



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO

FACULTAD DE INGENIERÍA

**Optimización energética del
sistema de iluminación del
sótano del edificio D de la
Facultad de Ingeniería**

TESIS

Que para obtener el título de
Ingeniera Eléctrica Electrónica

P R E S E N T A

Berenice Quetzalli Morales Ojeda

DIRECTOR DE TESIS

Dr. Mario Roberto Arrieta Paternina



Ciudad Universitaria, Cd. Mx., 2025



**PROTESTA UNIVERSITARIA DE INTEGRIDAD Y
HONESTIDAD ACADÉMICA Y PROFESIONAL
(Titulación con trabajo escrito)**



De conformidad con lo dispuesto en los artículos 87, fracción V, del Estatuto General, 68, primer párrafo, del Reglamento General de Estudios Universitarios y 26, fracción I, y 35 del Reglamento General de Exámenes, me comprometo en todo tiempo a honrar a la institución y a cumplir con los principios establecidos en el Código de Ética de la Universidad Nacional Autónoma de México, especialmente con los de integridad y honestidad académica.

De acuerdo con lo anterior, manifiesto que el trabajo escrito titulado OPTIMIZACION ENERGETICA DEL SISTEMA DE ILUMINACION DEL SOTANO DEL EDIFICIO D DE LA FACULTAD DE INGENIERIA que presenté para obtener el título de INGENIERO ELÉCTRICO ELECTRÓNICO es original, de mi autoría y lo realicé con el rigor metodológico exigido por mi Entidad Académica, citando las fuentes de ideas, textos, imágenes, gráficos u otro tipo de obras empleadas para su desarrollo.

En consecuencia, acepto que la falta de cumplimiento de las disposiciones reglamentarias y normativas de la Universidad, en particular las ya referidas en el Código de Ética, llevará a la nulidad de los actos de carácter académico administrativo del proceso de titulación.

BERENICE QUETZALLI MORALES OJEDA
Número de cuenta: 316049793

DEDICATORIA

A mi madre, Leticia, y a mi hermana, Paola, por sostenerme siempre que lo he necesitado.

AGRADECIMIENTOS

A mi madre, Leticia Sandra Ojeda Salazar, por no solo darme vida sino por todo el esfuerzo y trabajo arduo que la vi hacer para darnos una vida que valiera; por amarme, apoyarme y creer en mí; gracias por ser mi ejemplo desde siempre y por siempre.

A mi hermana, Paola Tzitzitlini Morales Ojeda, gracias por siempre estar para mí, por cuidarme, motivarme y por siempre instruirme. Sé que nada es más grande que el amor que nos tenemos.

A mi padre, Pablo Morales Diaz, y a mi madrastra, Jeacqueline Aguayo Gómez, gracias por siempre apoyarme y amarme. Las palabras no son suficientes para expresar mi gratitud y amor hacia ustedes.

A mi abuela, Gloria Yolanda Salazar Mendoza, y a mi abuelo, Juan Alberto Calixto Ojeda, por amarnos, acogernos y brindarnos su cuidado cuando la vida se complicó. También gracias mi tía, Jocelyn Itzel Ojeda Salazar, por todo su apoyo para que yo lograra terminar este trabajo.

A toda mi familia, que siempre está presente, gracias por tanto amor y apoyo incondicional.

A Oswaldo Bastida Rosaslanda, por su amor, paciencia y motivación para siempre continuar. Gracias por hacer de mi vida, desde nuestros días en la universidad, más bonita.

Con especial gratitud a mi asesor, el Dr. Mario Roberto Arrieta Paternina, por permitirme realizar este trabajo bajo su tutela. Gracias por todo el apoyo y la paciencia que siempre me brindó.

A todas las personas que trabajan en el laboratorio de Máquinas Eléctricas; al Ing. Alberto por su apoyo y por la apertura para ir y venir dentro del mismo; al profesor Iván por el equipo prestado para las mediciones; a los laboratoristas por su apoyo; a mis compañeros de la oficina por amenizar los días y ayudarme cuando lo necesité.

Gracias a todas las profesoras y profesores con quienes coincidí por todo el conocimiento compartido, y a mis amistades, que han hecho que la vida sea menos complicada.

Finalmente, agradezco al proyecto PAPIIT-IT102723 “Desarrollo de técnicas para la estimación de la constante de inercia de generadores mediante datos sincrofasoriales” y al proyecto IN114024 “Estimación, Monitoreo y Control Robusto de Convertidores basados en Electrónica de Potencia”.

