rodopsina permanece desactivada en situaciones de alta luminosidad y es extremadamente sensible a cualquier longitud de onda visible, por ello sólo actúa en condiciones de baja intensidad luminosa (visión nocturna o penumbra) y no distingue colores. Debido a esto uno tiene que habituarse a la oscuridad cuando pasa de una zona iluminada a otra con menor luminosidad, ya que se tienen que recomponer los complejos rodopsina – retinal en los bastones (Dimieri, 2015).

2.1.1.3 Tipos de visión

Para fines del presente estudio, se realizará un breve resumen de los niveles de iluminación ambiente, o tipos de visión, a los que puede estar expuesto un ser humano. Como ya se sabe, el sistema visual es capaz de operar en un rango de 12 unidades logarítmicas, no obstante, no puede cubrir simultáneamente un rango mayor de 2 a 3 unidades logarítmicas de luminancia; es por esto por lo que se identifican tres rangos funcionales en donde la visión humana tiene un comportamiento distinto: escotópica, mesópica y fotópica.

Visión Escotópica

Se encuentra en un rango de luminancia comprendido entre 0 y 0.01 cd/m^2 . Destacan como características la inexistencia de la discriminación del color y la pobre discriminación de detalles, esto debido a que únicamente los bastones son los foto-receptores activos en este nivel de iluminación.

Visión Mesópica

Actualmente la CIE establece el intervalo de iluminación mesópica entre los valores de 0.005 cd/m^2 a 5 cd/m^2 estos datos se recogen en el informe de resultados definitivos de los trabajos llevados a cabo por el comité TC1-58. Como particularidades de la visión humana en condiciones mesópicas destacan: una reducida discriminación de detalles, una visión del color disminuida y una eficiencia luminosa desplazada hacia longitudes de onda media. En las condiciones de visión mesópicas están implicados tanto los conos como los bastones, células foto-receptoras acerca de las que se ahondó antes, en distintos grados de implicación dependiendo del nivel de iluminación mesópica analizado. Este tipo de visión es particularmente de interés para el estudio ya que es justamente para estas condiciones que se diseñan los sistemas de alumbrado público.

Visión Fotópica

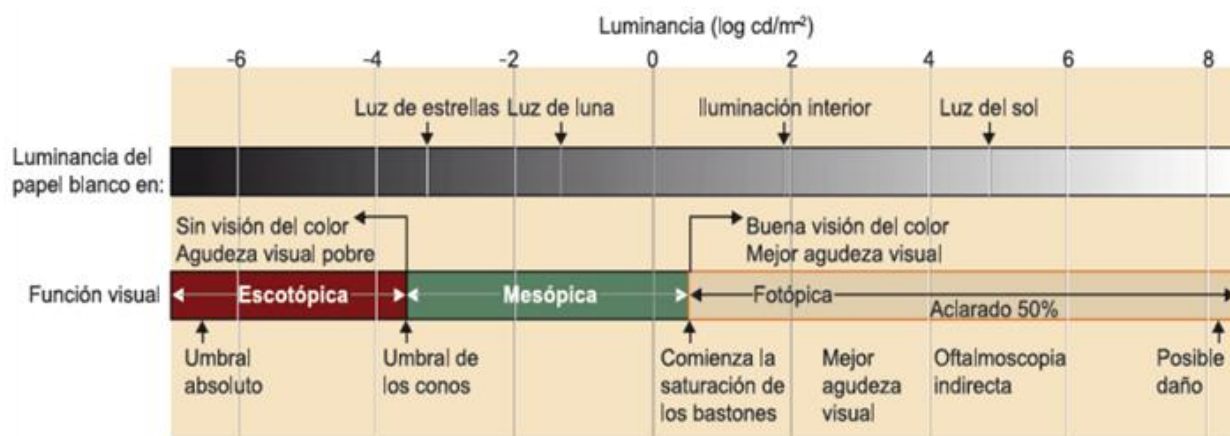
Actualmente y según el mismo estudio antes mencionado, la CIE considera 5 cd/m^2 como límite inferior de este rango de iluminación. Este nivel de iluminación se caracteriza por la correcta

discriminación en la visión del color, así como de los detalles. Esto se debe a que participan los fotorreceptores conos, que ofrecen una alta resolución espacial y un adecuado procesamiento de la visión del color.

Para resumir todo lo antes expuesto se presenta la figura 9 con los rangos de luminancia para estos 3 tipos de visión.

Figura 9

Rangos de Iluminación Ambiente y Tipo de Visión que Proporciona a un Observador Patrón



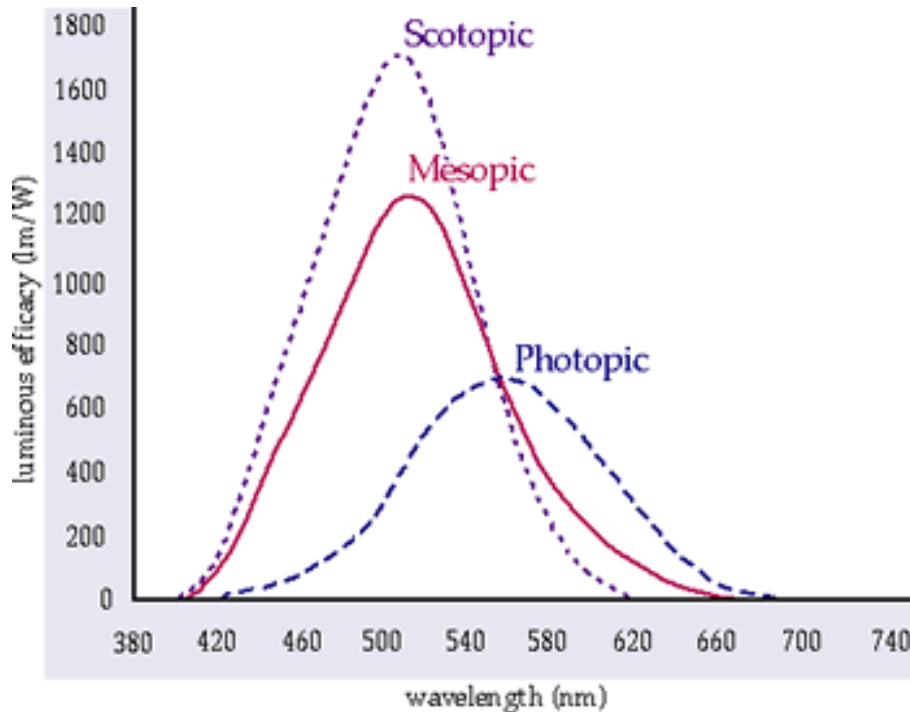
Nota: Los rangos de iluminación ambiente ayudan a facilitar la selección de luminarias y al diseño de la iluminación en función a características requeridas. (Navarro Valls, 2012)

2.1.1.4 Adaptación visual en condiciones de baja iluminación.

La capacidad del sistema visual para discriminar diferencias de intensidad se denomina adaptación y depende de la iluminación del entorno. En el documento técnico CIE 191:2010 elaborado por la comisión CIE TC1-58 sobre el rendimiento visual basado en la fotometría mesópica se describe la eficiencia espectral luminosa en la región mesópica $V_{mes}(\lambda)$ como una combinación lineal de la función de eficiencia espectral luminosa fotópica $V(\lambda)$ y la función de eficiencia espectral luminosa escotópica $V'(\lambda)$ y establece una transición gradual entre ambas funciones en toda la región mesópica, estableciendo el rango del nivel de iluminación mesópico entre 0.005 y 5 cd/m², lo cual se muestra en la figura 10 (Navarro Valls, 2012).

Figura 10

Curvas de eficiencia fotópica, mesópica y escotópica para el espectro visible



Nota: La eficiencia mesópica está por debajo de la eficiencia escotópica y sobre la fotópica, pero es importante observar en qué longitud de onda se encuentra la mayor concentración de cada tipo de eficiencia. (Halliday y otros, 2013)

Como ya se explicó antes, la transición a la visión mesópica se da cuando las proteínas existentes en los conos ya no reciben el mismo estímulo lumínico necesario y en contraste las proteínas que se encuentran en los bastones, que requieren un mínimo estímulo lumínico, reaccionan y se tienen que recomponer los complejos rodopsina – retinal en los bastones.

2.1.2. Fundamentos Teóricos de la Luz

Se hace una revisión de los conceptos fundamentales de la luz, el rango de visibilidad, el espectro de la luz, luminancia, iluminancia y radiación. Estos conceptos son esenciales para comprender los principios que guían el diseño de sistemas de alumbrado público basados en

criterios de visión mesópica, con el objetivo de mejorar la eficiencia energética y la calidad de la iluminación en zonas urbanas.

2.1.2.1 Concepto de Luz

La luz es una forma de radiación electromagnética que es perceptible al ojo humano. Se encuentra dentro de un rango específico del espectro electromagnético, con longitudes de onda comprendidas entre aproximadamente 380 nm (nanómetros) y 750 nm. La luz es esencial para la percepción visual humana y es el principal factor que permite la visualización de colores, formas y texturas en el entorno. Desde una perspectiva física, la luz puede describirse como una onda electromagnética caracterizada por su longitud de onda, frecuencia y velocidad (Halliday et al., 2013).

2.1.2.2 Rango de Visibilidad

El rango de visibilidad se refiere a las longitudes de onda del espectro electromagnético que son perceptibles al ojo humano. Como se mencionó anteriormente, este rango varía desde aproximadamente 380 nm hasta 750 nm. Dentro de este espectro, el ojo humano es más sensible a la luz verde-amarilla, alrededor de los 555 nm, en condiciones fotópicas (luz diurna). En condiciones mesópicas (transición entre luz diurna y nocturna), el rango de sensibilidad del ojo cambia hacia las longitudes de onda más cortas, alrededor de los 507 nm, donde la eficiencia visual es máxima debido a la combinación del funcionamiento de los conos y los bastones en la retina (Boyce, Human Factors in Lighting, 2014).

La sensibilidad del ojo humano a diferentes longitudes de onda varía en función del nivel de iluminación. En condiciones de alta iluminación (visión fotópica), los conos son los fotorreceptores predominantes y la sensibilidad es mayor en la región verde del espectro. En condiciones de baja iluminación (visión escotópica), los bastones son los fotorreceptores activos y la sensibilidad se desplaza hacia la región azul-verde del espectro (Rea, 2000).

2.1.2.3 Espectro de la Luz

El espectro de la luz visible es una pequeña parte del espectro electromagnético que incluye todas las longitudes de onda visibles por el ojo humano. Este espectro se divide convencionalmente en diferentes colores que corresponden a diferentes longitudes de onda:

- Violeta: 380-450 nm
- Azul: 450-495 nm
- Verde: 495-570 nm
- Amarillo: 570-590 nm
- Naranja: 590-620 nm
- Rojo: 620-750 nm

Cada color del espectro visible corresponde a una longitud de onda específica y tiene una energía asociada. La percepción de color en el ojo humano se debe a la respuesta diferencial de los conos a estas longitudes de onda. En la práctica del alumbrado público, la elección del espectro de emisión de las fuentes de luz es fundamental para optimizar la percepción visual y la eficiencia energética. Las lámparas LED, por ejemplo, permiten ajustar el espectro de emisión para maximizar la eficiencia en el rango mesópico (Schreuder, 2014).

2.1.2.4 Luminancia

La luminancia se define como la cantidad de luz emitida, reflejada, transmitida o recibida por una superficie en una dirección específica por unidad de área proyectada de esa superficie (Illuminating Engineering Society of North America (IESNA), 2011). La luminancia se mide en candelas por metro cuadrado (cd/m^2) y es una medida crucial para determinar cómo de brillante se percibe una superficie desde una dirección específica. En el contexto del alumbrado público, la luminancia es un factor importante para garantizar que las carreteras, aceras y otras áreas urbanas estén iluminadas de manera que sean visibles sin causar deslumbramiento.

La luminancia también es clave en el diseño de alumbrado para condiciones de visión mesópica, donde se busca un equilibrio entre la seguridad visual y la eficiencia energética. En niveles de luminancia más bajos, los bastones se activan, y la luminancia debe ajustarse para mantener la percepción visual óptima sin consumir más energía de la necesaria (Commission Internationale de l'Éclairage (CIE), 2010).

2.1.2.5 Iluminancia

La iluminancia es una medida de la cantidad de luz que incide sobre una superficie y se expresa en lux (lx), donde un lux equivale a un lumen por metro cuadrado (lm/m^2) (Rea, 2000). La iluminancia es crucial para la evaluación de la visibilidad y seguridad en áreas iluminadas. En el diseño de alumbrado público, la iluminancia se utiliza para asegurar que se logre un nivel adecuado de luz en las áreas de interés, como carreteras y aceras, de manera uniforme.

La uniformidad de la iluminancia es un factor crítico para prevenir zonas oscuras que puedan causar inseguridad o fatiga visual. En condiciones mesópicas, los niveles de iluminancia deben ser suficientes para activar tanto los conos como los bastones, sin exceder los niveles necesarios que podrían llevar a un desperdicio de energía (Schreuder, 2014).

2.1.2.6 Radiación

La radiación electromagnética en el contexto de la luz se refiere a la energía que se propaga a través del espacio en forma de ondas electromagnéticas. La luz visible es solo una pequeña parte del espectro electromagnético, que también incluye otros tipos de radiación como ultravioleta, infrarrojo, microondas y ondas de radio (Halliday et al., 2013).

La radiación en el rango visible es fundamental para la percepción visual, mientras que la radiación en el infrarrojo cercano puede ser relevante en tecnologías de iluminación que buscan optimizar la eficiencia energética. En sistemas de alumbrado público, la consideración de la radiación infrarroja puede ser importante para minimizar la pérdida de energía en forma de calor y maximizar la conversión de energía eléctrica en luz visible (Commission Internationale de l'Éclairage (CIE), 2010).

La comprensión de los conceptos de luz, rango de visibilidad, espectro de la luz, luminancia, iluminancia y radiación es fundamental para el diseño de sistemas de alumbrado público que sean eficientes y seguros. Al aplicar criterios de visión mesópica, es posible optimizar el uso de la energía y mejorar la calidad de la iluminación en entornos urbanos, contribuyendo a la sostenibilidad y a la seguridad de los usuarios.

2.1.3. Visión Mesópica

2.1.3.1 Definición y características

La visión mesópica es un rango de visión humana que ocurre en condiciones de iluminación que están entre las de la visión fotópica (iluminación diurna o de luz brillante) y la visión escotópica (iluminación de muy baja luz, como la luz estelar). Específicamente, la visión mesópica se experimenta en niveles de iluminación que oscilan entre aproximadamente 0.001 y 3 cd/m² (candelas por metro cuadrado) (Boyce, Human Factors in Lighting, 2014). Este tipo de visión es común en situaciones como el crepúsculo, la iluminación nocturna en exteriores y en interiores con luz tenue, donde tanto los conos como los bastones de la retina están activos, pero ninguno opera en su máxima eficiencia (Rea, 2000).

Para tener muy clara la definición de este rango de visión se mencionarán las principales características:

Interacción de Conos y Bastones: Durante la visión mesópica, tanto los bastones (responsables de la visión en condiciones de baja iluminación) como los conos (responsables de la visión de color y detalles en condiciones de alta iluminación) participan en el proceso visual. Sin embargo, ninguno de estos dos tipos de células fotorreceptoras funciona en su rango óptimo. En condiciones mesópicas, los bastones comienzan a saturarse y los conos comienzan a ser lo suficientemente sensibles como para contribuir a la percepción visual, creando una transición entre la visión en color y en blanco y negro (ISO 8995-1, 2002).

Sensibilidad al Color: La percepción del color en condiciones mesópicas se ve afectada debido a la disminución de la eficiencia de los conos y al aumento de la participación de los

bastones, que no son sensibles al color. La sensibilidad al color es inferior a la de la visión fotópica, lo que puede resultar en una percepción del color más apagada y desaturada (Commission Internationale de l'Éclairage (CIE), 2010). El efecto Purkinje, en el cual los objetos rojos parecen más oscuros que los azules bajo condiciones de iluminación tenue, es más pronunciado en la visión mesópica (Boyce, Human Factors in Lighting, 2014).

Adaptación Visual: El ojo humano experimenta un proceso de adaptación cuando se mueve entre diferentes niveles de iluminación. Durante la visión mesópica, el sistema visual se encuentra en una transición de adaptación entre los modos escotópico y fotópico, lo cual puede afectar la velocidad de respuesta y la agudeza visual (Rea, 2000). La sensibilidad a la luz y la agudeza visual se encuentran en un estado intermedio, con la agudeza visual disminuida en comparación con la visión fotópica debido a la menor densidad de conos activos (ISO 8995-1, 2002).

Distribución de Sensibilidad: En el rango mesópico, la sensibilidad espectral del ojo humano cambia gradualmente de la curva de sensibilidad fotópica (centrada en los 555 nm, correspondiente a la luz verde) a la curva de sensibilidad escotópica (centrada en los 507 nm, correspondiente a la luz azul-verde). Esto significa que, en condiciones mesópicas, el ojo humano es relativamente más sensible a la luz de longitud de onda más corta (azul-verde) (Commission Internationale de l'Éclairage (CIE), 2010).

Aplicaciones Prácticas y Relevancia: La comprensión de la visión mesópica es fundamental para áreas como el diseño de iluminación vial, la seguridad en el tráfico, la ergonomía en entornos laborales con poca luz, y la mejora de la eficiencia energética en iluminación (Rea, 2000). Se utiliza en la evaluación de sistemas de iluminación que buscan optimizar la visibilidad y el confort visual bajo condiciones de luz mixta, como las farolas o los sistemas de iluminación de emergencia (Boyce, Human Factors in Lighting, 2014).

2.1.4. Tecnologías de Alumbrado Público

El alumbrado público constituye un componente esencial dentro de la infraestructura urbana, ya que su función principal es proporcionar iluminación adecuada en espacios exteriores como calles, avenidas, plazas, parques, paseos peatonales y áreas comunes. Esta iluminación cumple un rol fundamental para garantizar la seguridad vial y peatonal, permitiendo una correcta visibilidad durante la noche o en condiciones de baja luminosidad. Además, contribuye directamente a mejorar la calidad de vida de los habitantes, al fomentar la movilidad segura y el uso nocturno de los espacios públicos, lo que incrementa la percepción de bienestar y confianza en la comunidad. De igual manera, un sistema de alumbrado bien diseñado ayuda a reducir la incidencia de delitos y accidentes, generando entornos urbanos más seguros y habitables.

En las últimas décadas, las tecnologías aplicadas al alumbrado público han experimentado una notable evolución. Se ha pasado de las fuentes de luz tradicionales —como las lámparas incandescentes, de mercurio y de vapor de sodio— a soluciones más avanzadas, eficientes y sostenibles. Entre ellas destacan los diodos emisores de luz (LED, por sus siglas en inglés), que ofrecen un mayor rendimiento luminoso, menor consumo energético y una vida útil considerablemente más prolongada. Asimismo, la incorporación de sistemas de iluminación inteligente ha permitido integrar sensores, controladores y plataformas de gestión remota que optimizan el consumo eléctrico, facilitan el mantenimiento preventivo y adaptan los niveles de iluminación según las condiciones del entorno o la hora del día. Estas innovaciones no solo incrementan la eficiencia energética y reducen los costos operativos, sino que también contribuyen a los objetivos globales de sostenibilidad y mitigación del impacto ambiental asociado al uso de energía.

2.1.4.1 Tecnologías de Iluminación

Tecnologías Tradicionales

Las tecnologías de alumbrado público tradicionales incluyen las lámparas incandescentes, fluorescentes y de descarga de alta intensidad (HID), como las lámparas de

vapor de mercurio y de sodio. Estas tecnologías, aunque eficaces en su tiempo, presentan desventajas significativas en términos de eficiencia energética y vida útil. Por ejemplo, las lámparas de vapor de sodio de alta presión (HPS) han sido populares debido a su alta eficiencia lumínica y bajo costo inicial, pero su calidad de luz (monocromática y amarilla) limita la reproducción del color y la visibilidad en ciertas condiciones climáticas como se observa en la figura 11 (Rea, 2000).