Contenido

Capítulo 1. Introducción.....	7
1.1 Justificación.....	7
1.2 Hipótesis	7
1.3 Objetivos	8
1.3.1 Objetivo general.....	8
1.3.2 Objetivos específicos	8
1.4 Referentes Teóricos.....	9
1.4.1 Concepto de luz.....	9
1.4.2 Conceptos básicos de la iluminación.....	11
1.4.3 Tecnologías	18
Capítulo 2. Normatividad	24
2.1 Norma mexicana	24
2.1.1 NOM-025-STPS-2008	24
2.1.2 NOM-007-ENER-2014.....	26
2.1.3 Normas de apoyo	27
2.2 Norma europea	28
2.2.1 EN 12464-1:2021	28
Capítulo 3. Características físicas del sitio del proyecto y sistema de iluminación anterior	29
3.1 Descripción del Laboratorio de Máquinas Eléctricas.....	29
3.2 Luminarias del laboratorio	31
3.3 Mediciones de iluminación	32
3.4 Registro fotográfico	41
3.5 Análisis de calidad de la potencia	44

3.6	Luminarias de haluro metálico	45
Capítulo 4. Situación posterior con luminarias PLEP		48
4.1	Descripción del laboratorio en DIALux (con imágenes)	48
4.2	Tipo y características de las lámparas, distribución fotométrica potencia luminosa de las luminarias.	55
4.3	Plano de cálculo y niveles de iluminancia	57
4.4	Luminarias PLEP	66
4.5	Registro fotográfico	74
4.6	Calidad de potencia	76
Capítulo 5. Conclusiones.....		83
5.1	Trabajos futuros	84
Referencias y bibliografía		86

Capítulo 1. Introducción

1.1 Justificación

Actualmente, el laboratorio de Máquinas Eléctricas del sótano del Edificio D de la Facultad de Ingeniería (UNAM), cuenta con un sistema de iluminación principalmente conformada por luminarias Metal-Haluro. Como las luminarias de haluro metálico no han sido reemplazadas en un largo tiempo además de presentar tiempos lentos en su respuesta ante variaciones de tensión, provocan un consumo elevado de potencia para un bajo nivel de iluminación evidente, lo que ocasiona alto impacto en la eficiencia energética del sistema de iluminación y por ende del sistema.

Ante esto, el laboratorio busca dar solución a esta situación desfavorecedora con la implementación de nuevas luminarias para las 16 que se encuentran instaladas, y esta solución comprende el Proyecto de Tesis que se describe en este documento, el cual busca caracterizar y modelar las luminarias actuales y las propuestas, como uno de los objetivos principales del proyecto.

1.2 Hipótesis

En el sótano del edificio D, de la Facultad de Ingeniería, se encuentra el laboratorio de Máquinas Eléctricas con un sistema de iluminación que se ha mantenido igual alrededor de 10 años, cuando las luminarias instaladas en ese entonces fueron de haluro metálico. Ahora, con los años transcurridos y su vida útil en decadencia, su consumo de energía eléctrica que, si bien desde un inicio era elevada, lo sigue siendo, pero con niveles de iluminación menores a los establecidos en la norma, ya que algunas luminarias no pueden ni prender, esto aunado a su lento tiempo de respuesta ante variaciones de tensión.

Un nuevo sistema de iluminación conformado de luminarias PLEP, permitirá que los niveles de iluminación superen los niveles mínimos de la norma NOM-025-STPS-2008, gracias al flujo luminoso de las lámparas nuevas, esto, mientras su consumo de energía permanecerá por debajo de los de las luminarias de haluro metálico.

Con el modelo a realizar en el software DIALux Evo se espera complementar el análisis del nuevo sistema de iluminación, que producirá una mejora en cuanto a los niveles de iluminancia. Entonces, con la medición de las variables eléctricas para ambos casos, se buscará comparar y concluir que, con base en las características fotométricas y eléctricas de las nuevas luminarias, se utilizará una menor cantidad de energía eléctrica sin comprometer la calidad de la energía ni los requerimientos de la norma, estableciendo un nivel adecuado de eficiencia energética en términos de Densidad de Potencia Eléctrica para Alumbrado DPEA que se establece en la NOM-007-ENER-2014.

1.3 Objetivos

1.3.1 Objetivo general

Proponer un sistema de iluminación para el Sótano del edificio principal de la Facultad de Ingeniería, mediante la caracterización y modelado de distintos tipos de luminarias, con el propósito de optimizar energéticamente la instalación.

1.3.2 Objetivos específicos

Establecer el estado del arte de las luminarias más utilizadas en el área de interés.

Caracterizar y modelar las luminarias seleccionadas por medio del Software DIALux Evo.

Analizar el impacto que representan las luminarias seleccionadas ante los fenómenos de la calidad de la potencia eléctrica.

Realizar el análisis energético del sistema de iluminación mediante analizadores de calidad de energía.

Proponer un sistema de iluminación acorde al criterio, interpretación y modelado de luminarias con objeto de implementarlo en el Sótano de la Facultad de Ingeniería.

1.4 Referentes Teóricos

1.4.1 Concepto de luz

La IESNA, en su libro *Lighting Handbook*, establece que la luz, como una magnitud física, está definida en términos de su eficiencia relativa a lo largo del espectro electromagnético que se encuentra entre aproximadamente 380 y 780 nm, aunque visualmente existe variación en la eficiencia dentro de estos límites (IESNA, 2000).

Lo que nuestros ojos perciben es solo un rango del espectro radiante a la que también llamamos luz visible, irradiada a través del espacio en todas las direcciones, según lo explica el M. en C. Cesar Montalvo. La luz, al ser un fenómeno electromagnético, está constituida por partículas electromagnéticas llamadas *fotones*, las cuales se desplazan a una velocidad constante, siguiendo trayectorias rectilíneas con movimiento ondulatorio y propagándose en el vacío, en el aire, y en todos los cuerpos transparentes que atraviesa (Montalvo, 2010).

El sol emite energía radiante electromagnética compuesta por todas las radiaciones que se encuentran en el espectro electromagnético, como se grafican en la Figura 1.

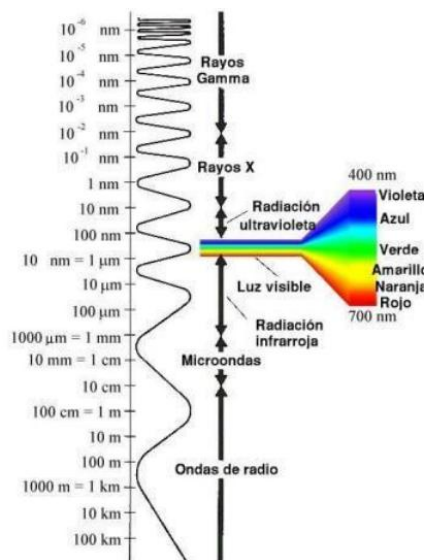


Figura 1. Longitudes de onda (nm) del espectro electromagnético. Tomado de "Óptica", por Montalvo Arenas, 2010 (<https://recursoseducativos.unam.mx/handle/123456789/20482>).

a) Longitud de onda

Llamamos longitud de onda luminosa a la distancia que hay entre dos crestas o dos valles sucesivos, la cual se mide en nanómetros (nm) tal y como se observa en la Figura 2. El rango de luz visible está comprendido de los 380 a los 480 nanómetros, y cada longitud de onda perteneciente a él es percibida como un color, que va del violeta (380 nm) al rojo (480 nm) (Montalvo, 2010).

El ojo humano cuenta con dos clases de fotorreceptores: los bastones y los conos. La visión fotópica (conos) nos permite percibir colores a partir de los tres fotorreceptores cónicos: amarillo, azul y rojo (colores primarios), mientras que la visión escotópica (bastones) capta sensaciones de blanco y negro (IESNA, 2000).

b) Amplitud de onda

Es la distancia a la cual quedan las partículas del medio donde se produce la onda desde su posición de equilibrio. La distancia máxima positiva se llama también cresta y la negativa, valle, de acuerdo con la Figura 2 (Rodríguez, 2009).

La amplitud de onda le confiere a un rayo luminoso, la intensidad luminosa o brillantez, sin modificar el color, es decir, si un haz luminoso de un color determinado es más intenso o más brillante que otro del mismo color es porque la amplitud de onda del primero es mayor que la del segundo. (Montalvo, 2010, p.2)

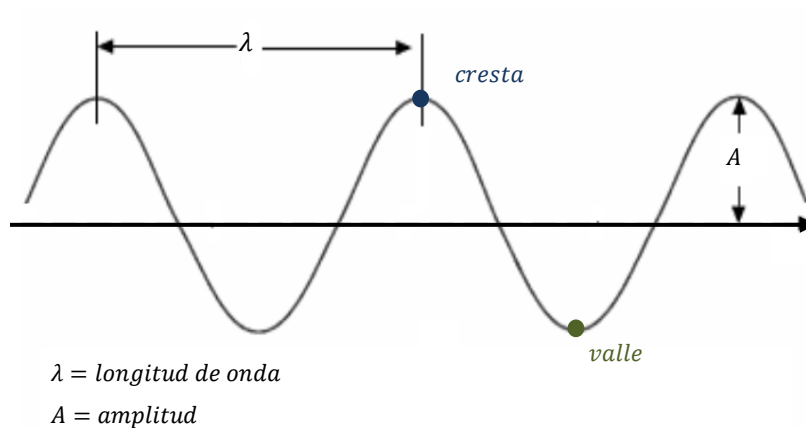


Figura 2. Características de una onda representada en el espacio. Adaptado de "Automatización de un tubo de Kundt para la enseñanza en el bachillerato", por Rodríguez E., 2009 (<http://132.248.52.100:8080/xmlui/handle/132.248.52.100/616>).