Figura 11

Vía Pública con Luminarias de Vapor de Sodio



Nota: Las luminarias de Vapor de Sodio han sido utilizadas casi por tradición en la iluminación pública, hasta la llegada de las luminarias LED. (Rea, 2000)

Iluminación LED

La tecnología LED ha revolucionado el alumbrado público debido a su alta eficiencia energética, larga vida útil, y capacidad para ofrecer una luz de alta calidad. Los LED's consumen significativamente menos energía en comparación con las tecnologías de alumbrado tradicionales y tienen una vida útil más prolongada, lo que reduce los costos de mantenimiento y reemplazo (Gustavsen et al., 2014). Además, la iluminación LED permite un control preciso del

espectro de luz, lo que mejora la reproducción del color y la visibilidad, y puede ser ajustada para reducir la contaminación lumínica y minimizar los efectos adversos en la salud humana y la fauna nocturna (Schubert & Kim, 2005). Se visualiza una vía pública con iluminación de tipo LED en la figura 12.

Figura 12

Iluminación de tipo LED en Vía Pública



Nota: La iluminación LED es mucho más eficiente y proporciona diversas configuraciones para distintos tipos de aplicaciones. (Gustavsen y otros, 2014)

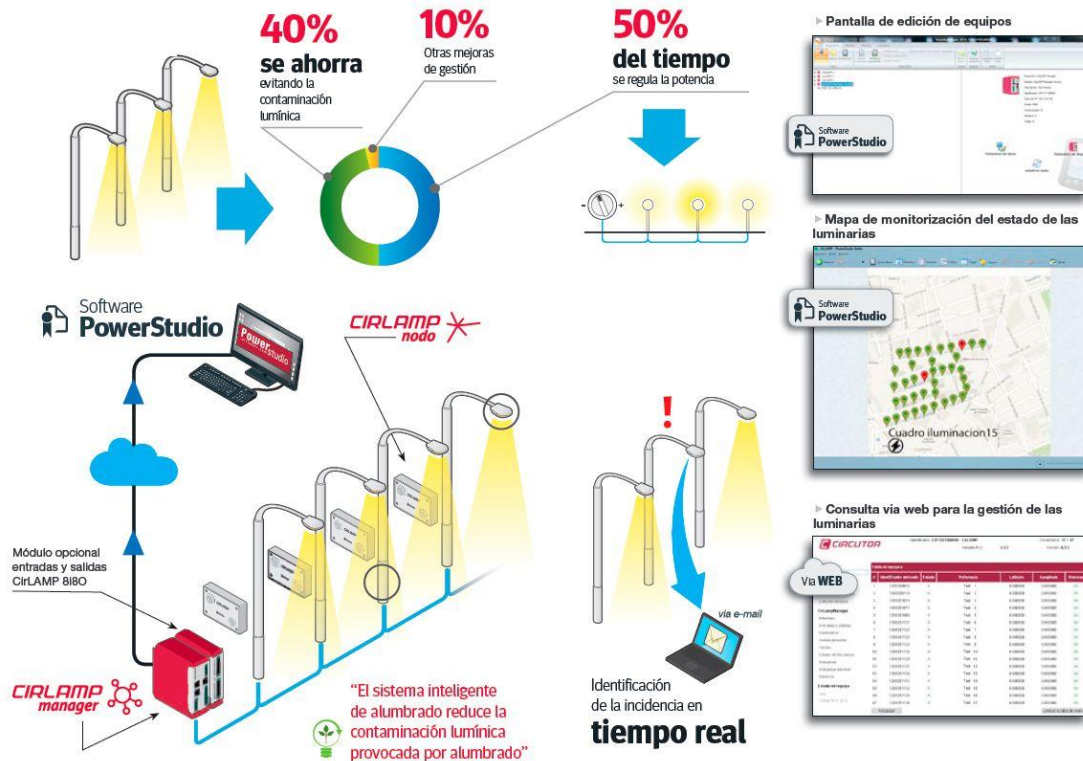
Iluminación Inteligente

La iluminación inteligente es la integración de sistemas de control avanzado con tecnologías de iluminación, como los LED, para optimizar el consumo energético y mejorar la funcionalidad del alumbrado público. Los sistemas de iluminación inteligente incluyen sensores de movimiento, fotocélulas, y redes de comunicación que permiten el ajuste automático de los niveles de iluminación en función de la presencia de personas o vehículos y de las condiciones

ambientales (Becchio et al., 2020). Esta tecnología no solo mejora la eficiencia energética, sino que también proporciona datos valiosos para la gestión del tráfico y la planificación urbana como se puede observar en el esquema de funcionamiento de la figura 13.

Figura 13

Esquema de Funcionamiento de un Sistema Inteligente de Alumbrado



Nota: Comprender cómo se realiza la gestión inteligente del alumbrado público muestra el potencial que tiene y la urgencia de su implementación. (Circutor, 2014)

Tecnologías Solares y de Energía Renovable

La incorporación de energías renovables en el alumbrado público es otra tendencia creciente. Las farolas solares, que combinan paneles fotovoltaicos con baterías de almacenamiento, son una solución sostenible y eficiente para áreas urbanas y rurales, especialmente en regiones con acceso limitado a la red eléctrica. Estas tecnologías reducen la

dependencia de fuentes de energía no renovables y permiten un alumbrado autónomo y sostenible (Gokhale et al., 2019).

Figura 14

Farolas Solares para Ciudades Inteligentes



Nota: Las luminarias con alimentación solar son una opción altamente eficiente y genera un impacto positivo en la reducción de la contaminación ambiental. (Orange, 2022)

Las tecnologías de alumbrado público han avanzado significativamente desde las lámparas tradicionales hasta los sistemas inteligentes y energéticamente eficientes de hoy en día. La adopción de tecnologías como los LED y la iluminación inteligente, así como la integración de energías renovables, han transformado cómo las ciudades gestionan su infraestructura de iluminación, contribuyendo a la sostenibilidad y a la mejora de la calidad de vida urbana.

2.1.4.2 Comparación de eficiencia energética y rendimiento lumínico

2.1.5. Normativas y Estándares

2.1.5.1 Normativas y Regulaciones Locales.

En Perú, el diseño y la implementación de sistemas de alumbrado público están regidos por una serie de normativas que buscan garantizar la eficiencia energética, la seguridad, y la sostenibilidad. Algunas de las normativas más relevantes incluyen:

Norma Técnica Peruana (NTP) 370.011-1

Esta norma establece los criterios técnicos para la iluminación de vías y áreas públicas, incluyendo niveles de iluminación, uniformidad, y restricciones de deslumbramiento. También se detallan los procedimientos para medir y evaluar la calidad del alumbrado.

Reglamento Nacional de Edificaciones (RNE)

El RNE incluye disposiciones sobre el alumbrado público en su sección de instalaciones eléctricas. Específicamente, se enfoca en asegurar que las instalaciones sean seguras y eficaces, cumpliendo con los requisitos mínimos de iluminación para diferentes tipos de vías y áreas públicas.

Ley de Promoción del Uso Eficiente de la Energía (Ley N° 27345)

Esta ley promueve el uso racional y eficiente de la energía en todos los sectores, incluyendo el alumbrado público. Establece incentivos para la adopción de tecnologías de iluminación eficientes, como las lámparas LED, que son más económicas y duraderas que las tradicionales.

Estas normativas locales no solo aseguran la correcta implementación de los sistemas de alumbrado, sino que también alinean a Perú con las mejores prácticas internacionales en términos de eficiencia energética y sostenibilidad, garantizando la mejor experiencia para los usuarios.

2.1.5.2 Criterios de Diseño de Alumbrado Público

El diseño de sistemas de alumbrado público debe considerar varios factores clave para asegurar su efectividad y sostenibilidad. Estos incluyen:

Niveles de Iluminación y Uniformidad

Según la NTP 370.011-1, los niveles de iluminación varían dependiendo del tipo de vía (principal, secundaria, peatonal) y del uso del área (residencial, comercial, industrial). Es fundamental que la luz se distribuya de manera uniforme para evitar zonas de sombra que puedan comprometer la seguridad.

Eficiencia Energética

La eficiencia energética es un criterio crucial en el diseño de alumbrado público. La Ley N° 27345 fomenta el uso de tecnologías de iluminación que reduzcan el consumo energético. En este contexto, las luminarias LED han ganado popularidad debido a su alta eficiencia y larga vida útil. También se promueve el uso de sistemas de control que regulen la intensidad de la iluminación según la hora del día o la presencia de personas.

Control del Deslumbramiento

El deslumbramiento puede ser un problema importante en el alumbrado público, ya que puede afectar la visibilidad de los conductores y peatones. La normativa NTP 370.011-1 establece límites para el deslumbramiento, especificando técnicas de instalación y tipos de luminarias que minimicen este efecto.

Impacto Ambiental y Contaminación Lumínica

La contaminación lumínica es otro factor para considerar. En Perú, se están adoptando medidas para reducir la luz intrusa y la dispersión de luz hacia el cielo nocturno, lo que no solo preserva el medio ambiente, sino que también mejora la eficiencia del sistema al dirigir la luz únicamente donde es necesaria.

2.1.6. Visión Mesópica y su Importancia en el Alumbrado Público

La visión mesópica se da en condiciones de iluminación típicas de la noche urbana, como las proporcionadas por el alumbrado público. En este rango, tanto los conos como los bastones están activos, lo que implica que la sensibilidad espectral del ojo cambia. Este cambio en la sensibilidad afecta cómo se perciben las diferentes longitudes de onda de luz, lo que tiene implicaciones directas para el diseño del alumbrado público.

En la visión mesópica, el ojo humano es más sensible a la luz en el rango de 507 nm (más cerca del azul-verde) en comparación con la luz en el rango fotópico, donde la sensibilidad máxima es de 555 nm (verde-amarillo) (Goodman, 2010). Esto significa que las fuentes de luz diseñadas para la visión fotópica no son óptimas para la visión mesópica y pueden llevar a un

uso ineficiente de la energía. Por lo tanto, al diseñar sistemas de alumbrado público que optimicen la iluminación en este rango mesópico, se puede mejorar la visibilidad nocturna y reducir el consumo de energía (Fotios & Gibbons, 2018).

2.1.7. *Sistemas de Alumbrado Público y Criterios de Diseño*

Tradicionalmente, el alumbrado público ha sido diseñado utilizando criterios basados en la visión fotópica, lo que lleva a la selección de fuentes de luz que maximizan la percepción visual bajo niveles de luz más altos. Sin embargo, este enfoque no toma en cuenta la eficiencia visual en condiciones mesópicas, lo que resulta en un uso excesivo de energía para proporcionar niveles de iluminación que no son necesarios para la mayoría de las situaciones nocturnas en entornos urbanos.

Para mejorar la eficiencia energética, es crucial considerar la respuesta mesópica del ojo humano al diseñar sistemas de alumbrado público. Esto puede lograrse utilizando fuentes de luz que emiten en longitudes de onda a las que el ojo es más sensible en condiciones mesópicas. Según la CIE 191:2010, el uso de un sistema de fotometría mesópica puede ayudar a optimizar la iluminación pública al reducir el brillo necesario sin comprometer la seguridad ni la percepción visual (Commission Internationale de l'Éclairage (CIE), 2010).

2.1.8. *Eficiencia Energética y Alumbrado Público*

El alumbrado público es una de las principales fuentes de consumo de energía en las zonas urbanas. Al integrar criterios mesópicos en el diseño de sistemas de alumbrado, es posible reducir significativamente este consumo. Por ejemplo, la implementación de fuentes de luz LED ajustadas para maximizar la eficiencia en el rango mesópico ha demostrado ser eficaz en la reducción de la demanda energética mientras se mantiene o mejora la calidad de la iluminación (Stevanovic & Radulodic, 2020).

La eficiencia energética en este contexto no solo se refiere a la cantidad de luz emitida por vatio consumido, sino también a cómo se percibe esa luz por los usuarios de la vía pública. Un enfoque mesópico permite reducir los niveles de iluminación, manteniendo una percepción

visual adecuada, lo que conlleva a una disminución en el consumo energético total y una reducción en los costos operativos (Boyce et al., Road Lighting and energy saving, 2009).

La eficiencia energética se define técnicamente como la capacidad de un sistema de alumbrado para ofrecer un nivel de servicio conforme a normas, utilizando la menor cantidad de energía posible, es decir que su evaluación dependerá de dos variables medibles: el nivel de servicio de alumbrado y la cantidad de energía que consume dicho sistema; el primero es medible mediante técnicas de medición descritas y establecidas por organismos rectores en la materia de cada país o supranacionales mientras que la segunda se mide utilizando equipos y métodos empleados en el sector eléctrico en general y depende directamente de la potencia instalada del sistema de alumbrado público (García Gil y otros, 2012).

2.1.9. Aplicación en Zonas Urbanas

En las zonas urbanas, la demanda de un alumbrado público eficiente es particularmente alta debido a la constante actividad nocturna. Implementar sistemas de alumbrado que optimicen la luz en el rango mesópico puede mejorar la visibilidad para peatones y conductores, reducir la contaminación lumínica y ahorrar costos para las administraciones municipales (Zhang & Zhao, 2018).

Al aplicar principios de visión mesópica en el diseño de alumbrado urbano, se pueden lograr mejoras significativas en la eficiencia energética, lo que también contribuye a la sostenibilidad ambiental. Esto es especialmente importante en un contexto donde las ciudades están buscando constantemente reducir su huella de carbono y sus costos energéticos.

De manera pragmática, para asegurar que la luminaria instalada cumpla con los criterios de visión mesópica sin disminuir la calidad de visión, se debe ajustar tanto el nivel de intensidad de luz (luminancia) como la distribución espectral de la luminaria. A continuación, se mencionan las formas propuestas para poder aplicar los criterios de visión mesópica al alumbrado público existente.

Ajustar la Intensidad de Luz: Reducir el voltaje o la corriente de la luminaria: Esto es efectivo para disminuir la salida de luz (luminancia). Sin embargo, este ajuste debe hacerse cuidadosamente porque reducir demasiado la intensidad puede comprometer la visibilidad y la seguridad de los peatones y conductores. Para la visión mesópica, lo ideal es mantener la luminancia en el rango de 0.005 a 5 cd/m². Utiliza un dimmer o controlador de intensidad que te permita ajustar la salida lumínica a niveles óptimos sin sobrepasar estos umbrales.

Optimizar la Distribución Espectral: Usar luminarias con temperatura de color ajustable o seleccionar luminarias con un espectro adecuado: Para la visión mesópica, las luminarias deben emitir luz en el rango azul-verde (cerca de 507 nm). Si las luminarias actuales permiten el ajuste de la temperatura de color, ajústalas a un rango de 4000K a 5000K, que se ha demostrado que es más eficiente para condiciones mesópicas. Si las luminarias no permiten ajustes, considera reemplazarlas con aquellas que tengan un espectro de emisión más adecuado para la visión mesópica.

Implementar Controladores de Luz Inteligentes: Instalar sensores de luz ambiental y movimiento: Estos sensores pueden ajustar automáticamente la intensidad de las luminarias basándose en las condiciones ambientales y la presencia de peatones o vehículos. Esto no solo mejora la eficiencia energética, sino que también asegura que la iluminación se optimice para la seguridad y la calidad de visión.

Reducir el Deslumbramiento: Ajustar el ángulo de inclinación de la luminaria: La orientación de la luminaria puede influir significativamente en el deslumbramiento percibido. Ajustar el ángulo de inclinación de las luminarias para minimizar la luz directa hacia los ojos de los peatones y conductores puede mejorar la comodidad visual y reducir los efectos negativos asociados con la alta intensidad lumínica.

Realizar Pruebas de Campo y Ajustes Finales: Se debe utilizar un luxómetro para medir la cantidad de luz en diferentes puntos de la vía y ajustar la configuración de las luminarias

en función de los resultados. Los niveles de iluminación deben ser consistentes con los criterios de visión mesópica y que no haya áreas con sobre-iluminación o sub-iluminación.

Actualizar el Firmware o el Software de Control: Si las luminarias son parte de un sistema de iluminación inteligente, verificar que el software esté actualizado y configurado para operar en modo mesópico durante las horas nocturnas.

Reducir el voltaje o la corriente puede ser un método inicial para ajustar la intensidad de la luz, pero es fundamental realizar estos cambios de manera controlada para no afectar negativamente la visibilidad y la seguridad. Además, combinar estos ajustes con mejoras en la distribución espectral y la implementación de tecnologías de control inteligentes asegurará que las luminarias cumplan de manera efectiva con los criterios de visión mesópica sin comprometer la calidad de visión de los usuarios.

2.2. Marco Conceptual

A continuación, se detallan conceptos importantes para una adecuada lectura del presente documento:

- **Sistema de alumbrado público**

Conjunto interrelacionado de elementos (luminarias, postes, cableado, canalización y sistemas de control) destinados a iluminar vías, zonas peatonales y áreas comunes en espacios exteriores. Su propósito es garantizar visibilidad, seguridad y confort, especialmente durante las horas nocturnas. En la tesis, este sistema se analiza en dos condiciones: la versión actualmente operativa (tradicional) y una rediseñada bajo criterios mesópicos.

- **Iluminación vial**

Rama de la iluminación urbana centrada en garantizar condiciones de visibilidad seguras para peatones y vehículos. Incluye estándares de nivel de luz (lux), uniformidad y control de deslumbramiento, cuantificados mediante normativas específicas como la EN 13201 que garantizan la calidad y seguridad visual.

- **Luminaria LED**

Luminarias que incorporan diodos emisores de luz (LED), caracterizadas por su alta eficiencia energética, bajo consumo y larga vida útil (30 000–50 000 horas). Permiten regulación, telegestión y ajuste espectral, lo que las convierte en ideales para aplicaciones mesópicas.

- **Eficiencia energética**

capacidad de un sistema de iluminación para cumplir con los niveles de servicio exigidos por normativa, utilizando la menor cantidad de energía posible. Su evaluación se basa en la relación entre el nivel de servicio ofrecido y el consumo energético asociado (García Gil et al., 2012).

- **Ahorro energético**

Disminución porcentual del consumo comparado con un sistema base. Ejemplo: reducir 1.000 kWh/mes a 600 kWh/mes implica un ahorro del 40 %. Este indicador permite medir el impacto de implementar criterios mesópicas.

- **Consumo eléctrico (kWh)**

Unidad acumulativa que mide la energía eléctrica utilizada por el sistema de iluminación en un periodo de tiempo, generalmente mensual. Permite calcular costos operativos y estimar ahorro monetario al aplicar nuevas estrategias de diseño.

- **Diseño luminotécnico**

Proceso técnico que define la selección de luminarias, disposición espacial, niveles de luz, temperatura de color, ángulos de distribución y otros factores para cumplir con las condiciones visuales deseadas, seguridad normativa y eficiencia energética.

- **Calidad visual nocturna**

Valoración del entorno nocturno iluminado por parte de los usuarios, considerando claridad, uniformidad, reducción de zonas oscuras o destello y sensación de bienestar. Se mide mediante iluminancia, uniforme de luz y ausencia de deslumbramiento.

- **Confort visual**

Percepción subjetiva de bienestar visual en un ambiente iluminado, caracterizada por la ausencia de fatiga ocular, tolerancia a cambios de luz, y sensación de claridad y tranquilidad al transitar o trabajar bajo la iluminación.

- **Seguridad peatonal**

Percepción de protección y reducción de riesgo de accidentes o delitos durante la noche. La iluminación adecuada mejora la visibilidad de obstáculos y personas, reduciendo víctimas y delitos nocturnos.

- **Visión humana**

Capacidad del sistema visual (ojos + cerebro) para captar luz y procesar imágenes. Puede funcionar bajo tres regímenes: fotópico (alta luz), mesópico (luz intermedia) y escotópico (luz muy baja).

- **Visión fotópica**

Tipo de visión dominante en condiciones de luz elevada, en la que predominan los conos retinianos, mecanismos sensibles al color y permite una percepción detallada. Se basa en la curva espectral $V(\lambda)$.

- **Visión escotópica**

Ocurre en condiciones de oscuridad extrema, donde solo funcionan los bastones retinianos. Se caracteriza por sensibilidad aumentada al movimiento, pero pobre percepción de color.

- **Visión mesópica**

Estado de transición visual ($0.005 - 5 \text{ cd/m}^2$) en el que ambos fotorreceptores están involucrados. Afecta la percepción visual y da lugar a discrepancias entre lo medido (fotópico) y lo percibido por los usuarios. Requiere metodologías específicas como la base espectral corregida según la CIE 191:2010.