1.4.2 Conceptos básicos de la iluminación

Mucho antes de interesarse en la naturaleza de la luz, a nuestros antepasados les preocupó aprender a producir luz, por razones que no es difícil comprender. En la Tierra, hace cuatro mil millones de años, sólo brillaban el Sol, la Luna y las estrellas. Desde entonces y hasta ahora el Sol es la fuente más importante de energía en nuestro planeta. Toda forma de vida en la Tierra depende de su presencia, directa o indirectamente. (De la Peña, 2018, p.2,3)

Históricamente, las fuentes de luz creadas para replicar la luz natural se adaptaron a las necesidades y al conocimiento del momento, desde las más primitivas lámparas hace apenas 13000 años hasta la lampara eléctrica incandescente en 1879. Estas fuentes se han dividido en dos tipos: incandescentes y luminiscentes, como se muestra en la Tabla 1. Pero el principio de la emisión de luz es la misma: las transiciones electrónicas de estados de mayor a menor energía. Sin embargo, el modo de excitación de los electrones y la distribución espectral resultante de la radiación son diferentes (De la Peña, L., 2018) (IESNA, 2000).

Tabla 1. Tipos de fuentes de luz. Adaptado de “The IESNA Lighting Handbook: Reference & application”, por IESNA, 2000.

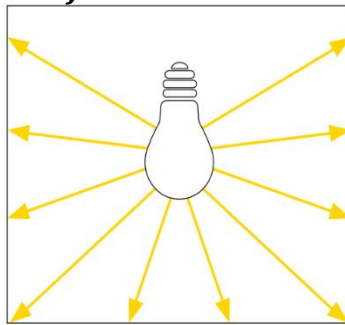
Fenómeno Natural	Fuentes Fabricadas		
Luz solar	Incandescencia	Lámparas de filamento	
		Piroluminiscencia	
		Cándoluminiscencia	
Luz del cielo		Radiación de arco de carbono	
Luz de la luna	Luminiscencia	Fotoluminiscencia	Descargas gaseosas
			Fluorescencia
			Fosforescencia
			Láseres
		Electroluminiscencia	Lámparas electroluminiscentes

			(capacitivas de corriente alterna)
Relámpago			Diodos emisores de luz
			Catodoluminiscencia (excitación por electrones)
Aurora Boreal (Luces del Norte) y Aurora Austral (Luces del Sur)		Fenómenos de luminiscencia diversa	Galvanoluminiscencia (química)
			Cristaloluminiscencia (cristalización)
			Quimioluminiscencia (oxidación)
Bioluminiscencia			Termoluminiscencia (calor)
			Triboluminiscencia (fricción o fractura)
			Sonoluminiscencia (ultrasonidos)
			Radioluminiscencia (rayos α, β, γ y rayos X)

a) Flujo luminoso y el lumen (ϕ)

Es la cantidad total de luz emitida por una fuente luminosa. El lumen es la unidad para la medida del flujo luminoso. También puede estar referido a la salida del luminario, en cuyo caso es menor debido a que el luminario absorbe una porción de luz producida por las lámparas (Zumtobel, 2013).

Flujo luminoso



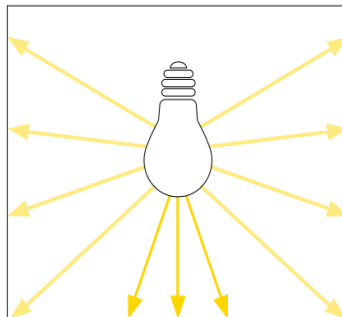
Lumen (lm)

Figura 3. Esquema del flujo luminoso. Adaptado de "The lighting handbook", por Zumtobel., 2013 (<https://www.hiteco-team.sk/uploads/files/Lichthandbuch.pdf>).

b) Intensidad luminosa (I)

La intensidad luminosa es la cantidad de luz que es irradiada en una dirección determinada. Su unidad de medida es la Candela y establece la relación entre el flujo luminoso y la fuente que abandona al propagarse (Zumtobel, 2013).

Intensidad luminosa I



Candela (lm/src) = (cd)

Figura 4. Esquema de la intensidad luminosa. Adaptado de "The lighting handbook", por Zumtobel., 2013 (<https://www.hiteco-team.sk/uploads/files/Lichthandbuch.pdf>).

c) Iluminancia (E)

La iluminancia o nivel de iluminación (E) describe la cantidad de luz que llega al plano de trabajo. Está dada en luxes y se define como la relación entre el flujo luminoso que llega a una superficie y su área: $E = lm/m^2$ (lx) (Zumtobel, 2013).

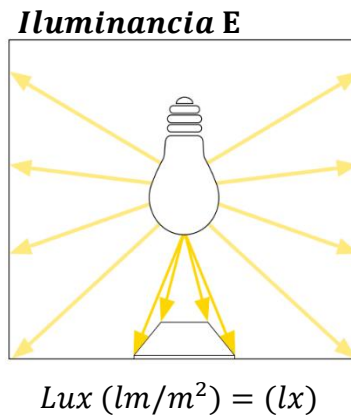


Figura 5. Esquema de la iluminancia. Adaptado de “The lighting handbook”, por Zumtobel., 2013 (<https://www.hiteco-team.sk/uploads/files/Lichthandbuch.pdf>).

d) Luminancia (L)

Se trata de la intensidad luminosa reflejada por una superficie, percibida por el ojo humano. Su valor se obtiene de la relación entre la intensidad luminosa y la superficie vista por el ojo en una dirección determinada, la cual tiene por unidad $candelas/m^2$ (Zumtobel, 2013).

Luminancia L

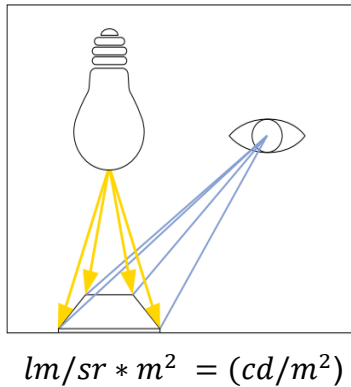


Figura 6. Esquema de la luminancia. Adaptado de “The lighting handbook”, por Zumtobel., 2013 (<https://www.hiteco-team.sk/uploads/files/Lichthandbuch.pdf>).

e) Eficacia Luminosa

Es el cociente de la cantidad total de luz emitida por una fuente luminosa y la potencia total consumida (lm/W) (Secretaría de Energía, 2017).

f) Lámpara

Fuente fabricada capaz de producir luz visible (Secretaría de Energía, 2017).

g) Luminaria

Conjunto de elementos que permiten controlar, distribuir y filtrar la luz emitida por una o más lámparas, el cual consta de todos los accesorios necesarios para su instalación y conexión al sistema eléctrico (Secretaría de Energía, 2014).

h) Índice de rendimiento de color (CRI)

La NOM-028-ENER-2017 lo define como el valor usado para medir la capacidad de la fuente luminosa para reproducir fielmente los colores de diversos objetos comparándolo con una fuente de luz ideal (Secretaría de Energía, 2017).

i) Temperatura de color correlacionada Iluminancia (*CCT*)

La temperatura de color establece la apariencia del color de la fuente de luz, es decir, qué tan cálida o fría es la luz emitida de una lámpara. Se mide en grados kelvin (*K*) y su clasificación establecida en la tabla 3.2.1.6.a, tomada de la NTC 6519-1, se muestra en la Tabla 2 (Ministerio de Minas y Energía, 2024).

Tabla 2. Clasificación de la temperatura de color correlacionada. Adaptada de “Instalaciones de sistemas de iluminación”, por Ministerio de Minas y Energía, 2024
(https://www.minenergia.gov.co/documents/11687/03_Libro_3_RETILAP_2024_Rev_Final_WEB.pdf).

Apariencia de color	La temperatura de color correlacionada
Cálida	< 4000 <i>K</i>
Neutra	4000 <i>K</i> a 5000 <i>K</i>
Fría	> 5000 <i>K</i>

j) Vida útil (*hrs*)

Es el tiempo durante el cual una lámpara está en condiciones de operación normalizada, sin disminuir el flujo luminoso por debajo de un valor establecido, o hasta el momento de la rotura de su filamento (ANCE, 2011).

k) Índice unificado de deslumbramiento (*UGR*)

Con el índice unificado de deslumbramiento se establece la importancia de limitar el deslumbramiento para prever errores, fatiga y accidentes. Las peores condiciones de

deslumbramiento molesto, en cada uno de los espacios objeto de diseño, se evalúan (RETILAP, 2024).

l) Densidad de potencia eléctrica de alumbrado (*DPEA*)

Es el máximo rendimiento de la energía consumida que se busca sin comprometer ni afectar el confort visual y psicofisiológico de los usuarios. Esta dada a partir de la relación de la carga total conectada y el área total a iluminar (W/m^2). (Secretaría de Energía, 2014)

m) Coeficiente de uniformidad (*CU*)

Se establece que el coeficiente o relación de uniformidad es la distribución de los niveles de iluminación sobre el plano de trabajo, y se define a partir de la relación del nivel mínimo y el promedio del área que se evalúa (Secretaría de Energía, 2013).

n) Luxómetro

Instrumento de medición que calcula los valores de iluminación o iluminancia en luxes (Secretaría de Trabajo y Previsión Social [STPS], 2008).

o) Analizador de potencia

Analizador de calidad de potencia trifásica, que mide y realiza trabajo de diagnóstico y calidad de potencia en redes de bajo voltaje monofásicas, bifásicas y trifásicas (AEMC Instruments, 2025).

1.4.3 Tecnologías

Durante el siglo XX existió un incremento en el número de fuentes fabricadas para la emisión de luz, comenzando con mejoras en la lámpara de Edison a principios de siglo, hasta llegar a 1990 con la introducción de lámparas sin electrodos. En los años 60's las lámparas de haluro metálico y de sodio a alta presión (HPS) llegaron para superar y dejar atrás a las tecnologías predecesoras en términos de desempeño, pero la historia se repitió y rápidamente fueron superadas por lámparas venideras más sofisticadas y con niveles de calidad y eficiencia más altos (IESNA, 2000).

Todas las lámparas de descarga a alta presión, que se ilustran en la Tabla 3, producen luz mediante una descarga de arco eléctrico contenida en un tubo de arco dentro del bulbo.