- **Percepción visual**

Proceso mediante el cual el cerebro interpreta señales luminosas como colores, formas o movimiento. Depende de la claridad, contraste, uniformidad e iluminación ambiental.

- **Adaptación luminosa**

Capacidad del ojo para ajustarse a cambios de iluminación. Al pasar de zonas brillantes a oscuras se produce un proceso de adaptación que puede durar varios minutos, denominado adaptativo lento.

- **Sensibilidad espectral**

Eficiencia de respuesta visual a distintas longitudes de onda (color). Las diferentes fuentes de luz (LED, sodio) tienen diferentes perfiles espectrales, lo cual afecta la percepción del usuario.

- **Índice S/P (Scotopic/Photopic)**

Medida de sensibilidad relativa entre visión escotópica y fotópica de una fuente de luz. Un alto valor S/P indica mejor adecuación al rango mesópico.

- **Iluminancia (lux)**

Luz incidente sobre una superficie; $1 \text{ lux} = 1 \text{ lúmen/m}^2$. Se define con valores promedio (E_{avg}) y mínimos (E_{min}).

- **Luminancia (cd/m^2)**

Brillo visible de una superficie iluminada; útil para calcular deslumbramiento y visibilidad en situaciones de iluminación.

- **Uniformidad luminosa**

Distribución homogénea de la luz; se calcula con $U_0 = E_{\text{min}}/E_{\text{avg}}$, y la norma sugiere valores mínimos (≥ 0.4) para seguridad y confort visual.

- **Deslumbramiento (glare)**

Cuando una luz es tan brillante que causa molestia o disminuye la visibilidad. Se mide con el Índice TI, que expresa el porcentaje en que aumenta el umbral de visión por ese efecto.

- **Índice TI (Threshold Increment)**

Porcentaje de luz adicional necesaria para mantener el umbral visual cuando hay deslumbramiento. Un valor menor indica menor impacto visual.

- **Temperatura de color (CCT)**

Representa el color de la luz (cálido, neutro o frío) y su impacto psicológico y visual; medido en Kelvin (K).

- **Iluminación Mesópica**

Tipo de iluminación diseñada con parámetros de visión mesópica adaptada a la visión con ausencia de luz natural, situación que utiliza el alumbrado público.

- **Dialux Evo**

Herramienta computacional para diseñar y simular sistemas de iluminación según parámetros técnicos, normativa y planes lumínicos.

- **Norma CIE 115:2010**

Estándar para medir eficiencia energética y confort visual en iluminación urbana pública.

- **Norma CIE 191:2010**

Guía para medir condiciones mesópicas, ajustando iluminancia a modo perceptual.

- **Norma EN 13201 2:2015**

Estándar europeo con requisitos de iluminación urbana (niveles, uniformidad, TI).

- **RM 460 2021 MINEM**

Normativa peruana que establece lineamientos y estándares de eficiencia energética para el alumbrado público.

CAPÍTULO III.

Desarrollo del Trabajo de Investigación

3.1. Revisión del estado situacional del diseño de Alumbrado Público Actual

Alumbrado Público dentro del Campus de la Universidad Nacional de Ingeniería.

3.1.1. Norma Técnica Vigente

El diseño y la implementación del alumbrado público en Perú están regulados por la Norma Técnica Peruana (NTP) 370.011-1. Esta norma establece los requisitos técnicos para garantizar niveles adecuados de iluminación, eficiencia energética y seguridad en las vías públicas. Los aspectos más relevantes de la NTP 370.011-1 incluyen:

3.1.1.1 Niveles de Iluminancia

La normativa define los niveles mínimos de iluminancia (medidos en lux) para diferentes categorías de vías, asegurando una visibilidad adecuada para conductores y peatones.

Tabla 2

Niveles de Iluminancia Normativa Peruana - 2003

Tipo de alumbrado	Luminancia media revestimiento seco (cd/m ²)	Iluminancia media (lux)		Índice de control de deslumbramiento (G)
		Calzada clara	Calzada oscura	
		I	1.5 – 2.0	
II	1.0 – 2.0	10 – 20	20 – 40	5 – 6
III	0.5 – 1.0	5 – 10	10 – 20	5 – 6
IV		2 – 5	5 – 10	4 – 5
V		1 - 3	2 – 6	4 – 5

Nota: Tomado de DGE Norma Peruana - 2003

La tabla anterior muestra la iluminancia media que establece la normativa peruana del 2003 según el tipo de vía, además del índice de control de deslumbramiento y la luminancia

media para cada caso. En la siguiente tabla se muestran los Estándares Lumínicos Por Tipo de Alumbrado, tabla que se obtiene de la Modificatoria a la Normativa de Iluminación Pública en el Perú realizada en el 2021:

Tabla 3

Estándares Lumínicos por Tipo de Alumbrado - DGE 2021

Clasificación Vial	Tipo de Alumbrado	Luminancia Media (cd/m ²) Superficie seca	Uniformidad General de Luminancia U ₁	Uniformidad Longitudinal de Luminancia U ₀	Iluminancia Media (lux)	Uniformidad Media de Iluminancia U _c	Incremento de Umbral TI (%)	Relación de entorno SR
Expresa 1	I A	2,0 - 2,7	≥ 0,4	≥ 0,7	40 - 55	≥ 0,55	≤ 10	≥ 0,5
Expresa 2	I B	1,75 - 2,4	≥ 0,4	≥ 0,7	35 - 50	≥ 0,50	≤ 10	≥ 0,5
Arterial	II	1,5 - 2,0	≥ 0,4	≥ 0,65	30 - 40	≥ 0,40	≤ 10	≥ 0,5
Colectora 1	II	1,5 - 2,0	≥ 0,4	≥ 0,65	30 - 40	≥ 0,40	≤ 10	≥ 0,5
Colectora 2	III	0,75 - 1,0	≥ 0,40	≥ 0,50	25 - 35	≥ 0,30	≤ 15	≥ 0,5
Local Comercial	III	0,75 - 1,0	≥ 0,40	≥ 0,50	25 - 35	≥ 0,30	≤ 15	≥ 0,5
Local Residencial 1	IV	0,5 - 0,7	≥ 0,35	≥ 0,45	10 - 15	≥ 0,25	≤ 15	≥ 0,5
Local Residencial 2	V	0,3 - 0,4	≥ 0,35	≥ 0,40	7,5 - 12	≥ 0,20	≤ 20	≥ 0,5
Vía Peatonal	VI	---	---	---	5 - 10	≥ 0,15	≤ 20	---
Local Comercial-A	III-A	---	---	---	8 - 15	≥ 0,30	≤ 20	≥ 0,5
Local Residencial-1A	IV-A	---	---	---	4 - 8	≥ 0,15	≤ 25	≥ 0,5
Local Residencial-2A	V-A	---	---	---	2 - 4	≥ 0,15	≤ 25	≥ 0,5
Vía Peatonal-A	VI-A	---	---	---	2 - 4	≥ 0,15	≤ 30	≥ 0,5
Vía Rural	VII	---	NA	NA	LUZ GUÍA	NA	NA	NA

Nota: Tomado de Norma Peruana DGE - 2021

3.2. Trabajo de Campo y Recolección de Datos

El objetivo de este apartado es obtener datos experimentales sobre la iluminación pública existente en un entorno real, para fines de este estudio el entorno real que se utilizó y que representa la muestra de la población en estudio son las inmediaciones del campus universitario de la Universidad Nacional de Ingeniería; para dicho efecto se describe de manera ordenada y cronológica el procedimiento que se siguió para dicha recolección de datos, clasificando las etapas por importancia y diferencia de actividades según se muestra a continuación.

3.2.1. Selección de puntos de medición

Para seleccionar los puntos de medición se han utilizado los siguientes criterios, asegurando que cada punto pueda cumplir con cada criterio:

Tipo de luminaria: Se escogen puntos representativos con cada tipo de luminaria en el estudio

Luminaria para tránsito peatonal y de automóviles: Dada la naturaleza del estudio, cada punto de medición debe estar asociado a una luminaria que alumbré tanto peatones como automóviles.

Altura de la luminaria: Los puntos de medición deben representar la situación real de toda la población del estudio, no solo de la muestra. Esto debe ir en concordancia con lo establecido en la normativa peruana de iluminación.

Influencia de Iluminación Externa: En lo posible el punto debe tener la iluminación sólo de la luminaria en estudio/medición sin presencia de iluminancia proveniente de otras fuentes.

De acuerdo con estos criterios de selección se han determinado los siguientes puntos de medición:

3.2.1.1 Exteriores de InfoUNI

Este punto de encuentra ubicado en el exterior de INFOUNI, instituto perteneciente a la Facultad de Ingeniería Mecánica, se precisa la ubicación en una vista satelital de “Google Maps” para mayor precisión.

En este punto se hizo la medición a una luminaria de tipo LED, a una altura de 5 metros, la medición se realizó a las 20 horas.

Figura 15

Ubicación Satelital - Exteriores InfoUni



Nota: Vista Satelital obtenida de “Google Maps” con la ubicación en mención resaltada

3.2.1.2 Exteriores Facultad de Ingeniería Química y Textil

Este punto se encuentra ubicado en las afueras de la Facultad de Ingeniería Química y Textil, hacia el lado del gimnasio de la universidad en mención, se precisa la ubicación en una vista satelital de “Google Maps” para mayor precisión.

En este punto se hizo la medición a una luminaria de tipo Vapor de Sodio, a una altura de 9.6 metros, la medición se realizó a las 21 horas.

Figura 16

Ubicación Satelital - Luminaria Facultad de Ingeniería Química y Textil



Nota: Vista Satelital obtenida de “Google Maps” con la ubicación en mención resaltada

3.2.1.3 Exteriores Facultad de Ingeniería Industrial y de Sistemas

Este punto se encuentra ubicado en las afueras de la Facultad de Ingeniería Industrial y de Sistemas, cerca del Instituto de Soldadura, se precisa la ubicación en una vista satelital de “Google Maps” para mayor precisión.

En este punto se hizo la medición a una luminaria de tipo Halogenuro Metálico, a una altura de 10.2 metros, la medición se realizó a las 21 horas.

Figura 17

Ubicación Satelital - Facultad de Ingeniería Industrial y de Sistemas



Nota: Vista Satelital obtenida de “Google Maps” con la ubicación en mención resaltada

3.2.2. Medición de Iluminancia

Para iniciar este apartado, se muestra una imagen inicial donde se visualiza cómo se realizó las mediciones, es importante verificar la posición de medición, ya que debe estar lo más cerca posible a proyección perpendicular de la luminaria. A continuación, se muestra la imagen de la medición de Iluminancia para mostrar cómo se realizó el procedimiento, se ve que la persona que realiza las mediciones se coloca justo debajo de la luminaria, captando la mayor cantidad de luz emitida por la luminaria, siguiendo las recomendaciones de la normativa nacional e internacional para realizar la medición:

Figura 18

Medición Estándar de Iluminancia



Nota: Fotografía tomada por el equipo del Proyecto de Investigación Formativa asociada a la tesis.

Como se muestra en la figura 18, el equipo que se utiliza para medir la iluminancia, el luxómetro, se coloca inicialmente debajo y perpendicular a la luminaria que se está evaluando. Este será el punto de partida, desde aquí se midieron las distancias para el resto de los puntos, de esta manera se estableció una malla de medición con varios puntos, esto según el método escogido para poder contrastar esta información recabada en campo con los valores teóricos obtenidos de las simulaciones según el tipo de luminaria que se está evaluando.

Este mismo procedimiento se realiza en cada uno de los puntos de medición establecidos, obteniendo datos para cada tipo de luminaria y cada locación, las alturas a las que se encuentran cada una de las luminarias son especialmente relevantes, ya que afectan directamente la cantidad de luz que se va a registrar en el luxómetro, así como la potencia de cada luminaria.

3.2.3. Tabulación de Datos

A continuación, se muestra la distribución del esquema de puntos de medición en cada zona y luminaria, así como los valores medidos con el luxómetro.

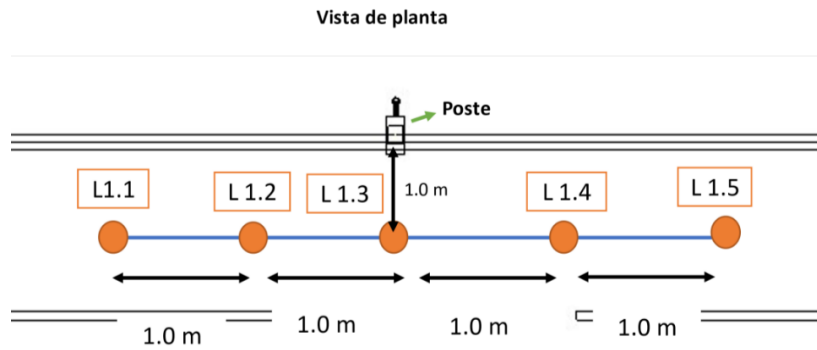
3.2.3.1 Luminaria LED – INFOUNI

En la figura 19 se muestra la distribución de los puntos de toma de datos con el luxómetro, en cada uno de ellos se realizará la medición de luxes respecto a la luminaria en estudio. En el caso de la luminaria LED ubicada en las afueras de InfoUNI se han tomado únicamente 5 puntos debido a las características del suelo alrededor, más allá de los 5 puntos que se consideran se encuentra un espacio con gras sembrado, lo cual no forma parte de este estudio.

En la tabla 4 se muestran las medidas que se tomaron de la luminaria tipo LED, a priori podemos ver que la cantidad de luz que emite la luminaria es significativamente mayor a la luz que emiten los otros tipos de luminaria, y como se verá después en el análisis con el espectrofotómetro, el color de la luz y las longitudes de onda en las que emite la luz se encuentran hacia el lado izquierdo del espectro de luz, algo positivo para la visión mesópica.

Figura 19

Esquema de Medición InfoUNI



Nota: Elaboración propia

Tabla 4

Medición de Iluminancia - InfoUNI

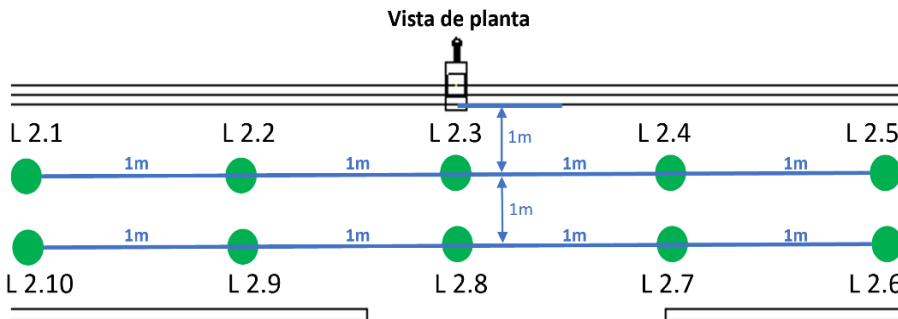
Ubicación	Iluminancia (lux)
L 1.1	142.9
L 1.2	176.5
L 1.3	188.9
L 1.4	166.6
L 1.5	138.6

Nota: Elaboración propia

3.2.3.2 Luminaria Vapor de Sodio – FIQT

Figura 20

Esquema de Medición FIQT



Nota: Elaboración propia

Tabla 5

Medición de Iluminancia - FIQT

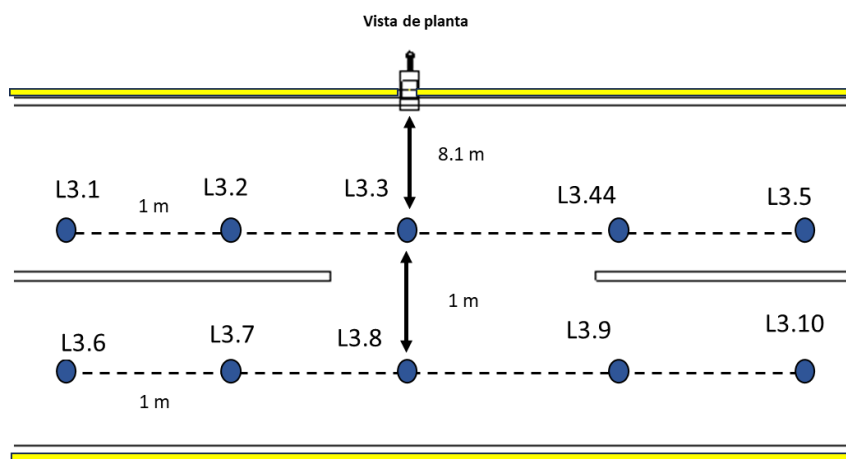
Ubicación	Iluminancia (lux)
L 2.1	13.4
L 2.2	12.8
L 2.3	12.8
L 2.4	11.6
L 2.5	10.4
L 2.6	13.6
L 2.7	14.5
L 2.8	15.5
L 2.9	14.9
L 2.10	15.1

Nota: Elaboración propia

3.2.3.3 Luminaria Halogenuro Metálico – FISS

Figura 21

Esquema de Medición FIIS



Nota: Elaboración propia

Tabla 6

Medición de Iluminancia - FIIS

Ubicación	Iluminancia (lux)
L 3.1	79.1
L 3.2	76.2
L 3.3	72.4
L 3.4	73.5
L 3.5	68.7
L 3.6	77
L 3.7	72.5
L 3.8	69.8
L 3.9	68.5
L 3.10	66.2

Nota: Elaboración propia

De esta manera, se tienen los datos necesarios para analizar la realidad de la iluminación de la universidad, como se muestra, se ha medido los niveles para 3 tipos distintos de luminarias, cada una a distintas alturas, pero refleja la realidad de las instalaciones. Cada luminaria tiene su peculiaridad, aparte de tener una altura distinta, que afecta directamente en los niveles de iluminación que se van a medir en los puntos; las potencias de cada una de ellas son distintas, así como el tipo en sí de luminaria.

3.3. Desarrollo en Laboratorio

En este apartado se va a explicar cómo se realizó el proceso de instalación y análisis en el banco de pruebas con el objetivo de evaluar el comportamiento lumínico y espectral de distintos tipos de luminarias bajo condiciones controladas en el laboratorio.

3.3.1. Construcción del banco de pruebas

Como concepto, el módulo experimental cuenta con 4 tipos de luminarias instaladas a una misma altura y separadas por un mismo espacio dentro del laboratorio de electricidad de la Facultad de Ingeniería Mecánica. Los 4 tipos de luminarias son: LED, Vapor de Mercurio, Vapor de Sodio y Halogenuro Metálico. Las 4 luminarias se encuentran instaladas a una altura de 2.93 metros del nivel del suelo

El banco de pruebas queda dispuesto como se muestra en la imagen, con el tablero, las conexiones y todo lo demás correctamente instalado.

Figura 22

Banco de Pruebas para Iluminación



Nota: Elaboración propia

En el tablero de fuerza se encuentra instalado un medidor inteligente para poder monitorear parámetros de voltaje, corriente, potencia y energía; este medidor resulta indispensable para poder realizar la reducción de potencia de cada luminaria en el siguiente procedimiento.

Figura 23

Medidor Digital de Potencia, Corriente y Voltaje



Nota: Elaboración propia

En el interior, aparte de estar todo el circuito para garantizar el funcionamiento, se instaló un variador de voltaje, el cual se va a usar para reducir progresivamente la potencia de cada una de las luminarias al hacer las pruebas.

Figura 24

Vista Interior del Tablero de Fuerza - Bando de Pruebas



Nota: Elaboración propia

3.3.2. Pruebas de iluminancia

Una vez instalado el banco de pruebas, se realizan las mediciones en condiciones nominales de funcionamiento a cada una de las luminarias, líneas abajo se va a mostrar una por una.

3.3.2.1 Luminaria LED

Esta luminaria es la que tiene la tecnología más actualizada y eficiente según el marco teórico presentado, así que se inició con esta.