Tabla 3. Grupos de lámparas de descarga. Adaptado de "The IESNA Lighting Handbook: Reference & application", por IESNA, 2000.

Lámparas de descarga	
Lámparas de descarga a baja presión	Lámparas de descarga a alta presión
Lámparas fluorescentes	Lámparas de vapor de mercurio
Lámparas fluorescentes compactas	Lámparas de sodio a alta presión
	Lámparas de haluro metálico

Cada tipo de lámpara de descarga a alta presión (HID, por sus siglas en inglés) produce luz con base en el tipo de metal contenido en el arco. Las lámparas de vapor de mercurio producen luz excitando átomos de mercurio; las lámparas de sodio a alta presión producen luz excitando átomos de sodio; y las lámparas de haluro metálico producen luz excitando varios átomos y moléculas diferentes, principalmente sodio, escandio, tulio, holmio y disprosio (IESNA, 2000).

a) Lámparas de haluro metálico

En un tubo de arco, la descarga de gas funciona mediante la excitación de los aditivos luminosos (sales de haluro metálico), y el mercurio es excitado por el flujo de corriente. Se emite radiación visible característica de los elementos respectivos. A medida que los átomos de halógeno y los metales se desplazan hacia la pared más fría del tubo de arco por difusión y convección, se recombinan, y el ciclo comienza de nuevo (IESNA, 2000).

En el estado de funcionamiento, el mercurio se evapora completamente. Los otros elementos involucrados están presentes en forma saturada a las temperaturas dadas, es decir, solo se evaporan parcialmente; el resto se encuentra en forma líquida en el punto más frío del tubo de arco. La fracción del relleno que se ha evaporado depende de la temperatura del punto más frío de la pared del tubo de arco y también varía según los diferentes componentes del relleno. Los cambios en la temperatura de la pared del tubo de arco pueden alterar la composición de los haluros metálicos en la descarga, lo que a su vez cambia las propiedades de color de la lámpara (IESNA, 2000) (OSRAM, s.f.).

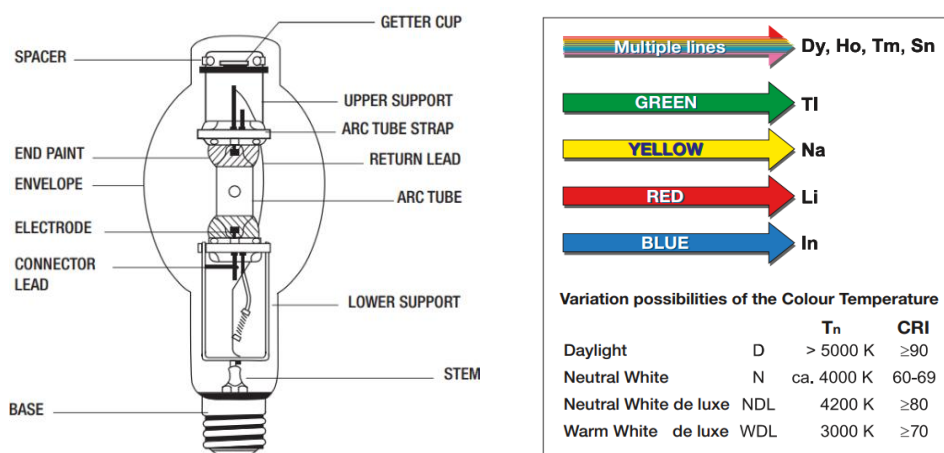


Figura 7. Izquierda: Estructura de una lámpara de haluro metálico. De "Guide to metal halide lamps", por OSRAM, s.f. (https://cdn.isicloud.net/warshauers/Resources/Ledvance-OsramSylvania_00001_108_114_128_CAT.pdf). Derecha: Generación de la distribución espectral deseada. De "Metal halide lamps. Instructions for the use and application", por OSRAM, s.f. (https://www.ledvance.com/00_Free_To_Use/asset-300284_Metal_halide_lamps_Application_guide_V1.pdf).

Ya que la descarga reacciona al aumento de la corriente de la lámpara con una caída de voltaje (lo que causaría un aumento indefinido de la corriente hasta que el fusible se queme

o falle otra parte del circuito), la corriente de la lámpara debe ser limitada por un balasto durante la operación. Generalmente se trata de un circuito inductivo (reactor) pero también hay casos raros en los que se utilizan circuitos capacitivos de 400 W , que resulta en una vida útil más corta (IESNA, 2000) (OSRAM, s.f.).

En luminarias actuales, el balasto electrónico se encarga de operar el encendido, la corriente y la potencia de la lámpara (OSRAM, s.f.).

El rango de eficacia de las lámparas de haluro metálico comerciales va de entre 75 y 125 lm/W , excluyendo las pérdidas del balastro (IESNA, 2000) (OSRAM, s.f.).