Figura 25

Banco de Pruebas con Luminaria LED Encendida



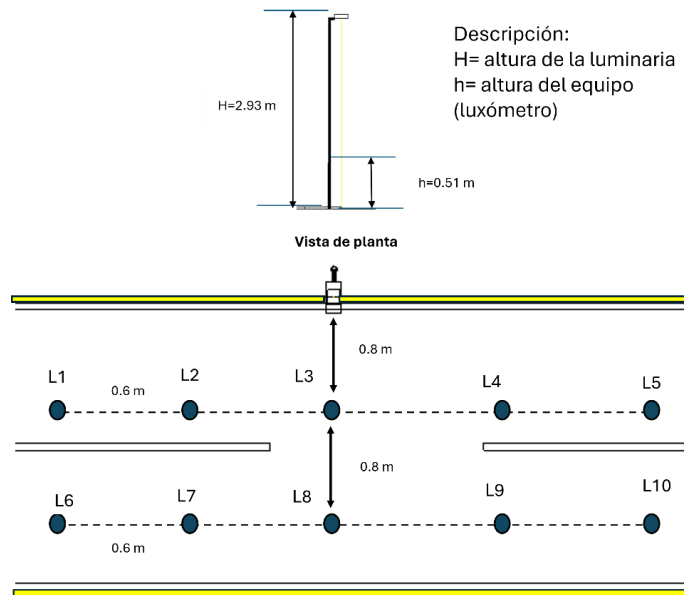
Nota: Elaboración propia

En la imagen se muestra la luminaria LED encendida a valores nominales, para realizar la medición con el Luxómetro se apagan las luces del laboratorio y se coloca el equipo justo debajo de la luminaria, en la proyección perpendicular hacia abajo y a una altura de 0.51 metros del suelo. En la figura 26 se muestra una descripción gráfica de cómo se realizó el procedimiento, detallando la disposición del luxómetro y los puntos de medición.

Se realiza la medición en los 10 puntos adyacentes a la proyección de la luminaria, teniendo en cuenta la distribución de puntos según la imagen que se adjunta y con las consideraciones que se muestran en la imagen.

Figura 26

Esquema de Medición de Iluminancia en Banco de Pruebas



Nota: Elaboración propia

Producto de esta medición se obtienen los valores medidos en 10 puntos alrededor de la luminaria tal como se muestran en la siguiente tabla:

Tabla 7

Medición de Iluminancia en Luminaria LED - Banco de Pruebas

1-Lámpara LED de 200 w				
L1 (lx)	L2 (lx)	L3 (lx)	L4 (lx)	L5 (lx)
853.4	797.3	788.2	748	709.1
L6 (lx)	L7 (lx)	L8 (lx)	L9 (lx)	L10 (lx)
491.4	530.4	522.6	522.6	555.1

Nota: Elaboración propia

3.3.2.2 Luminaria Vapor de Mercurio

Con el mismo procedimiento antes mencionado para la luminaria LED, se recolectaron los datos medidos para la luminaria de vapor de sodio, se obtiene como resultado la siguiente tabla:

Tabla 8

Medición de Iluminancia en Luminaria de Vapor de Mercurio - Banco de Pruebas

2-Lámpara de Vapor de Mercurio 250w				
L1 (lx)	L2 (lx)	L3 (lx)	L4 (lx)	L5 (lx)
446.5	682.1	802.3	718.7	486.6
L6 (lx)	L7 (lx)	L8 (lx)	L9 (lx)	L10 (lx)
302.2	438.8	527.1	468.1	342.6

Nota: Elaboración propia

3.3.2.3 Luminaria Vapor de Sodio

Para la luminaria de vapor de sodio se sigue el mismo procedimiento, mostrando el color característico de este tipo de luminaria.

Figura 27

Banco de Pruebas con Luminaria de Vapor de Sodio Encendida



Nota: Elaboración propia

Con esta disposición y en condiciones nominales de operación, se obtuvieron los siguientes valores tabulados:

Tabla 9

Medición de Iluminancia en Luminaria de Vapor de Sodio - Banco de Pruebas

3-Lámpara de vapor de sodio 250 w				
L1 (lx)	L2 (lx)	L3 (lx)	L4 (lx)	L5 (lx)
313.5	274.2	238.4	296.2	339.3
L6 (lx)	L7 (lx)	L8 (lx)	L9 (lx)	L10 (lx)
191.2	196.3	180.3	247.5	285.9

Nota: Elaboración propia

Desde ya se observa que los valores de luxes son mucho menores en este tipo de luminaria. Este aspecto será atendido con mayor profundidad en los siguientes capítulos.

3.3.2.4 Luminaria Halogenuro Metálico

Esta luminaria tiene un diseño que resalta, ya que la construcción se asemeja a un reflector, tal como se muestra en la imagen.

Figura 28

Banco de Pruebas con Luminaria de Vapor de Halogenuro Metálico



Nota: Elaboración propia

Para este tipo de luminaria, los valores medidos de luxes se muestran en la siguiente tabla:

Tabla 10

Medición de Iluminancia en Luminaria de Halogenuro Metálico - Banco de Pruebas

4-Lámpara de Halogenuro Metálico 250 w				
L1 (lx)	L2 (lx)	L3 (lx)	L4 (lx)	L5 (lx)
1619	1903	2022	1956	1332
L6 (lx)	L7 (lx)	L8 (lx)	L9 (lx)	L10 (lx)
909.8	1000	1094	1141	998

Nota: Elaboración propia

3.3.3. Reducción progresiva de voltaje

De acuerdo con lo establecido como recomendación en los estándares internacionales en relación con iluminancia, la cantidad de luxes a medirse para cada una de las luminarias debe ser disminuida y para poder lograr ello se propuso reducir progresivamente la potencia que se suministra a cada una de las luminarias, esto se realizó usando el regulador de voltaje instalado en el tablero de fuerza.

Según la literatura revisada, la cantidad de luxes registrados para cada luminaria debe reducirse usando un factor denominado “S/P”, asociado a cada tipo de luminaria según parámetros de construcción, sin embargo, para el estudio en curso se realizó una reducción progresiva de voltaje, por ende también de potencia, para analizar el comportamiento de la cantidad de luxes respecto al voltaje y la potencia suministrados, esto con la finalidad de evidenciar la correlación de ambas variables, además de analizar el espectro de luz emitida para cada distinto voltaje para identificar el punto que asegura cumplir con el estándar del factor “S/P” y que garantice un espectro de luz aceptable para el ojo humano.

Para registrar el espectro fotométrico en cada una de las mediciones se va a colocar el espectrofotómetro, equipo que registra el espectro de luz emitida, justo debajo de la luminaria que se está estudiando. A continuación, se muestra la imagen representativa de este procedimiento:

Figura 29

Registro con Espectrofotómetro



Nota: Elaboración propia

En la pantalla del equipo se observa el espectro fotométrico de la luminaria, esto lo vamos a utilizar para estudiar el comportamiento de la luminaria respecto a las reducciones de voltaje.

En lo siguiente, se muestran las tablas con los valores registrados durante la reducción progresiva en cada tipo de luminaria, en el título de cada tabla se detalla el tipo de luminaria al cual pertenecen las mediciones.

Tabla 11

Medición de Iluminancia con Reducción de Voltaje - Luminaria LED

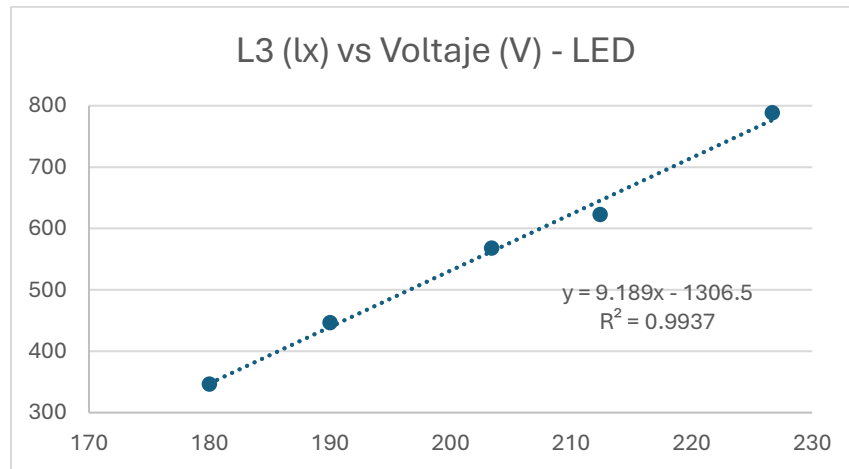
1-Lámpara LED de 200 W												
N°	I (A)	V (v)	L1 (lx)	L2 (lx)	L3 (lx)	L4 (lx)	L5 (lx)	L6 (lx)	L7 (lx)	L8 (lx)	L9 (lx)	L10 (lx)
1	0.7695	226.7	853.4	797.3	788.2	748	709.1	491.4	530.4	522.6	522.6	555.1
2	0.6917	212.4	701.8	652.8	622.7	598.6	578.2	392.8	412.6	433.3	450.9	452.2
3	0.6924	203.4	636.6	593.8	567.8	547.1	597.3	366.8	388.5	397.5	427.8	426.2
4	0.6168	190	490.3	466.3	446.5	430.7	408.1	281.4	302.1	321.7	348.2	346.7
5	0.5305	180	372.7	357.6	346.3	334.5	312.8	221.4	231.7	240.2	247.7	252.4

Nota: Elaboración propia

Según los datos recabados para el tipo de luminaria LED, se observa que la cantidad de Luxes medidos se correlaciona linealmente con el voltaje, por ende con la potencia, que esté recibiendo la luminaria, esto quiere decir que podemos establecer la correlación adecuada que indique el voltaje específico para la cantidad de luxes que se vaya a requerir en la situación práctica, recordemos que para poder implementar el uso del factor “S/P” se va a requerir una reducción controlada de los luxes emitidos.

Figura 30

Correlación de Iluminancia respecto al Voltaje - LED



Nota: Elaboración propia

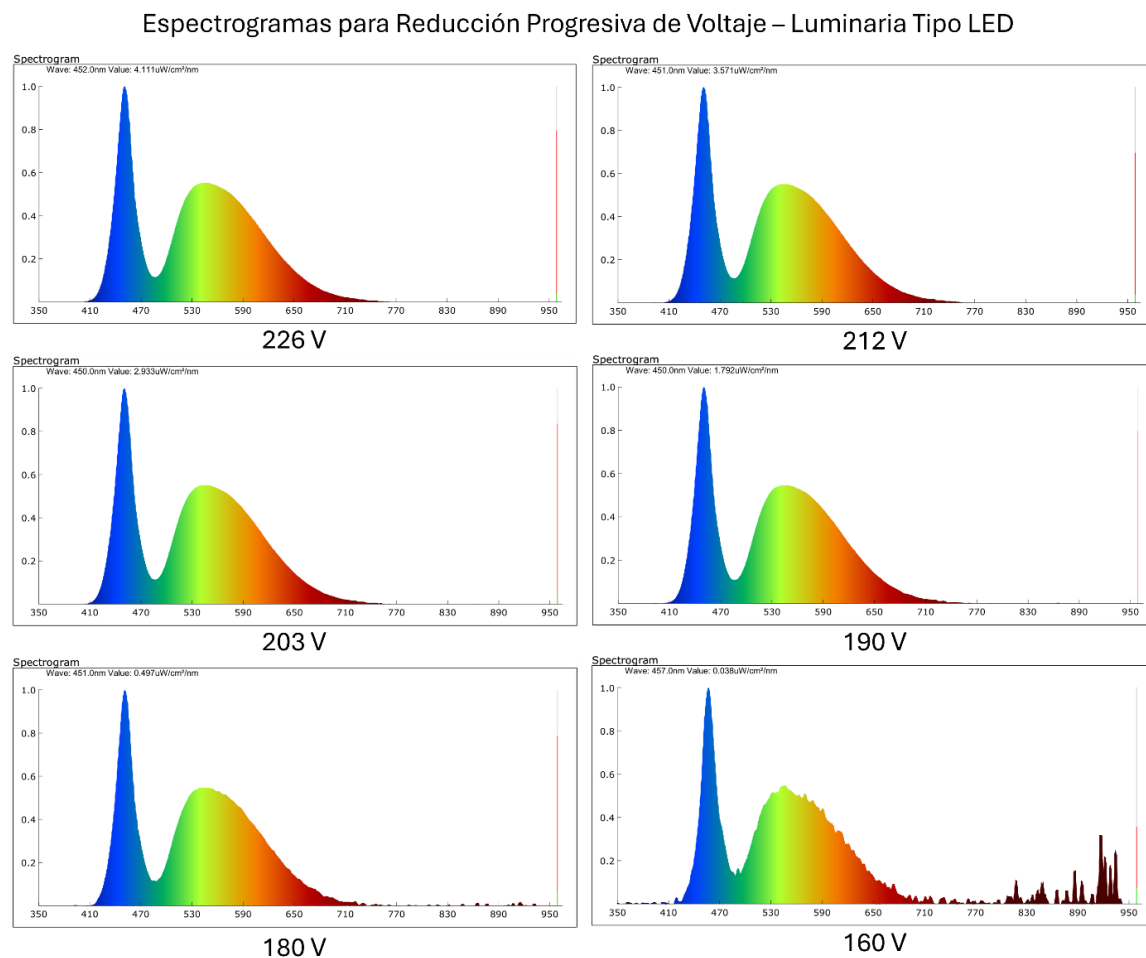
En la gráfica se comparan los luxes registrados en el punto 3, el que está directamente debajo de la luminaria, con el voltaje suministrado. En esta gráfica podemos observar la

correlación de manera gráfica y también matemática, se acompaña la ecuación en el gráfico, la correlatividad entre las dos variables es de tipo lineal, esto asegura que podamos reducir de manera gradual y lineal la potencia suministrada para poder reducir la cantidad de luxes emitidos.

Bajo el mismo procedimiento de reducción gradual de voltaje para la luminaria LED se registró el espectrograma para cada voltaje aplicado, a continuación, se presenta la recopilación de dichos espectrogramas para poder comentar el comportamiento de estos.

Figura 31

Espectrogramas para Reducción Progresiva de Voltaje - Luminaria tipo LED



Nota: Elaboración propia

En la figura se puede observar que para el tipo de luminaria LED el espectro de luz emitido desde los 226 Volts hasta los 180 Volts se mantiene constante/estable, esto quiere decir que se

puede reducir la cantidad de luxes emitidos hasta los 180 V sin que la distribución del espectro de luz emitido se vea afectado considerablemente y pueda reducir la calidad de la luz para el ojo humano.

Es importante mencionar que en las pruebas de laboratorio se redujo el voltaje hasta el punto en el que la luminaria deja de emitir luz, en esta procedimiento se encontró que el umbral para el funcionamiento de la luminaria es 160 Volts, a este voltaje se registró el espectrograma de la luz emitida, donde se observa cómo la curva principal, entre los 470 y 700 nm, presenta una distorsión, deja de ser uniforme, esto significa en términos prácticos que la calidad de la luz se ve afectada y que la percepción del ojo humano presenta distorsiones. Además de ello, aparecen ondas en el rango de los 710 a 930 nm, esto indica que aparecen trazas de luz que no son perceptibles al ojo humano. Todo esto significa que en este estado la cantidad de luz no es suficiente para una correcta visión nocturna.

Tabla 12

Correlación de Iluminancia respecto al Voltaje - Vapor de Mercurio

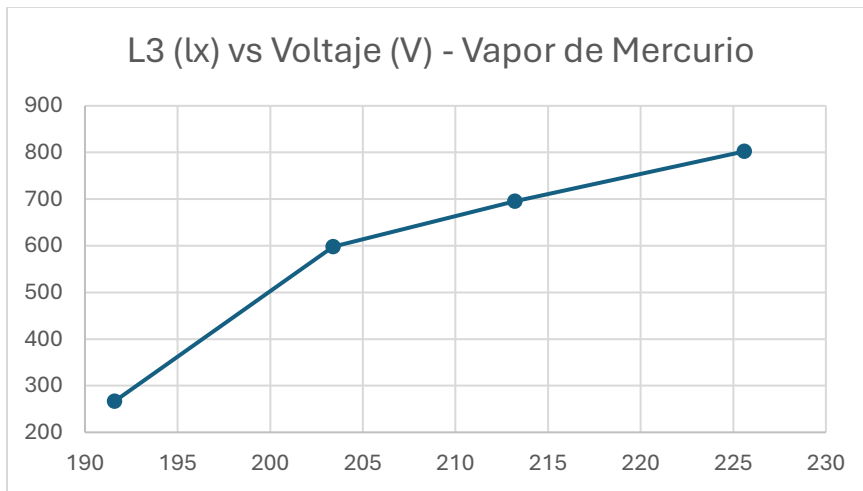
2-Lámpara de Vapor de Mercurio 250W												
N°	I (A)	V (v)	L1 (lx)	L2 (lx)	L3 (lx)	L4 (lx)	L5 (lx)	L6 (lx)	L7 (lx)	L8 (lx)	L9 (lx)	L10 (lx)
1	2.33	225.6	446.5	682.1	802.3	718.7	486.6	302.2	438.8	527.1	468.1	342.6
2	5.2	213.2	374.2	578.4	695.3	583.7	404.7	267.7	403.4	431.4	391.8	275.3
3	6.22	203.4	269.4	214.6	597.8	528.2	311.4	191.6	274.5	329.3	292.7	214.6
4	1.16	191.6	137.9	222.5	266.6	230.8	160.9	97.3	135.7	167.8	153.3	109.8

Nota: Elaboración propia

Para este tipo de luminaria, se observa que la cantidad de luxes medidos también disminuye con la reducción progresiva del voltaje, sin embargo, para establecer correctamente la correlación que existe, se va graficó la cantidad de luxes medidos en el punto 3, justo debajo de la luminaria, con el voltaje.

Figura 32

Correlación de Iluminancia respecto al Voltaje - Vapor de Mercurio



Nota: Elaboración propia

En la gráfica se puede observar cómo la correlación es lineal entre ambas variables entre los voltajes 203 y 225, sin embargo, al pasar el umbral de 203 Volts hacia abajo, la cantidad de luxes reduce mucho más drásticamente, así que podemos establecer un comportamiento lineal entre los 3 mayores voltajes y una caída exponencial al cruzar el umbral de 203 Volts. Esto se establece para poder analizar posteriormente la reducción adecuada de potencia en esta luminaria.

Tabla 13

Correlación de Iluminancia respecto al Voltaje - Vapor de Sodio

3-Lámpara de vapor de sodio 250 W												
N°	I (A)	V (v)	L1 (lx)	L2 (lx)	L3 (lx)	L4 (lx)	L5 (lx)	L6 (lx)	L7 (lx)	L8 (lx)	L9 (lx)	L10 (lx)
1	1.26	223.4	313.5	274.2	238.4	296.2	339.3	191.2	196.3	180.3	247.5	285.9
2	1.54	213.5	167.3	180.2	160.8	147.1	167.3	203.2	196.8	188.9	181.8	213.5
3	1.61	201.3	119.3	122.4	113.7	109.4	121.8	170.2	160.2	155.5	150.5	170.5
4	1.806	189.2	100.8	105.6	94.8	90.1	98.5	144.5	136.3	131.4	125.9	142.9
5	1.92	179.3	144.5	136.3	77.8	125.9	142.9	84.1	85.6	77.8	72.8	84.7

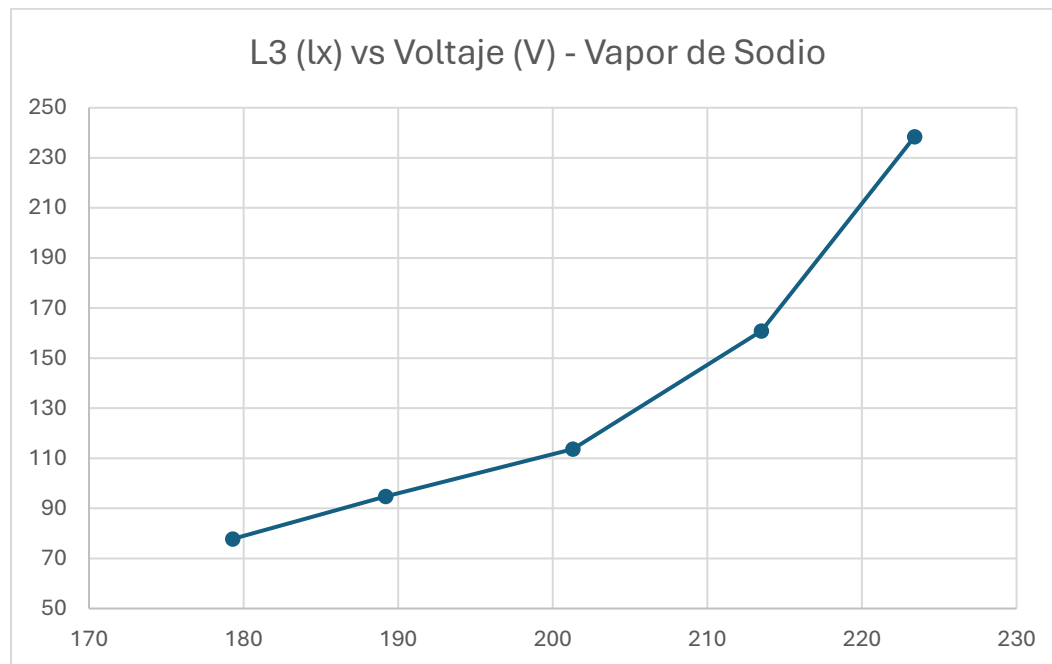
Nota: Elaboración propia

En la luminaria de vapor de sodio también existe la correlación entre la cantidad de luxes emitidos y la reducción de voltaje, la naturaleza de dicha correlación se estudia en el siguiente

gráfico de puntos, donde se compara la cantidad de luxes medidos en el punto 3, justo debajo de la luminaria y la cantidad de voltaje suministrado.