En este tipo de lámparas, el o los metales utilizados en el arco (sodio, escandio, tulio, holmio o disprosio) mejoran o mantienen las características de la lámpara, por ejemplo, la eficacia luminosa y la vida útil de la lámpara tienden a ser mayores para las lámparas de escandio-sodio (IESNA, 2000) (OSRAM, s.f.).

La mayoría de las lámparas de haluro metálico de más de 150 W requieren un voltaje en circuito abierto más alto para encenderse en comparación con las lámparas de mercurio de igual potencia, ocasionando que requieran balastos específicos. Aunque algunos diseños de lámparas de haluro metálico pueden operar con balastos de mercurio en situaciones de renovación, que dependerá de cada caso. (IESNA, 2000)

De igual forma, en su mayoría, utilizan *getters* para superar las impurezas presentes en la envoltura externa de la lámpara que, debido a su concentración, comprometen el rendimiento. Los problemas predominantes surgen de la contaminación por hidrógeno y carbono (IESNA, 2000).

Con base en datos proporcionados por la marca OSRAM, la vida útil *hrs* de estas lámparas va de las 10000 a 20000 *hrs*, y su eficacia máxima registrada es de 102 lm/W para las lámparas METALARC PRO-TECH Lamps (OSRAM, s.f.).

b) Luminarias PLEP

Tecnología LED

Un LED (Light Emitting Diode, por sus siglas en inglés) es un diodo semiconductor que emite luz cuando se polariza de forma directa y una corriente eléctrica pasa a través de él. (Fundación de la Energía de la Comunidad de Madrid, 2015)

Es básicamente un semiconductor unido a dos terminales (ánodo y cátodo) que cuando circula corriente eléctrica produce un efecto llamado electroluminiscencia, fenómeno que transforma la energía eléctrica en radiación visible. Por tanto son fuentes de luz en estado sólido, es decir, sin filamento o gas inerte que lo rodee, ni capsula de vidrio que lo recubra como las tecnologías tradicionales. (Fundación de la Energía de la Comunidad de Madrid, 2015)

Tecnología OLED

La tecnología OLED (Organic Light Emitting Diode, por sus siglas en inglés) tiene su principio en la electroluminiscencia, ya que el diodo que consta de una capa conformada por una película de componentes orgánicos, al recibir estimulación eléctrica, estos reaccionan y emiten luz. Un OLED está compuesto por capas fabricadas con polímeros semiconductores como se observa en la Figura 8. Las capas orgánicas finas de emisión de luz y de conducción se encuentran entre dos capas que funcionan como cátodo y ánodo. (Fundación de la Energía de la Comunidad de Madrid, 2015)

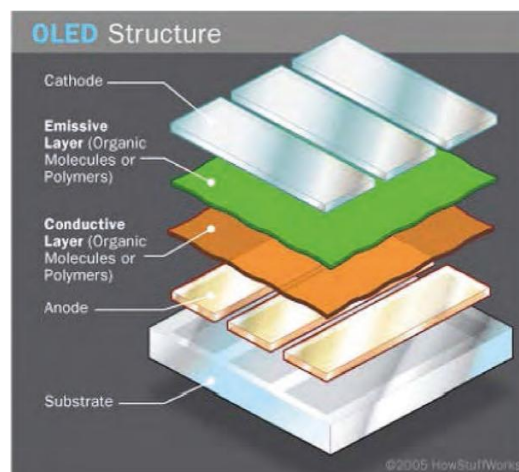


Figura 8. Tecnología del OLED. De “Guía sobre tecnología. LED en el alumbrado”, por Fundación de la Energía de la Comunidad de Madrid, 2015 (<https://iluminet.com/newpress/wp-content/uploads/2018/07/Guia-sobre-Tecnologia-LED-en-el-Alumbrado-fenercom-2015.pdf>).

“Se consideran dos tipos de tecnologías principales en la generación de luz con OLED: generación mediante moléculas (SM-OLED) y generación mediante polímeros (PLED).” (Fundación de la Energía de la Comunidad de Madrid, 2015, p.77)

Tecnología PLED

En 1990, los diodos emisores de luz a base de polímeros (PLED's) se volvieron una opción de amplio uso debido a su flexibilidad mecánica. Típicamente, consisten en una capa delgada de polímero conjugado no dopado, situada entre dos electrodos sobre un sustrato de vidrio. Experimentalmente, la atención se ha centrado especialmente en los PLED que contienen el polímero conjugado polifenileno vinileno (PPV) o sus derivados, los cuales pueden tener una eficiencia de conversión externa superior al 1% fotones/portador de carga. (Blom, P.W.M., & De Jong, M.J.M., 1998)

La película de sustrato utilizada es muy delgada, permitiendo obtener una pantalla de gran intensidad de color, para la que se necesita muy poca energía en comparación con la luz emitida. En esta tecnología no es necesario el vacío y los polímeros pueden aplicarse sobre el sustrato, que puede ser flexible como el PET, mediante una técnica derivada de la “impresión de chorro de tinta”. Esta tecnología permite una reducción importante de costos. (Fundación de la Energía de la Comunidad de Madrid, 2015)