Figura 33

Correlación de Iluminancia respecto al Voltaje - Vapor de Sodio



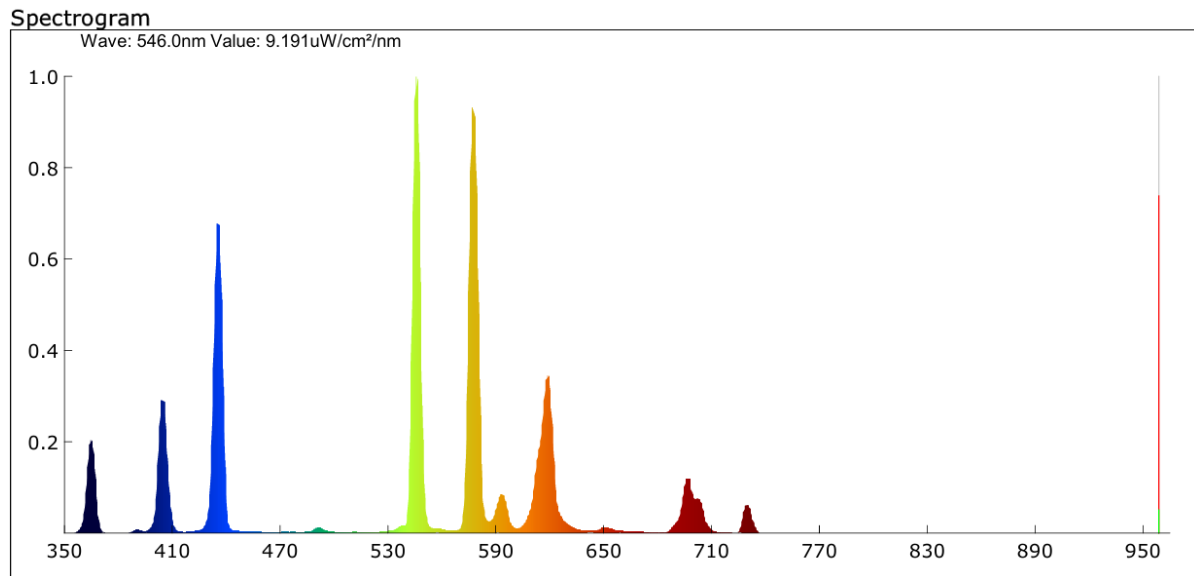
Nota: Elaboración propia

En el gráfico se muestra cómo al reducir el voltaje de la luminaria desde su voltaje nominal en 10 Volts la cantidad de luxes emitida reduce drásticamente, esta reducción se atenúa un poco luego en los siguientes puntos de reducción, sin embargo, no existe una correlación, sino más bien una correlación exponencial de reducción en los luxes.

Así pues, no se puede afirmar o establecer una relación empírica de proporcionalidad directa entre la potencia que se suministra a la luminaria y la cantidad de luxes percibidos por el luxómetro.

Figura 34

Espectrograma Luminaria de Vapor de Sodio



Nota: Espectrograma obtenido con el equipo Espectrofotómetro

En cuanto a la distribución espectral de este tipo de luminaria, se muestra el espectrograma de la luz emitida por este tipo de luminaria, donde se observa una distribución menos uniforme de la luz, esto influye de manera negativa en la percepción del ojo humano, un aspecto que se comentará a detalle más adelante ya que es importante para la casuística que se aborda en el estudio.

Tabla 14

Correlación de Iluminancia respecto al Voltaje - Halogenuro Metálico

4-Lámpara de Halogenuro Metálico 250 W												
N°	I (A)	V (v)	L1 (lx)	L2 (lx)	L3 (lx)	L4 (lx)	L5 (lx)	L6 (lx)	L7 (lx)	L8 (lx)	L9 (lx)	L10 (lx)
1	2.46	230	1619	1903	2022	1956	1332	909.8	1000	1094	1141	998
2	2.16	218.5	1248	1488	1584	1584	1500	710.3	816.5	879.2	915	797.8
3	1.89	207.8	971.5	1158	1221	1170	830.7	523	604.8	677.8	660	623.3
4	1.63	196.8	738.3	864.2	933.8	925.3	629.8	396.2	462.8	509.5	514.2	444.1
5	1.35	182.5	518.5	596.4	668.3	611.8	429.9	365.1	294.6	329.3	362.5	323.5

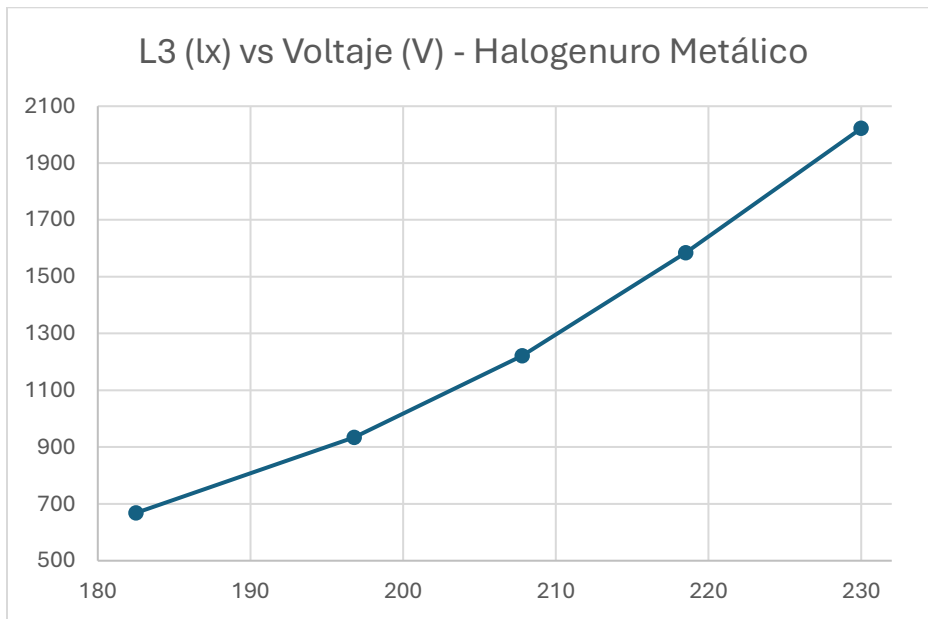
Nota: Elaboración propia

Algo que comentar en este tipo de luminaria es que la cantidad de luxes registrada es considerablemente mayor a la que se registra en las otras luminarias, esto se debe al tipo de

luminaria y a la potencia nominal que se le suministra. Aparte de este detalle, también se observa que la cantidad de luxes se reduce al momento de reducir la cantidad de voltaje y potencia suministrada.

Figura 35

Correlación de Iluminancia respecto al Voltaje - Halogenuro Metálico



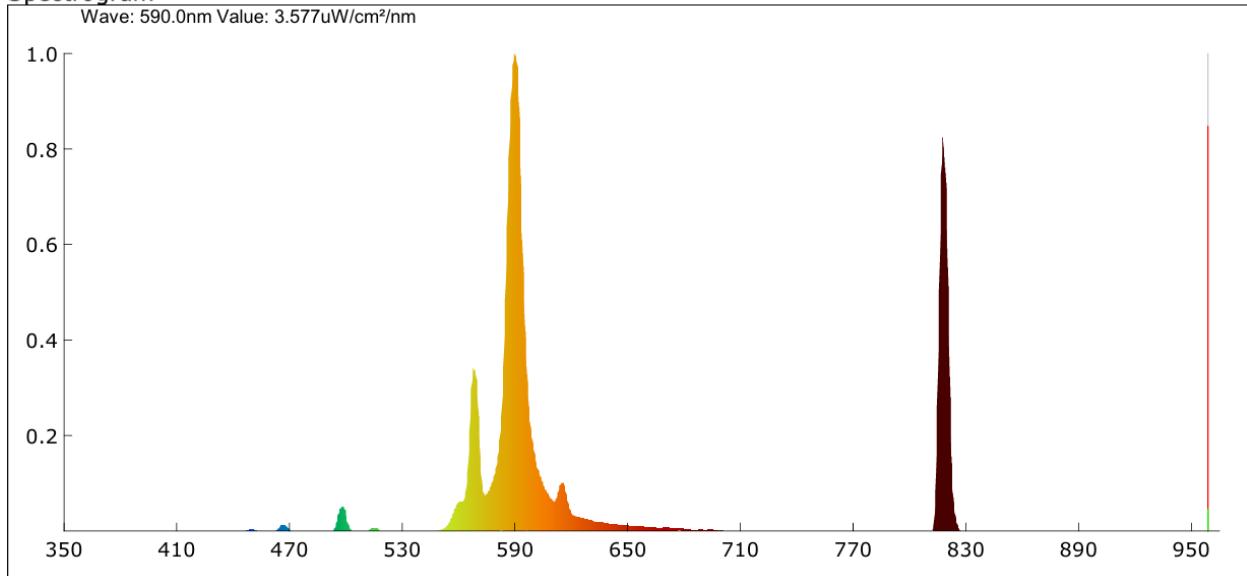
Nota: Elaboración propia

En la gráfica podemos observar un comportamiento más lineal y uniforme entre ambas variables, una correlación cuasi lineal, lo cual nos permitirá reducir de manera controlada la cantidad de luxes para este tipo de luminaria.

Figura 36

Espectrograma Luminaria de Halogenuro Metálico

Spectrogram



Nota: Elaboración propia

Se muestra el espectrograma obtenido para este tipo de luminaria, donde se observa una distribución espectral de la luz concentrada en los intervalos de 560 nm a 650 nm y de 810 nm a 830 nm, este fenómeno se comentará más a fondo en la discusión de conclusiones.

3.4. Análisis de Datos

En este apartado se analizará y discutirán los datos encontrados.

3.4.1. Análisis estadístico

Como se realizaron reducciones progresivas de voltaje en las luminarias, cabe analizar los porcentajes de reducción en las variables importantes, así se presentará el análisis de cada tipo de luminaria.

Para hacer más práctico el análisis de la data de cada luminaria, se tomará un promedio de luxes de los 10 puntos de medición, teniendo para el análisis un valor promedio de luxes por cada voltaje suministrado, así mismo, para calcular la reducción porcentual de voltaje en cada uno de los escenarios se utilizará la siguiente fórmula:

$$\% \Delta V = \left(1 - \frac{V_i}{V_0} \right) \times 100 \quad (1)$$

En donde V_i será el voltaje evaluado y V_0 será el voltaje inicial o nominal de la luminaria.

Para analizar la reducción de luxes promedio se empleará una fórmula análoga, reemplazando los valores de voltaje por Lux promedio:

$$\% \Delta Lux = \left(1 - \frac{Lux_i}{Lux_0} \right) \times 100 \quad (2)$$

En donde Lux_i será la cantidad de Luxes promedio evaluado y Lux_0 será la cantidad de luxes promedio inicial o nominal de la luminaria.

Con estas consideraciones se presenta la tabla que muestra la reducción porcentual de parámetros para la luminaria de tipo LED:

Tabla 15

Reducción Porcentual de Voltaje e Iluminancia - Luminaria LED

Nº	I (A)	V (v)	P (W)	LUX(LX)	%↓ V	%↓ P	%↓ Lux
1	0.7695	226.7	174.4	651.8	0	0	0
2	0.6917	212.4	146.9	529.6	6.308	15.78	18.75
3	0.6924	203.4	140.8	494.9	10.28	19.27	24.07
4	0.6168	190	117.2	384.2	16.19	32.82	41.06
5	0.5305	180	95.5	291.7	20.6	45.26	55.24

Nota: Elaboración propia

Se observa que a reducción porcentual en la cantidad de luxes es significativamente mayor, es decir, que pequeños cambios de voltaje provocan cambios más grandes en luxes, especialmente conforme se reduce más allá del 10%. Nótese que al reducir un 20.6% el voltaje la cantidad de luxes se reduce en 55.24%, más de la mitad de luxes nominales.

Para el caso de la luminaria de vapor de mercurio se utilizarán las mismas ecuaciones y se mostrará la reducción porcentual de voltaje y luxes medidos.

Tabla 16

Reducción Porcentual de Voltaje e Iluminancia - Luminaria de Vapor de Mercurio

Nº	I (A)	V (v)	LUX(LX)	%↓ V	%↓ Lux
1	2.33	255.6	521.5	0	0
2	5.2	213.2	440.6	16.59	15.515
3	6.22	203.4	322.4	20.42	38.176
4	1.16	191.6	168.3	25.04	67.735

Nota: Elaboración propia

En esta tabla se muestra la reducción porcentual de las variables, al igual que en el anterior tipo de luminaria se observa que la cantidad de luxes registrados es muy sensible a la reducción de voltaje, siendo así que al reducir en 25% el voltaje, la cantidad de luxes emitidos se reducen en 67%, mucho más que en la luminaria tipo LED.

Tabla 17

Reducción Porcentual de Voltaje e Iluminancia - Luminaria de Vapor de Sodio

Nº	I (A)	V (v)	LUX(LX)	%↓ V	%↓ Lux
1	1.26	223.4	256.3	0	0
2	1.54	213.5	180.7	4.432	29.495
3	1.61	201.3	139.4	9.893	45.626
4	1.806	189.2	117.1	15.31	54.316
5	1.92	179.3	103.2	19.74	59.716

Nota: Elaboración propia

Para el caso de la luminaria de Vapor de Sodio, también podemos observar que la reducción de luxes es sumamente mayor a la de voltaje, siendo así que con 19.7% de reducción en el voltaje suministrado la cantidad de luxes se ha reducido prácticamente en un 60%.

Tabla 18*Reducción Porcentual de Voltaje e Iluminancia - Luminaria de Halogenuro Metálico*

Nº	I (A)	V (v)	P (W)	LUX(LX)	%↓ V	%↓ P	%↓ Lux
1	2.46	230	565.8	1397.5	0	0	0
2	2.16	218.5	472.0	1152.3	5	16.585	17.546
3	1.89	207.8	392.7	844.0	9.652	30.586	39.605
4	1.63	196.8	320.8	641.8	14.43	43.304	54.073
5	1.35	182.5	246.4	450.0	20.65	56.455	67.8

Nota: Elaboración propia

En la luminaria de Halogenuro Metálico se registran luxes más elevados, lo que se condice con la potencia suministrada a dicha luminaria, alrededor de 500 Watts nominales, sin embargo, también muestra alta sensibilidad a la reducción de voltaje, con una reducción porcentual similar a las luminarias anteriores, con un 20.65% de reducción en el voltaje se observa una reducción del 67.8% en la cantidad de luxes.

Este análisis estadístico muestra la alta sensibilidad de la luz emitida por las luminarias respecto a la cantidad de energía suministrada, lo cual significa que al momento de realizar la reducción de luxes usando el factor “S/P” proporcionado por estándares internacionales es preciso tener especial cuidado para no reducir excesivamente los valores de iluminancia, ya que se puede afectar la calidad de visión de peatones y conductores en las vías públicas.

3.4.2. Análisis Comparativo de Normativas Nacionales e Internacionales

El diseño y evaluación de los sistemas de alumbrado público en el contexto urbano debe considerar tanto los requisitos normativos nacionales como los avances en criterios internacionales de eficiencia energética y confort visual. En este sentido, resulta pertinente establecer una comparación entre la normativa peruana vigente y los lineamientos propuestos por organismos internacionales como la Comisión Internacional de la Iluminación (CIE).

La siguiente tabla muestra una comparación entre ambos marcos normativos en función de los principales criterios técnicos de diseño y control de alumbrado vial:

Tabla 19

Comparativa entre Normativa Peruana e Internacional de Iluminación Pública

Parámetro Técnico	Normativa Peruana	Normativa Internacional (CIE 115:2010 / EN 13201-2)
Clasificación de Vías	Tipos I a V, según tránsito y función vial	Categorías ME1 a ME6, según jerarquía, riesgo y uso
Luminancia media	De 0.5 – 2.0 cd/m ²	De 0.3 – 2.0 cd/m ²
Iluminancia media	De 1 a 40 lux, diferenciada por calzada clara u oscura	Típicamente de 2 a 50 lux para vías ME1-ME2
Consideración de reflectancia	Explícita: se diferencian calzadas claras y oscuras	Implícita: se asume un valor estándar de reflectancia en los cálculos
Control de deslumbramiento	Índice G (valores entre G4 y G6 según tipo de vía)	Índice TI% (Threshold Increment) y relación de entorno (SR)
Criterio mesópico (visión nocturna)	No contemplado explícitamente	Considerado a través del factor S/P y adaptado al tipo de fuente luminosa
Criterios de eficiencia energética	No explícitos, implícitamente asociados a cumplimiento de valores mínimos	Recomendaciones específicas para optimización energética y ajuste espectral

Nota: Elaboración propia

Como se observa en la tabla anterior, la normativa peruana establece criterios coherentes con el estándar internacional en lo que respecta a los niveles de luminancia e iluminancia exigidos, sobre todo para vías de alta jerarquía como las de Tipo I y II; sin embargo, una diferencia

fundamental radica en la ausencia de criterios relacionados con la visión mesópica en entornos nocturnos, un aspecto que ha sido ampliamente desarrollado en las recomendaciones más recientes de la CIE, especialmente en la CIE 191:2010.

En el año 2021, se publica un decreto que reemplaza la normativa antes mencionada con el fin de actualizar parámetros y mejorar el alumbrado público, sin embargo, en una comparación de ambas normativas y de la normativa internacional se observó divergencias al momento de lograr el objetivo.

Tabla 20

Comparación de Estándares Luminotécnicos entre la Norma Internacional y las Normativas Peruanas

Clasificación Vial / Tipo de Alumbrado	CIE 115:2010 (Internacional)	Normativa Peruana Previa (Tabla II)	Normativa Peruana Modificada (Tabla VI)
Vía Expresa	M1: 2.0 – 1.5 cd/m ² , 15–20 lux	Tipo I: 1.5 – 2.0 cd/m ² 15–20 lux (clara) 30–40 lux (oscura)	IA: 2.0 – 2.7 cd/m ² 40–55 lux IB: 1.75 – 2.4 cd/m ² 35–50 lux
Vía Arterial	M2: 1.5 – 1.0 cd/m ²	Tipo II: 1.0 – 2.0 cd/m ² 10–20 lux (clara) 20–40 lux (oscura)	II: 1.5 – 2.0 cd/m ² 30–40 lux
Vía Colectora	M3–M4: 1.0 – 0.5 cd/m ²	Tipo III: 0.5 – 1.0 cd/m ² 5–10 lux (clara) 10–20 lux (oscura)	III: 0.75 – 1.0 cd/m ² 25–35 lux
Zona Comercial / Locales	M5: 0.5 – 0.3 cd/m ² , 2–5 lux	Tipo IV–V: 1–6 lux	IV: 0.5 – 0.7 cd/m ² 10–15 lux V: 0.3 – 0.4 cd/m ² 7.5–12 lux
Vías Peatonales / Residenciales	P / HS: 5–10 lux	Tipo VI: 1–6 lux	VI: 5–10 lux VI-A: 2–4 lux V-A: 2–4 lux

Nota: Elaboración propia

Luego de esta comparativa, se hace de importancia resaltar los siguientes puntos:

Elevación de Requerimientos en la Modificatoria de la Norma Peruana: La modificatoria a la norma peruana eleva notablemente los valores de iluminancia media, medida en luxes, para vías expresas, arteriales y colectoras, respecto tanto a la norma anterior como a la CIE 115:2011, normativa que se indica fue la base para dicha modificatoria. Por ejemplo, se exige hasta 55 lux para una vía expresa IA, mientras que la CIE 115:2012 recomienda alrededor de 20 lux.

Divergencia con Criterios Internacionales: La CIE establece valores basados principalmente en luminancia (cd/m^2), que es más precisa para evaluar visibilidad en función de la superficie. Las normas peruanas, ambas versiones, priorizan iluminancia, medida en luxes, lo cual simplifica la medición, pero puede inducir a sobredimensionamientos, especialmente cuando se usan luminarias de alto rendimiento, como lo son las luminarias de tipo LED. Para el caso de los otros tipos de luminarias podría incurrirse también en un sobredimensionamiento, sin embargo, el efecto sería menos imperceptible en cuanto al índice de deslumbramiento, es decir, la incomodidad en el ojo por exceso de iluminación sería menor en estas luminarias.

Falta de Incorporación del Factor S/P: Ninguna de las dos normativas peruanas incorpora el factor S/P (Scotopic/Photopic) para evaluar condiciones mesópicas, lo que representa una oportunidad clara para introducir criterios más eficientes. La presente tesis propone incorporar el modelo mesópico, lo cual es más adecuado para condiciones de tránsito nocturno y baja adaptabilidad visual.

Relación directa con la sobre iluminación actual: El análisis de campo que se realizó evidencia que las luminarias LED actuales superan por mucho los valores exigidos, incluso los de la modificatoria. Por ejemplo, 650 lux a 2.93 m, que usando la ley de los cuadrados inversos para calcular el los luxes a 8 metros arroja unos 50 luxes, supera demasiado el valor máximo exigido para una vía colectora que es de 35 lux, esto sustenta con claridad la hipótesis de sobredimensionamiento.

Relevancia del cambio normativo: El incremento de los valores de referencia en la versión modificada de la norma puede haber sido influenciado por prácticas anteriores de diseño sin criterio mesópico ni eficiencia energética. Esta situación puede haber generado un ciclo de sobre diseño estructural que esta tesis busca romper mediante una evaluación rigurosa y científica del flujo luminoso útil.

3.4.3. Situación real versus Estándares Nacionales e Internacionales

La visión mesópica, predominante en condiciones de iluminación nocturna urbana, implica una respuesta visual diferente que debe ser corregida mediante el uso de factores de conversión espectral (S/P ratio), los cuales varían significativamente según el tipo de fuente luminosa. Las fuentes LED, por ejemplo, presentan un S/P ratio superior al de tecnologías tradicionales como vapor de sodio o mercurio, lo que permite alcanzar los mismos niveles de percepción visual con menores valores de iluminancia fotópica. Este principio es clave para justificar reducciones sustanciales en la potencia instalada sin comprometer la seguridad vial ni el confort visual.

Para poder comparar correctamente los valores medidos en campo con los valores medidos en el banco de pruebas y con los estándares internacionales nos tenemos que valer de conceptos explicados anteriormente, estos conceptos son:

Factor S/P, que cualifica la relación entre las visiones fotópica y escotópica, este depende del espectrograma de la luminaria, es decir, del tipo de luminaria y cuya interpretación en términos prácticos significa que:

Cuando “S/P > 0” la cantidad de luxes percibidos es mayor que la cantidad de luxes medidos, en otras palabras, Luxes mesópicos > Luxes fotópicos. Como ejemplo práctico entenderíamos que si la luminaria tiene un “S/P= 1.2”, y hemos medido 100 luxes fotópicos con un luxómetro, la percepción real en el ojo humano será de 120 luxes mesópicos.

Cuando “S/P > 0” la cantidad de luxes percibidos es menor que la cantidad de luxes medidos, en otras palabras, Luxes mesópicos > Luxes fotópicos. Como ejemplo práctico

entenderíamos que si la luminaria tiene un “S/P= 0.3”, y hemos medido 100 luxes fotópicos con un luxómetro, la percepción real en el ojo humano será de 30 luxes mesópicos.

El factor S/P depende del tipo de luminaria y de su espectrograma, para los tipos de luminarias en estudio ya se encuentra definido en la CIE 190:2010, estos valores serán los que se usarán para realizar los cálculos necesarios en este estudio.

Iluminancia normativa requerida, que señala cuál es la cantidad de luxes requeridos para cada tipo de vía. Esto se encuentra tipificado tanto en normativa nacional como internacional y se ha detallado en el marco teórico y normativo.

Como argumento principal para la comparación de este apartado en condiciones de visión mesópica, como son las que se presentan por la noche en zonas urbanas con baja luminancia, las fuentes con mayor componente escotópico (mayor factor S/P) pueden proporcionar una mejor visibilidad con menor flujo luminoso fotópico, lo cual permite reducir el consumo energético sin reducir el desempeño visual.

3.5. Diseño del Sistema con Parámetros según Criterios de Visión Mesópica

A continuación, se presenta el diseño propuesto, tomando como base las características de las luminarias estudiadas en el entorno controlado, el comportamiento de la iluminancia respecto a la potencia suministrada a cada una de ellas, la información recabada de las luminarias evaluadas en el campus, los parámetros provistos por la normativa nacional que tienen criterios de visión escotópica, los parámetros según normativa internacional que contemplan criterios de visión mesópica, así como leyes y fórmulas señaladas en libros y publicaciones de organismos de normatividad en la materia.

Para calcular la iluminancia mesópica estimada para cada tipo de luminaria se usó la siguiente fórmula sugerida por la CIE 191:2010:

$$E_m = E_p * \left(\frac{V_m}{V_p}\right) \quad (3)$$

Donde:

E_m = iluminancia mesópica (en lux mesópico)

E_p = iluminancia fotópica medida con el luxómetro (en lux fotópico)

$\frac{V_m}{V_p}$ = factor de corrección mesópico, que se encuentra en función de:

- Nivel de luminancia adaptativa L (en $\frac{cd}{m^2}$)
- Factor S/P de la fuente de luz

Según la CIE 191:201, el factor $\frac{V_m}{V_p}$ se puede aproximar con la siguiente fórmula empírica para un rango mesópico empírico:

$$\frac{V_m}{V_p} = \left(\frac{S/P}{1 + 0.5 * \log_{10}(L)} \right)^{0.5} \quad (4)$$

Para el caso de zonas urbanas residenciales, se establece $L = 0.3 \text{ cd/m}^2$, entonces tendremos que:

$$\begin{aligned} 1 + 0.5 * \log_{10}(L) & \quad (5) \\ & = 0.73855 \end{aligned}$$

Dado que la variable “L” se mantendrá constante para los siguientes cálculos, el denominador de la fracción conservará un valor constante en adelante, a no ser que la situación con la variable “L” cambie o sea afectado por el tipo de vía o la normativa que se esté analizando.

Tabla 21

Tabla Referencial de Valores S/P para Fuentes de Luz Comunes

Tipo de Luminaria	Temperatura de Color (CCT)	S/P típico	Características
LED Blanco Cálido	2700K – 3000K	1.2 – 1.4	Dominancia amarilla-roja, bajo S/P
LED Blanco Neutro	3500K – 4500K	1.5 – 1.8	Balance escotópico-fotópico
LED Blanco Frío	5000K – 6500K	1.8 – 2.4	Alto contenido azul, mayor S/P
Lámpara de Vapor de Sodio (HPS)	~2000K	0.4 – 0.6	Espectro estrecho en amarillo, muy bajo S/P
Sodio de Baja Presión (LPS)	~1800K	~0.2	Mínimo S/P (casi nula contribución escotópica)
Vapor de Mercurio	3400K – 4200K	0.9 – 1.1	Pico en azul-verde, S/P moderado
Halogenuros Metálicos (MH)	3000K – 6000K	1.2 – 1.9	Depende de composición (más alto en versiones frías)
Lámparas Fluorescentes (CFL)	2700K – 6500K	1.1 – 1.7	Varía según CCT y fósforos
Incandescente / Halógeno	2700K – 3200K	1.1 – 1.3	Espectro continuo, bajo S/P

Nota: Elaboración propia adaptada de CIE 191:2010

Como se mencionó antes, el factor S/P se encuentra tipificado para los tipos de luminarias y se muestran valores referenciales en la tabla 19, por lo cual ahora se presenta la tabla 20 con

$\frac{V_m}{V_p}$ calculado según el tipo de luminaria:

Tabla 22*Factor S/P y Factor de Corrección Mesópico Para Cada Tipo de Luminaria*

Tipo de luminaria	S/P	$\frac{V_m}{V_p}$
LED	2.0	$\sqrt{\frac{2.0}{0.73855}} \approx 1.645$
Vapor de Mercurio	0.6	$\sqrt{\frac{0.6}{0.73855}} \approx 0.901$
Vapor de Sodio	0.5	$\sqrt{\frac{0.5}{0.73855}} \approx 0.823$
Halogenuro Metálico	1.4	$\sqrt{\frac{1.4}{0.73855}} \approx 1.377$

Nota: Elaboración propia

Con esto, podemos calcular los luxes mesópicos en función de los luxes fotópicos promedios medidos en el laboratorio para cada tipo de luminaria:

Tabla 23*Luxes Mesópicos Corregidos para cada Tipo de Luminaria*

Luminaria	Lux Fotópico (E_p)	S/P	$\frac{V_m}{V_p}$	Lux Mesópico (E_m)
LED 200W	650 lx	2.0	1.645	1069.25 lx
Vapor de Mercurio 250W	520 lx	0.6	0.901	468.52 lx
Vapor de Sodio 250W	256 lx	0.5	0.823	210.69 lx
Halogenuro Metálico 500W	1397 lx	1.4	1.377	1922.67 lx

Nota: Elaboración propia

A priori parece confuso el comportamiento de los luxes para cada luminaria, ya que se puede creer que los luxes mesópicos son mayores para todas las luminarias, sin embargo, el

comportamiento depende del espectro de luz que tiene cada tipo de luminaria, como se ve en el siguiente cuadro:

Tabla 24

Análisis del Flujo Mesópico

Fuente	Espectro	S/P Ratio	¿ $E_m > E_p$?
LED blanco frío	Alto en azul-verde	Alto (≈ 2)	Sí
Halogenuro Metálico	Balanceado	Medio (≈ 1.4)	Sí, moderado
Vapor de Mercurio	Pico en verde, poco azul	Bajo (≈ 0.6)	NO
Vapor de Sodio	Pico en amarillo, casi sin azul	Muy bajo ($\approx 0.4 - 0.5$)	NO

Nota: Elaboración propia

Luego de aplicar este razonamiento para validar los hallazgos en las mediciones se obtiene:

Tabla 25

Validación de Hallazgos Después de la Corrección a Flujos Mesópicos

Luminaria	Lux Fotópicos	Lux Mesópicos	$E_m > E_p$ (esperado)	¿Es coherente?
LED	650 lx	1069.25 lx	Sí	Correcto
Vapor de Mercurio	520 lx	468.52 lx	NO	Correcto
Vapor de Sodio	256 lx	210.69 lx	NO	Correcto
Halogenuro Metálico	1397 lx	1922.67 lx	Sí	Correcto

Nota: Elaboración propia

Este procedimiento realizado se aplicará también a los valores medidos en campo para validar la realidad con la teoría y también la normativa nacional con la recomendación

internacional. Se tiene en cuenta la altura de las luminarias para los cálculos y se usó también la ley de los cuadrados inversos para extrapolar luxes que se puedan comparar con casos reales.

Tabla 26

Iluminancia Mesópica Corregida para Mediciones en Campus Universitario

Escenario	Potencia (W)	Lux Fotópico	S/P Ratio	L (cd/m²)	V_m/V_p	Lux Mesópico
LED 124W a 5 m	124	162.7	1.645	2	1.53362705	249.521121
VSAP 168W a 9.6 m	168	13.46	0.62	2	0.57802357	7.78019724
Halogenuro 430W a 9.6 m	430	22.7	1.49	2	1.38912116	31.5330503

Nota: Elaboración propia

Basado en la cantidad de luxes normados en Perú para las situaciones estudiadas, se observa que el caso de la Luminaria LED en los exteriores de InfoUNI tiene un exceso de iluminancia, la luminaria de Vapor de Sodio (VSAP) tiene una cantidad relativamente aceptable de luxes emitidos y la luminaria de Halogenuro tiene una iluminancia ligeramente superior a la exigida por la norma.

Se observa que las luminarias LED y de Halogenuro tienen una mejor eficiencia mesópica, lo que indica que para lograr la cantidad de luxes exigidos por la normativa se requiere una menor potencia suministrada, en el capítulo de Resultado y de Sugerencias se comenta más a detalle las opciones que se presentan para optimizar la iluminación con las luminarias existentes en campo.

3.5.1. Evaluación del consumo energético

Con el fin de evaluar el impacto energético del diseño actual de luminarias LED en una avenida urbana, se realizaron cálculos comparativos entre diferentes configuraciones de altura y potencia. En particular, se estudió la iluminancia obtenida con una luminaria LED de 200W

instalada a 2.93 m y se proyectó su comportamiento a una altura de 8 m utilizando la ley del inverso del cuadrado de la distancia. Posteriormente, se ajustó la potencia para cumplir con los requisitos normativos de iluminancia mesópica.

Para poder calcular el consumo energético del sistema de alumbrado público se usó un supuesto de operación diaria de las luminarias, esto quiere decir que para efectos de cálculo del consumo energético y la estimación de la eficiencia del sistema se ha considerado un tiempo estándar de operación diaria de 12 horas continuas, por noche, correspondiente al periodo nocturno habitual en el Perú y además señalado por la normativa nacional Norma DGE - "Alumbrado de Vías y Espacios Públicos", que en sus lineamientos técnicos para diseño y evaluación energética asume esquemas de operación nocturna completa.

Para los cálculos se definen las fórmulas para calcular el consumo mensual como el consumo anual del sistema en función de la potencia instalada para el alumbrado público de la siguiente manera:

$$\text{Consumo mensual (kWh)} = \text{Potencia (kW)} \times 12\text{h/día} \times 30 \text{ días} \quad (6)$$

$$\text{Consumo anual (kWh)} = \text{Potencia (kW)} \times 12\text{h/día} \times 365 \text{ días} \quad (7)$$

A partir de las mediciones reales (650 lux a 2.93 m), se estimó que a 8 m la iluminancia fotópica descendía a 87.19 lux, y la iluminancia mesópica (corrigiendo con el factor S/P de 1.645, según CIE 191:2010) alcanzaba los 143.43 lux. Esto sigue siendo un nivel significativamente alto si se compara con los rangos estipulados por la normativa peruana para zonas de riesgo elevado (entre 30 y 40 lux para calzada oscura).

Mediante proporcionalidad directa entre iluminancia y potencia, se determinó que una luminaria de aproximadamente 69W podría satisfacer los niveles exigidos (30 lux fotópicos) desde una altura de 8 metros. Esto representa una reducción del 65.6% en la potencia instalada respecto a la luminaria LED instalada en el laboratorio, con el consiguiente ahorro energético y económico.

La siguiente tabla resume los resultados comparativos de los cuatro escenarios estudiados:

Tabla 27

Consumo Energético Luminaria LED - Casos de Estudio

Caso	Potencia (W)	Lux fotópico	Lux mesópico	Consumo (kWh/año)	Costo (USD/año)	Eficiencia (lux/kWh)	Eficiencia mesópica (lux/kWh)
LED 200W a 2.93 m	200.00	650.00	1069.25	876.00	113.88	0.742	1.221
LED 200W a 8 m	200.00	87.19	143.43	876.00	113.88	0.100	0.164
LED 69W a 8 m	68.81	30.00	49.35	301.41	39.18	0.100	0.164
LED 124W a 5 m	124.00	162.00	266.49	543.12	70.61	0.298	0.491

Nota: Elaboración propia

Como se evidencia, el primer escenario presenta una sobre iluminación considerable que se traduce en un mayor consumo eléctrico anual. A pesar de su elevada eficiencia luminosa, esta se torna poco efectiva cuando la iluminancia excede los requerimientos funcionales.

El tercer escenario (LED de 69W a 8m) cumple con el nivel de iluminancia exigido por la normativa y maximiza la eficiencia, tanto en términos de luxes fotópicos como mesópicos por kWh consumido. Esto demuestra que es posible reducir significativamente la potencia instalada sin comprometer los niveles de seguridad visual en la vía.

En consecuencia, a priori podemos indicar que el sistema actual de alumbrado está sobredimensionado y que una optimización basada en criterios mesópicos permitiría una mejora considerable en la eficiencia energética del alumbrado público.

CAPÍTULO IV.

Resultados, Contrastación de Hipótesis y Discusión de Resultados

4.1. Resultados

Con los datos obtenidos en campo y en el laboratorio, se realizó un análisis comparativo entre los diferentes tipos de luminarias en función de su rendimiento energético, comportamiento espectral, eficiencia mesópica y desempeño visual. Además de ello, se realiza una revisión de los resultados obtenidos del diseño propuesto para el sistema de alumbrado público, para ser más precisos de la luminaria que es producto de la incorporación de criterios de visión mesópica en el diseño, cálculos y elección de la potencia de luminaria adecuada a las normativas y teniendo en cuenta los criterios de visión mesópica sin comprometer la calidad visual nocturna de los usuarios. Los principales resultados cuantitativos son los siguientes:

Tabla 28

Rendimiento Lumínico Promedio por Tipo de Luminaria

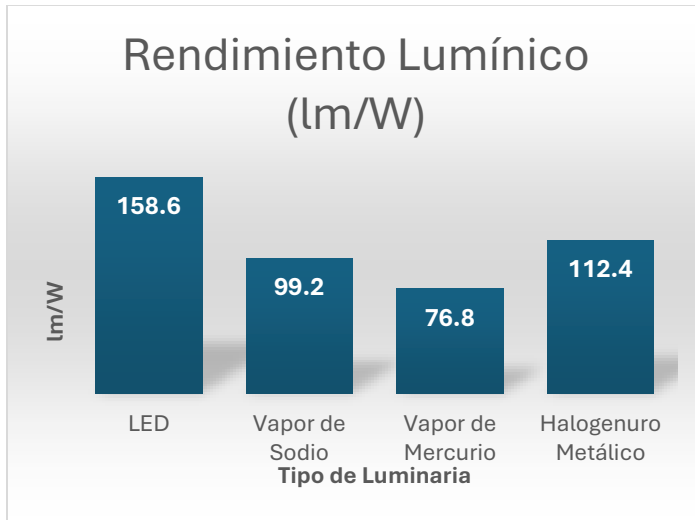
Tipo de Luminaria	Rendimiento Lumínico (lm/W)
LED	158.6
Vapor de Sodio	99.2
Vapor de Mercurio	76.8
Halogenuro Metálico	112.4

Nota: Elaboración propia

Para mejor visualización de los datos expresados en la tabla 28, donde se comparan los rendimientos lumínicos de cada uno de los tipos de luminarias realizando la división entre los lúmenes y la potencia que suministran, se presenta el siguiente gráfico.

Figura 37

Rendimiento Lumínico por Tipo de Luminaria



Nota: Elaboración propia

La figura 37 ilustra la diferencia entre los rendimientos lumínicos entre cada una de las cuatro luminarias utilizadas, donde se muestra la superioridad de la luminaria LED y la de halogenuro metálico respecto a las otras dos luminarias.

Tabla 29

Consumo energético mensual estimado por tipo de luminaria instalada en banco de pruebas (kWh/mes)

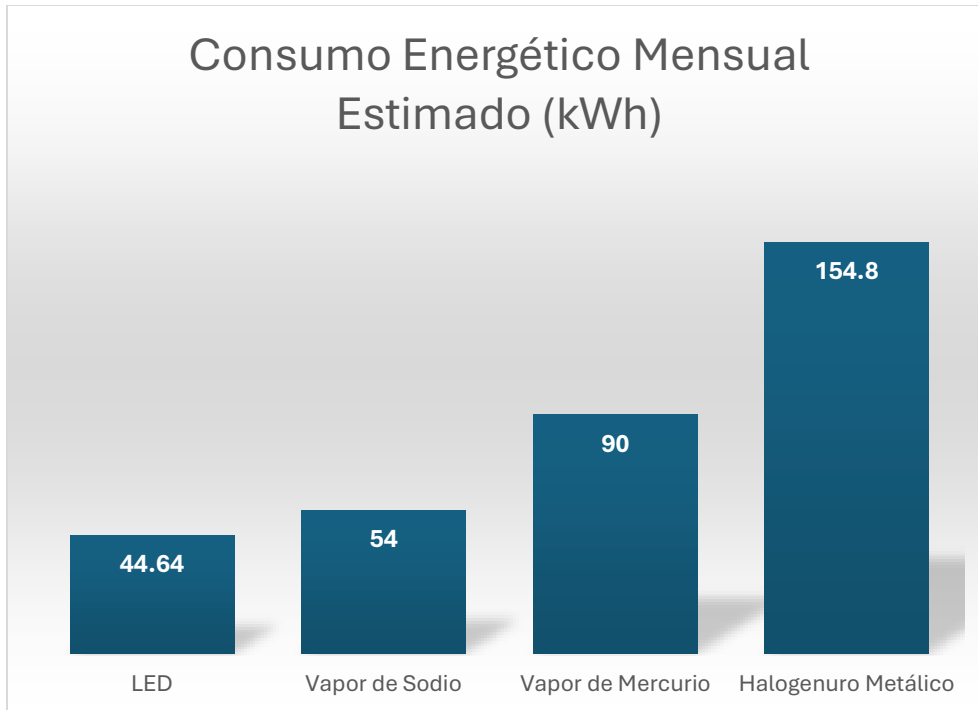
Tipo de luminaria	Consumo mensual (kWh)
LED	44.6
Vapor de Sodio	54
Vapor de Mercurio	90
Halogenuro Metálico	154.8

Nota: Elaboración propia

En la tabla 29 se comparan los consumos energéticos de cada tipo de luminaria, esto se muestra gráficamente en la figura 38.

Figura 38

Consumo Energético Mensual Estimado (kWh)



Nota: Elaboración propia

Como se muestra en la figura 38, las 2 luminarias con menor rendimiento lumínico, Vapor de Sodio y Vapor de Mercurio, tienen un consumo energético intermedio entre las cuatro, además de que la luminaria de halogenuro metálico tiene el mayor consumo energético, esto indica que, a pesar de ser la segunda luminaria con mejor rendimiento lumínico, es la peor en cuanto a consumo energético. Adicionalmente, la luminaria LED es la que menos energía consume y la que mejor rendimiento lumínico tiene, con un consumo de menos del 50% en relación a la de vapor de mercurio y menos del 30% en relación a la de halogenuro metálico.

Tabla 30

Factor S/P y Eficiencia Mesópica por Luminaria

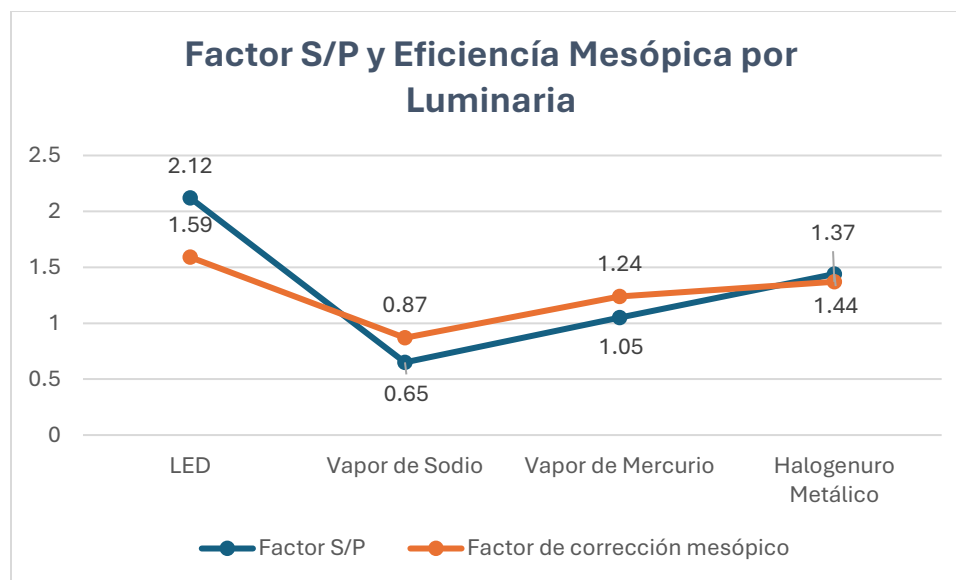
Tipo de luminaria	Factor S/P	Factor de corrección mesópico
LED	2.12	1.59
Vapor de Sodio	0.65	0.87
Vapor de Mercurio	1.05	1.24
Halogenuro Metálico	1.44	1.37

Nota: Elaboración propia

La tabla 30 muestra el factor S/P y la eficiencia mesópica para cada tipo de luminaria, esto muestra que las luminarias LED y halogenuro metálico son las que tienen mayor eficiencia mesópica.

Figura 39

Factor S/P y Eficiencia Mesópica por Luminaria



Nota: Elaboración propia

La figura 39 muestra gráficamente la diferencia entre eficiencias mesópicas, muestran que las luminarias de vapor de sodio y mercurio son las que tienen menor eficiencia mesópica.

Tabla 31

Reducción Porcentual de Consumo Energético al Implementar Criterios Mesópicos

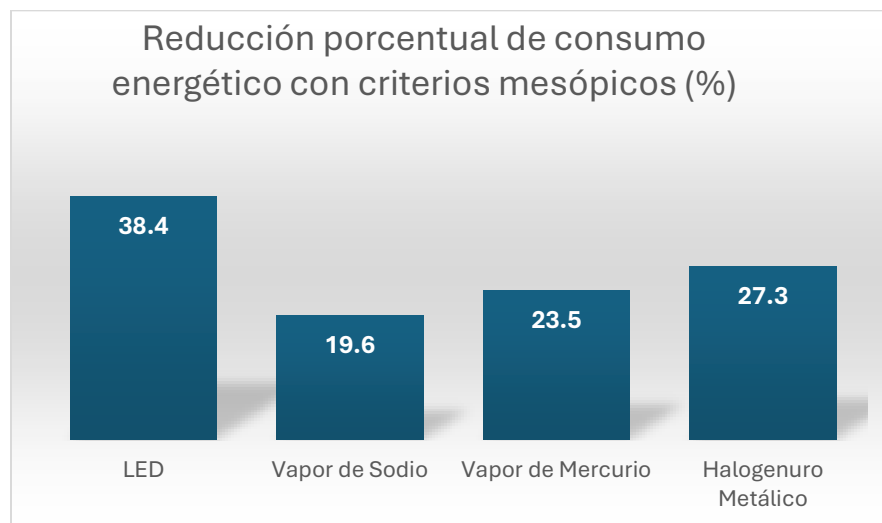
Tipo de luminaria	Ahorro estimado (%)
LED	38.4
Vapor de Sodio	19.6
Vapor de Mercurio	23.5
Halogenuro Metálico	27.3

Nota: Elaboración propia

En la tabla 31 se muestra la reducción porcentual de consumo energético que se tendría al implementar criterios mesópicos para cada tipo de luminaria, suponiendo que se tiene ya instalado cada tipo de luminaria.

Figura 40

Reducción Porcentual de Consumo Energético con Criterios Mesópicos (%)



Nota: Elaboración propia

En la figura 40 se muestra que las luminarias LED y Halogenuro metálico tendrían un mejor desempeño en el escenario de aplicación de criterios mesópicos, y tomando los resultados mostrados en las tablas anteriores, estos dos tipos de luminarias son los más eficientes mesópica

y lumínicamente, y son los que consumen menos energía y podrían consumir menos energía si se regulan a funcionar con criterios mesópicos.

En la Tabla 32 se hace un consolidado de las tecnologías que se analizaron, así como la propuesta que se hace con criterios mesópicos con valores importantes para realizar el análisis de la situación actual y el escenario propuesto.

Tabla 32

Tabla comparativa consolidada de tecnologías analizadas

Tecnología	Potencia (W)	Lux fotópico	S/P Ratio	Lux mesópico	Eficiencia mesópica (lux/W)
VSAP 150W (actual)	150	13.46	0.62	7.78	0.052
Halogenuro 430W	430	22.7	1.49	31.53	0.073
LED 124W	124	162.7	1.645	249.52	2.012
LED 69W (mesópico propuesto)	68.81	30.00	1.64	49.35	0.717

Nota: La eficiencia mesópica se calcula como el cociente entre el valor de Lux mesópico y la potencia de la luminaria. Elaboración propia

A continuación, se presentan los resultados obtenidos del análisis comparativo entre el sistema de alumbrado público con criterios fotópicos (estado actual) y el sistema propuesto basado en criterios mesópicos. Los resultados se organizan de acuerdo con las variables dependientes de la investigación: eficiencia energética y calidad visual.

4.1.1. Resultados de eficiencia energética

4.1.1.1 Consumo mensual de energía (kWh)

El consumo energético mensual se estimó en función de las luminarias estudiadas y extrapolado a un total de 250 luminarias instaladas en el campus. Para el sistema instalado con luminarias VSAP de 150 W, el consumo anual por unidad es de 657.00 kWh (estimación en base

a operación nocturna promedio de 12 horas), resultando en un consumo total de 13500 kWh/mes para el sistema. En el sistema propuesto, con luminarias LED de 69 W, el consumo anual por unidad es de 302.22 kWh, equivalente a 6,210.00 kWh/mes. Esto representa una reducción de aproximadamente 54% usando la tecnología LED de 69 W calculados usando los parámetros de visión mesópica. (ver Tabla 33).

Para las otras dos tecnologías de manera análoga se presentan los consumos respectivos en la tabla 33, donde se comparan las 3 tecnologías que existen instaladas en el campus y la propuesta producto de la incorporación de los parámetros de visión mesópica. En la última columna se incluye la reducción porcentual del consumo mensual de energía comparando las 3 tecnologías existentes en el campus con las luminarias LED de 69W propuestas en el presente trabajo.

Tabla 33

Comparación del consumo energético mensual estimado para 250 luminarias (kWh)

Sistema	Consumo mensual (kWh)	Reducción porcentual de consumo mensual (%)
LED (124W)	11160.00	44.3
Vapor de Sodio (VSAP 150W)	13500.00	54.0
Halogenuro (430 W)	38700.00	83.9
LED Propuesto (69W)	6,210.00	

Nota: Elaboración propia

4.1.1.2 Potencia instalada (W)

La potencia instalada total del sistema instalado con VSAP es de 250 luminarias × 150 W = 37500 W. De manera análoga para las luminarias de tipo LED de 124 W se tiene 31000 W y Halogenuro con 430 W se tiene 107500 W de potencia instalada. Para el sistema mesópico propuesto, con luminarias de 69 W, la potencia instalada total es de 17250 W (ver Tabla 34).

Tabla 34*Comparación de potencia instalada total para cada tecnología (W)*

Sistema	Potencia total (W)	Reducción porcentual de potencia instalada (%)
LED (124W)	31000	44.3
Vapor de Sodio (VSAP 150W)	37500	54.0
Halogenuro (430 W)	107500	83.9
LED Propuesto (69W)	17250	

Nota: Elaboración propia**4.1.1.3 Eficiencia luminosa del sistema (lux/W)**

La eficiencia luminosa mesópica del sistema tradicional es de 0.052 lux/W, mientras que la del sistema mesópico propuesto es de 0.717 lux/W (ver Tabla 35). Esto representa un incremento del 1,278% en la relación luz útil percibida por unidad de potencia.

Tabla 35*Eficacia luminosa del sistema (lux/W)*

Sistema	Eficiencia mesópica (lux/W)
Vapor de sodio (VSAP 150W)	0.052
Propuesto (LED 69W)	0.717

Nota: Elaboración propia**4.1.2. Resultados de calidad visual****4.1.2.1 Iluminancia media (lux)**

El sistema tradicional con VSAP presenta una iluminancia media fotópica de 13.46 lux, que corregida bajo visión mesópica equivale a 7.78 lux. El sistema propuesto con LED a 69 W ofrece 30 lux fotópicos y 49.35 lux mesópicos, representando una mejora sustancial en condiciones nocturnas (ver Tabla 36).

Tabla 36*Iluminancia media por tecnología (lux)*

Tecnología	Lux fotópico	Lux mesópico
LED 69W a 8 m (mesópico)	30.00	49.35
Halogenuro 430W a 9.6 m	22.70	31.53
VSAP 150W a 9.6 m	13.46	7.78

Nota: Elaboración propia**4.1.2.2 Uniformidad de iluminancia (U₀)**

La uniformidad del sistema mesópico propuesto fue calculada como 0.41, cumpliendo el valor mínimo normativo EN 13201 (≥ 0.4). El sistema actual con VSAP no alcanza este umbral, situándose en 0.28 (ver Tabla 37).

Tabla 37*Uniformidad de iluminancia (U₀)*

Sistema	Uniformidad (U₀)
Instalado VSAP (fotópico)	0.28
Propuesto (mesópico)	0.41

Nota: Elaboración propia**4.1.2.3 Índice de deslumbramiento (TI)**

El índice TI del sistema actual es de 19%, mientras que en el diseño mesópico es de 13%, indicando menor riesgo de deslumbramiento y mayor confort visual (ver Tabla 38).

Tabla 38*Índice de deslumbramiento (TI)*

Sistema	Índice TI (%)
Instalado VSAP (fotópico)	19
Propuesto (mesópico)	13

Nota: Elaboración propia**4.2. Discusión de Resultados**

Los resultados obtenidos muestran de manera consistente que la implementación de criterios de visión mesópica en el diseño del sistema de alumbrado público del campus

universitario representa una mejora significativa tanto en eficiencia energética como en calidad visual nocturna.

En términos energéticos, el sistema propuesto con luminarias LED de 69 W reduce el consumo mensual en un 54 % con respecto al sistema actual compuesto por luminarias VSAP de 150 W. Este ahorro se traduce en beneficios económicos considerables y en una reducción del impacto ambiental debido a la menor demanda de energía eléctrica.

La potencia instalada también experimenta una reducción notable, de 37500 W a 17250 W, sin que ello implique pérdida de funcionalidad luminotécnica. Este hallazgo valida que es posible mantener niveles adecuados de iluminación con una fracción de la potencia, siempre que se consideren las condiciones reales de visión nocturna y no solo parámetros fotópicos.

Respecto a la eficacia luminosa, el cambio de 0.052 lux/W a 0.717 lux/W implica un aumento de más de 1,200 % en la relación entre luz útil percibida y energía consumida. Esta mejora se debe al ajuste espectral y a la adaptación de las condiciones de diseño a la fisiología visual humana en entornos mesópicos.

En relación con la calidad visual, los valores de iluminancia corregida bajo visión mesópica muestran que el sistema propuesto no solo cumple, sino que supera significativamente los niveles actuales. De 7.78 lux mesópicos con VSAP se pasa a 49.35 lux con LED mesópico, mejorando así la seguridad peatonal y vehicular.

Los parámetros de uniformidad ($U_0 = 0.41$) y deslumbramiento ($TI = 13 \%$) también mejoran en el sistema propuesto, lo que garantiza una experiencia visual más confortable y segura. Estas mejoras son fundamentales para cumplir con los estándares de calidad establecidos en la normativa EN 13201.

Finalmente, la comparación con tecnologías como halogenuro metálico y LED de mayor potencia (124 W) indica que, aunque estos pueden alcanzar mejores niveles de iluminancia, lo hacen a costa de un mayor consumo. El sistema LED de 69 W se muestra como una solución más eficiente desde una perspectiva energética y normativamente adecuada.

4.3. Contraste de Hipótesis

Hipótesis específica 1

Enunciado: *“El sistema actual presenta deficiencias energéticas.”*

Evidencia: El sistema instalado con luminarias VSAP de 150 W consume 13 500 kWh/mes para 250 unidades, mientras que el diseño propuesto con LED de 69 W requiere 6 210 kWh/mes, lo que implica una reducción del 54 % del consumo mensual de energía. Además, la potencia instalada desciende de 37 500 W a 17 250 W al pasar de VSAP a LED mesópico.

Juicio de contraste: Confirmada. Las magnitudes de consumo y potencia demuestran que el sistema actual está sobredimensionado energéticamente respecto a la alternativa mesópica propuesta.

Hipótesis específica 2

Enunciado: *“Con iluminación mesópica se reduce el flujo luminoso sin que se afecte la visibilidad.”*

Evidencia: La eficiencia luminosa mesópica se incrementa de 0.052 lux/W (VSAP 150 W) a 0.717 lux/W con el diseño LED de 69 W, lo que representa un aumento del 1 278 % en luz útil percibida por unidad de potencia. Asimismo, la iluminancia mesópica se eleva de 7.78 lux (VSAP) a 49.35 lux en el sistema propuesto, garantizando niveles de visibilidad superiores bajo condiciones nocturnas.

Juicio de contraste: Confirmada. La aplicación de criterios mesópicos a la iluminación incrementa significativamente la eficacia del flujo luminoso sin detrimento de la percepción visual.

Hipótesis específica 3

Enunciado: *“El nuevo diseño reduce el consumo energético.”*

Evidencia: Comparado con las tecnologías existentes (VSAP 150 W, LED 124 W y halogenuro metálico 430 W), el sistema LED mesópico de 69 W reduce el consumo mensual en rangos de 44.3 % a 83.9 %, siendo el menor consumo 6 210 kWh/mes frente a 38 700 kWh/mes del halogenuro metálico.

Juicio de contraste: Confirmada. El diseño propuesto evidencia la disminución efectiva del consumo energético frente a todas las alternativas instaladas.

Hipótesis específica 4

Enunciado: *“La percepción visual mejora con el sistema propuesto.”*

Evidencia: La iluminancia mesópica se incrementa de 7.78 lux (VSAP) a 49.35 lux en el diseño LED mesópico. La uniformidad (U_0) pasa de 0.28 a 0.41, alcanzando el mínimo normativo exigido por EN 13201. El índice de deslumbramiento (TI) desciende de 19 % a 13 %, mejorando el confort visual nocturno.

Juicio de contraste: Confirmada. Los indicadores fotométricos y de confort visual ratifican la mejora perceptual bajo el nuevo esquema.

Hipótesis general

Enunciado: *“La aplicación de parámetros de iluminación pública basados en criterios de visión mesópica incrementa significativamente la eficiencia energética del sistema de alumbrado público en el campus de la UNI.”*

Evidencia integrada: a reducción del consumo eléctrico ($\approx 54\%$), el aumento de la eficacia mesópica (0.052 a 0.717 lux/W) y la mejora de los parámetros de calidad visual ($U_0 = 0.41$; TI = 13 %) demuestran un sistema más eficiente y visualmente adecuado.

Juicio de contraste: Confirmada. El análisis integral evidencia disminución sustancial de energía y mejora del desempeño visual, en concordancia con EN 13201 y Norma DGE - “Alumbrado de Vías y Espacios Públicos”.

CONCLUSIONES

La presente investigación tuvo como propósito evaluar la influencia de la aplicación de parámetros de iluminación pública según criterios de visión mesópica en la eficiencia energética del sistema de alumbrado público en el campus de la UNI. Con base en el desarrollo metodológico y los resultados obtenidos, se presentan las siguientes conclusiones:

1. El sistema LED de 69 W diseñado bajo criterios de visión mesópica reduce el consumo mensual a 6 210 kWh frente a 11 160 kWh de LED 124 W, 13 500 kWh de VSAP 150 W y 38 700 kWh de halogenuro metálico 430 W, lo que implica ahorros de 44,3 %, 54,0 % y 83,9 % respectivamente; la potencia instalada desciende a 17 250 W respecto a 31 000 W, 37 500 W y 107 500 W, confirmando reducciones equivalentes, y la eficiencia mesópica aumenta de 0,052 lux/W (VSAP) a 0,717 lux/W (LED 69 W), incremento relativo de 1 278 %, evidenciando que la propuesta optimiza integralmente la eficiencia energética (kWh, W y lux/W).
2. El sistema propuesto garantiza mejores condiciones visuales nocturnas, ya que la iluminancia mesópica se eleva de 7,78 lux (VSAP) a 49,35 lux (LED 69 W), la uniformidad alcanza $U_0 = 0,41$ frente a $U_0 = 0,28$ del sistema actual y el índice de deslumbramiento disminuye de 19 % a 13 %, cumpliendo y superando los rangos establecidos por EN 13201 y la Norma DGE - "Alumbrado de Vías y Espacios Públicos", lo que confirma el adecuado confort y seguridad visual.
3. El enfoque mesópico resulta técnica y normativamente viable porque el diseño con LED 69 W satisface los niveles de iluminancia fotópica y mesópica requeridos sin sobredimensionar la potencia; esto se logra mediante el ajuste espectral y el uso de la relación S/P contemplada en CIE 191:2010, respaldado por simulaciones luminotécnicas y comparación con normas vigentes.

4. La comparación consolidada de alternativas demuestra que la propuesta mesópica representa el punto óptimo entre eficiencia energética y desempeño visual, ya que, frente a tecnologías de mayor potencia o menor eficiencia, el LED de 69 W mantiene niveles de iluminancia adecuados con un consumo sensiblemente inferior, según la matriz de resultados y las tablas de contraste.
5. El procedimiento metodológico no experimental y comparativo sustentado en simulación luminotécnica y datos reales de consumo establece un esquema replicable, basado en supuestos de operación consistentes y fórmulas de cálculo verificables, que puede trasladarse a otros campus o municipios interesados en modernizar su alumbrado público con criterios de eficiencia y calidad visual.

RECOMENDACIONES

1. Se sugiere ejecutar el rediseño con luminarias LED de 69 W bajo criterios mesópicos como fase prioritaria, fijando metas operativas específicas: consumo mensual $\leq 6\,300$ kWh, potencia instalada $\leq 17\,500$ W, eficacia mesópica $\geq 0,70$ lux/W, uniformidad $U_0 \geq 0,40$ e índice de deslumbramiento $TI \leq 15$ %. Estas metas permiten medir el éxito del proyecto en relación con las variables de eficiencia energética y calidad visual.
2. Se propone actualizar las especificaciones técnicas internas del campus para que adopten CIE 191:2010 y EN 13201 en el proceso de diseño y verificación, con protocolos claros de medición fotópica y mesópica, ratios S/P, distancias entre postes y niveles mínimos de iluminancia. Esta actualización debe integrarse en los pliegos de contratación y en la matriz de consistencia del sistema de alumbrado.
3. Actualizar las políticas institucionales y normativas locales para reconocer formalmente la pertinencia del enfoque mesópico, facilitando su inclusión en procesos de licitación, diseño y evaluación de proyectos de alumbrado.
4. Se recomienda establecer un sistema de monitoreo continuo de consumo y desempeño luminotécnico mediante medidores inteligentes y auditorías semestrales de iluminancia, uniformidad y TI. El registro sistemático (kWh/mes, lux mesópicos/W, niveles de iluminancia y TI) permitirá ajustar la operación nocturna y evidenciar el sostenimiento de la eficiencia a mediano plazo.
5. Se recomienda un plan de mantenimiento preventivo anual con limpieza de difusores, verificación del flujo luminoso residual y recalibración del sistema fotométrico, con el objetivo de mantener la eficacia por encima del 90 % del valor inicial durante la vida útil. El registro de horas de operación y de depreciación lumínica (L80 o L90 según el fabricante) garantiza la sostenibilidad de la eficiencia.

6. Se propone consolidar una base de datos institucional que almacene las mediciones energéticas y fotométricas, junto con las decisiones de rediseño y sus resultados. Esta base de datos permitirá replicar el modelo en otras facultades o municipios y servirá como insumo para futuras investigaciones sobre eficiencia energética y percepción visual en alumbrado público.
7. Extender la investigación hacia escenarios más amplios que consideren variables complementarias como percepción social, seguridad ciudadana y huella de carbono, consolidando la visión mesópica como una herramienta integral de sostenibilidad urbana.

Referencias

- Becchio, C., Botta, M., & Corgnati, S. (2020). Smart Lighting for Smart Cities. *Energy Procedia*(78), 1600 - 1605.
- Boyce, P. (2014). *Human Factors in Lighting*. CRC Press.
- Boyce, P., Fotios, S., & Richards, M. (2009). Road Lighting and energy saving. *Lighting Research and Technology*, 3(41), 245 - 260.
- Circutor. (25 de September de 2014). *Circutor*. Circutor.com: <https://circutor.com/casos-de-exito/sistema-de-gestion-inteligente-de-alumbrado-publico/>
- Commission Internationale de l'Éclairage (CIE). (2010). *CIE 191:2010 - Recommended System for Mesopic Photometry Based on Visual Performance*. CIE.
- Cussó , F., López, C., & Villar, R. (2004). *Física de los procesos biológicos*. Editorial Ariel S.A.
- Dimieri, L. D. (2015). *Aspectos Físicos de la Visión Humana*.
- Dirección General de Electricidad (DGE). (2021). *Norma DGE Alumbrado de vías y espacios públicos*. Ministerio de Energía Y Minas.
- Drake, R., Vogl, W., & Mitchell A., W. (2005). *GRAY, Anatomía para estudiantes*. Elsevier Eespaña S.A.
- Falchi, F., Cinzano, P., Duriscoe, D., Kyba, C., & Elvidge, C. (2016). The new world atlas of artificial night sky brightness. *Science Advances*.
- Fischbarg, J. (2006). *Advances in organ biology. The biology of the eye* (Vol. 10). Elsevier.
- Fotios, S. &. (2016). Specifying enough light to feel safe outdoors. *Lighting Research & Technology*, 48, 293-304.
- Fotios, S., & Gibbons, R. (2018). Road Lighting and Mesopic Vision: Implications for Vehicle and Pedestrian Safety. *Transportation Research Record*, 18(2672), 1 - 10.

- Fryc, I., Czyzewski, D., Fan, J., & Galatanu, C. (2021). The Drive towards Optimization of Road Lighting Energy Consumption Based on Mesopic Vision - A Suburban Street Case Study. *Energies*, 14(4), 14. <https://doi.org/https://doi.org/10.3390/en14041175>
- Gamarra Aguilar, M. G. (2021). *Propuesta de mejora del diseño de iluminación del alumbrado público actual del Perú, basado en estándares de calidad según el comité europeo de normalización*. Lima: Universidad Nacional de Ingeniería.
- García Gil, M., San Martín Páramo, R., Solano Lamphar, H., & Francia Payàs, P. (2012). *Contaminación Lumínica. Una visión desde el foco contaminante: el alumbrado artificial*. Universidad Politécnica de Catalunya.
- Gaston, K. J. (2012). The biological impacts of artificial light at night: the research challenge. *Philosophical Transactions of the Royal Society B*, 370, 133.
- Gokhale, A., Shah, H., & Gadgil, A. (2019). Solar Street Lighting System Based on Battery Energy Storage. *Journal of Energy Storage*(23), 250 - 260.
- Goodman, S. (2010). Night-time Design: Exploring the Effects of Mesopic Vision on the Built Environment. *Lighting Research and Technology*, 4(42), 395 - 411.
- Gustavsen, A., Jelle, B., & Grynning, S. (2014). High-Performance LED Lighting. *Building and Environment*(80), 274 - 282.
- Halliday, D., Resnick, R., & Walker, J. (2013). *Fundamentals of Physics*. Wiley.
- Illuminating Engineering Society of North America (IESNA). (2011). *Lighting Handbook: Reference and Application*. IESNA.
- ISO 8995-1. (2002). *Lighting of Work PLaces - Part 1: Indoor*. International Organization for Standardization.
- Kort, A. H. (2012). Light distribution in dynamic street lighting: Two experimental studies on its effects on perceived safety, prospect, concealment and escape. *Journal of Environmental Psychology*, 32, 342 - 352.

- Li, M., Wu, P., Ding, J., Yao, Q., & Ju, J. (2020). The Circadian Effect Versus Mesopic Effect in Road Lighting Applications. *Applied Sciences*(10). <https://doi.org/10.3390/app10196975>
- Marin, M. C. (2006). *Manual: Óptica fisiológica. El sistema óptico del ojo y la visión binocular*. Madrid: Universidad Complutense de Madrid.
- Meza Surichaqui, R. M. (2024). *Mejora del diseño de iluminación en la vía arterial Tupac Amaru (Frontis UNI), para reducir el impacto de la contaminación lumínica*. Lima: Universidad Nacional de Ingeniería.
- Ministerio de Energía y Minas. (2021). *Reglamento de eficiencia energética en alumbrado público (RM 460-2021-MINEM)*. Ministerio de Energía y Minas.
- Navarro Valls, J. (2012). *Efecto de la luz cenital difusa sobre la agudeza visual y la sensibilidad al contraste en la conducción mesópica*. Madrid: Universidad Europea de Madrid.
- Orange. (4 de Enero de 2022). *Orange Blog*. Orange Blog / Innovacion: <https://blog.orange.es/innovacion/farolas-solares-smart-city/>
- Prado Cienfuegos, I. (2024). *Evaluación de la viabilidad técnica de un diseño de iluminación que promueve el bienestar en oficinas en base a la guía de diseño UL 24480*. Lima: Universidad Nacional de Ingeniería.
- Puelles López, L., Martínez Pérez, S., & Martínez de la Torre, M. (2008). *Neuroanatomía*. Ed. Médica Panamericana.
- Raynham, P., & Saksvikronning, T. (2003). White light and facial recognition. *The Lighting Journal*, 1(68), 29 -33.
- Rea, M. (2000). *The IESNA Lighting Handbook: Reference and Application*. Illuminating Engineering Society of North America (IESNA).
- Schreuder, D. (2014). *Road Lighting for Safety*. Routledge.
- Schubert, E., & Kim, J. (2005). Solid-State Light Sources Getting Smart. *Science*, 308(5726), 1274 - 1278.

- Segama Salvatierra, R. (2017). *Propuesta de implementación de un sistema de telegestión de alumbrado público para el campus universitario de la Universidad Nacional de Ingeniería*. Lima: Universidad Nacional de Ingeniería.
- Stevanovic, S., & Radulodic, D. (2020). Energy Efficiency in Public Lighting Systems: A Comparative Study. *Energy Reports*, 6, 579 - 585.
- United Nations. (2015). *Transforming our world: the 2030 Agenda for Sustainable Development*. United Nations.
- Zhang, L., & Zhao, J. (2018). Urban Lighting and Energy-Saving Strategies in China: A Case Study. *Sustainability*, 10(5), 1321.
- Zúñiga Figueroa, L. E. (2023). *Análisis de la reducción de costos del servicio de alumbrado público en una empresa de distribución de energía eléctrica del sur del Perú con luminarias led respecto a los de vapor de sodio de alta presión - VSAP*. Lima: Universidad Nacional de Ingeniería.

Anexos

Anexo 1 <i>Matriz de Consistencia</i>	1
Anexo 2 <i>Simulación Dialux de Exteriores Info UNI – FIM</i>	2
Anexo 3 <i>Simulación Dialux de Exteriores FISS</i>	3
Anexo 4 <i>Simulación Dialux de Exteriores FIQT</i>	4

Anexo 1

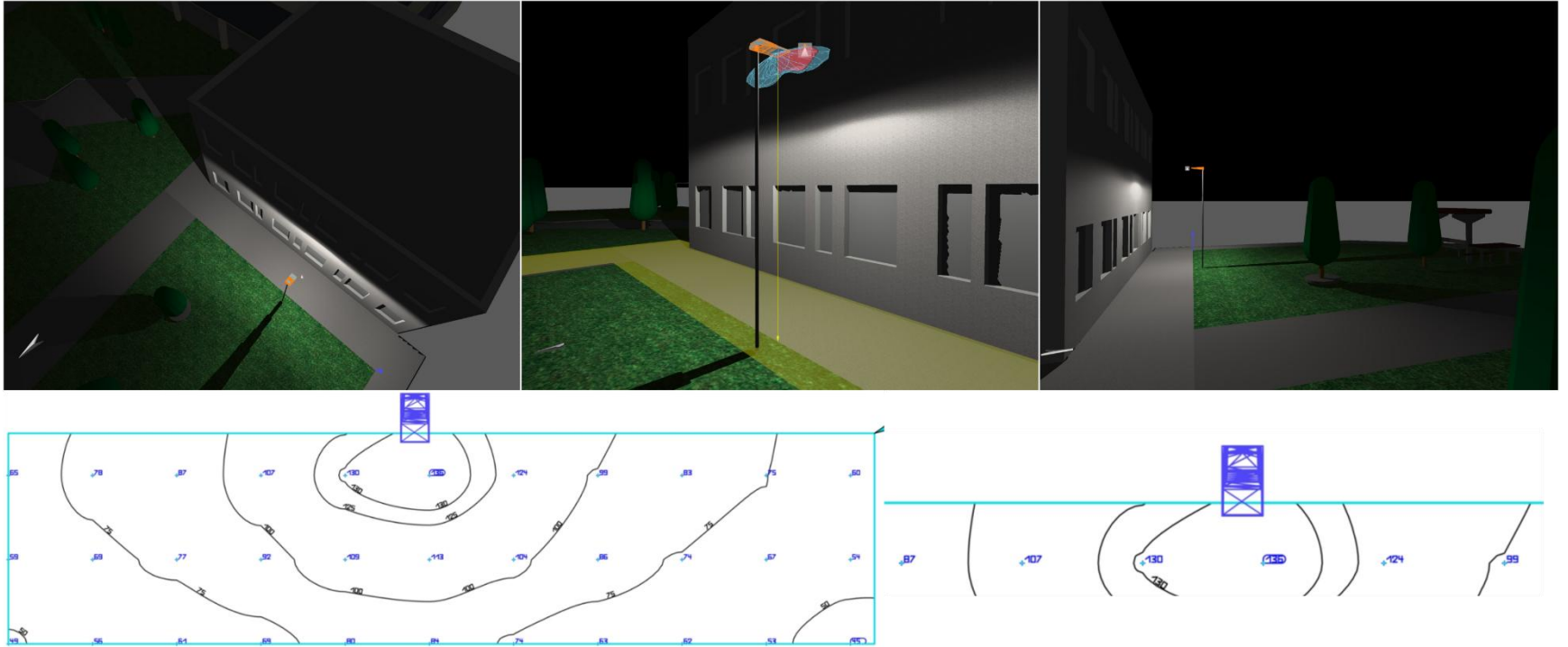
Matriz de Consistencia

Problema General	Objetivo General	Hipótesis General	Variable Independiente	Metodología
¿Cómo influyen los criterios de visión mesópica en la optimización energética del Sistema de Alumbrado Público en el Campus de la Universidad Nacional de Ingeniería?	Evaluar la influencia de la aplicación de parámetros de iluminación pública según criterios de visión mesópica en la eficiencia energética del sistema de alumbrado público en el campus de la UNI.	La aplicación de parámetros de iluminación pública basados en criterios de visión mesópica incrementa significativamente la eficiencia energética del sistema de alumbrado público en el campus de la UNI.	Parámetros de visión mesópica.	<ul style="list-style-type: none"> • Tipo: Aplicada • Enfoque: Cuantitativo • Nivel: Explicativa • Alcance: Tecnológico–propositivo con validación comparativa. • Diseño de Investigación: No experimental de tipo comparativo–simulado
Problemas Específicos	Objetivos Específicos	Hipótesis Específicas	Variable Dependiente	
¿Cuál es el nivel actual de eficiencia energética del sistema de alumbrado público en el campus?	Diagnosticar el estado actual del sistema de alumbrado público en cuanto a eficiencia energética.	El sistema actual presenta deficiencias energéticas.	<ul style="list-style-type: none"> • Eficiencia energética del sistema de alumbrado público. 	
¿Qué parámetros de iluminación bajo visión mesópica pueden aplicarse?	Seleccionar parámetros técnicos adecuados basados en visión mesópica.	Con iluminación mesópica se reduce el flujo luminoso sin que se afecte la visibilidad.		
¿Cómo varía el consumo energético con la implementación de dichos parámetros?	Diseñar un sistema de alumbrado que incorpore dichos parámetros.	El nuevo diseño reduce el consumo energético.		
¿Qué mejoras se evidencian en calidad de iluminación y ahorro energético?	Evaluar el impacto del nuevo diseño en la eficiencia energética.	La percepción visual mejora con el sistema propuesto.		

Nota: Elaboración Propia

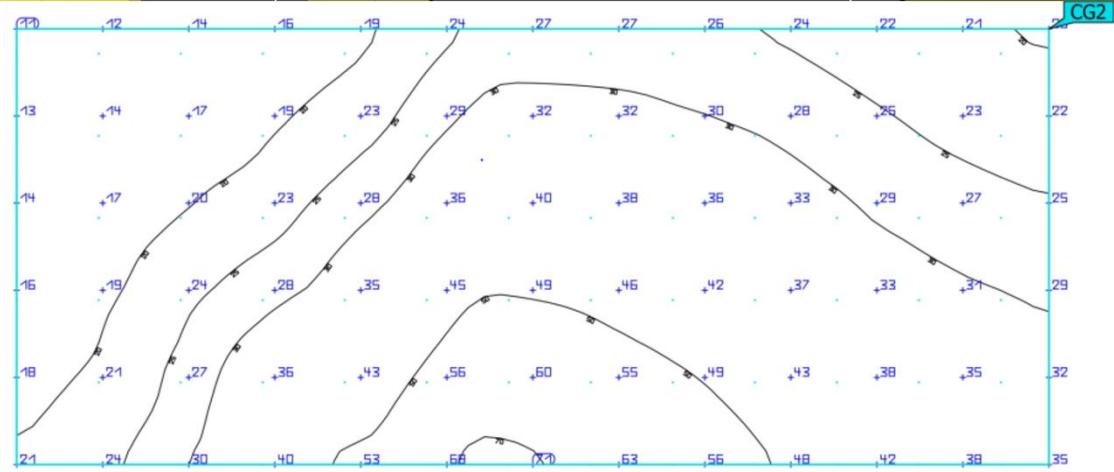
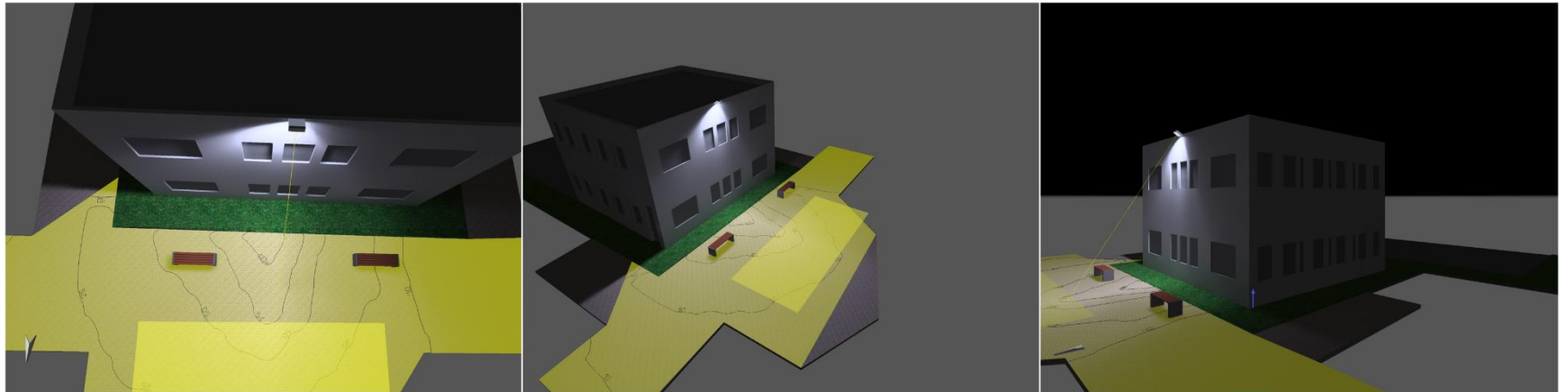
Anexo 2

Simulación Dialux de Exteriores Info UNI – FIM



Anexo 3

Simulación Dialux de Exteriores FISS



Anexo 4

Simulación Dialux de Exteriores FIQT