Lámpara de plasma

“El principio de funcionamiento de lámpara de plasma combina la técnica de microondas y la técnica de iluminación electrónica”. (Iluminet, 2014, p)

Su diseño consta de dos partes importantes: un emisor (lámpara) y un conductor (señal de radio frecuencia). Con la generación de una señal de radio-frecuencia previamente amplificada, la energía llega hasta la lámpara gracias a la señal que viaja dentro de un resonador de cerámica llamado “puck”. La señal es guiada hasta un campo eléctrico que

rodea a la lámpara de cuarzo, la cual ésta totalmente sellada sin electrodos o filamentos, y se introduce en él. (Basanta, J., Suárez, J. & Vila, L., 2014) (Iluminet, 2014)

La bombilla de cuarzo tiene en su interior la mezcla de un gas noble y algún haluro metálico que, al ionizarse debido a la alta concentración de energía en campo eléctrico, se vaporizan y alcanzan el estado de plasma, generando una intensa fuente de luz blanca p de color, dependiendo de los elementos que se encuentren dentro de la lámpara o bombilla como se ve en la Figura 9. (Basanta, J., Suárez, J. & Vila, L., 2014) (Iluminet, 2014)



Figura 9. Principio de funcionamiento de la lámpara de plasma. De “¿Qué son y cómo funcionan las lámparas de plasma?”, por Iluminet, 2014 (<https://iluminet.com/iluminacion-plasma/>).

Tecnología PLEP

PLEP (Plasma Light Emitting Polymer), es un emisor de luz de vanguardia, según explica el fabricante PLEP del Grupo IEBSA, ya que está fabricado con materiales electroluminiscentes naturales. Esta tecnología brinda un brillo excepcional con un consumo mínimo de energía, su eficacia de hasta 220 lm/W y su vida útil de 100000 hrs de uso continuo la posicionan como una de las mejores opciones (PLEP, 2025).

Su emisión de CO^2 es muy baja y produce una mínima cantidad de luz azul, evitando la contaminación lumínica. Como está hecho de materiales biodegradables, es reciclable y responsable con el medio ambiente (PLEP, 2025).

Capítulo 2. Normatividad

Debido a los objetivos establecidos al inicio de este trabajo, es importante conocer las normas que rigen en materia de iluminación para garantizar un mejor desempeño de los equipos y del sistema de iluminación, además de ser obligatorias.

Con el fin de asegurar que el laboratorio de Máquinas eléctricas se encontrará por encima de los límites permisibles en cuanto al nivel de iluminación y eficiencia energética, hemos de familiarizarnos con las normas oficiales mexicanas.

De igual forma, y por efecto de utilizar el software DIALux Evo, se retoma la norma europea con la que trabaja el programa.

2.1 Norma mexicana

2.1.1 NOM-025-STPS-2008

La NORMA Oficial Mexicana NOM-025-STPS-2008: Condiciones de iluminación en los centros de trabajo, es un referente para la realización de proyectos de iluminación en México. Regula y establece los niveles de iluminación adecuados para los diversos centros de trabajo, con el objetivo de asegurar que todos los parámetros del sistema de iluminación contribuyan a mejorar la productividad y a evitar accidentes dentro de ellos (Secretaría de Trabajo y Previsión Social).

La Tabla 1 de la Figura 10 fue un referente para saber si luminarias instaladas en el laboratorio de Máquinas Eléctricas cumplían, o no, con los niveles adecuados de iluminación.

Tabla 1
Niveles de Iluminación

Tarea Visual del Puesto de Trabajo	Area de Trabajo	Niveles Mínimos de Iluminación (luxes)
En exteriores: distinguir el área de tránsito, desplazarse caminando, vigilancia, movimiento de vehículos.	Exteriores generales: patios y estacionamientos.	20
En interiores: distinguir el área de tránsito, desplazarse caminando, vigilancia, movimiento de vehículos.	Interiores generales: almacenes de poco movimiento, pasillos, escaleras, estacionamientos cubiertos, labores en minas subterráneas, iluminación de emergencia.	50
En interiores.	Áreas de circulación y pasillos; salas de espera; salas de descanso; cuartos de almacén; plataformas; cuartos de calderas.	100
Requerimiento visual simple: inspección visual, recuento de piezas, trabajo en banco y máquina.	Servicios al personal: almacenaje rudo, recepción y despacho, casetas de vigilancia, cuartos de compresores y pailería.	200
Distinción moderada de detalles: ensamble simple, trabajo medio en banco y máquina, inspección simple, empaque y trabajos de oficina.	Talleres: áreas de empaque y ensamble, aulas y oficinas.	300
Distinción clara de detalles: maquinado y acabados delicados, ensamble de inspección moderadamente difícil, captura y procesamiento de información, manejo de instrumentos y equipo de laboratorio.	Talleres de precisión: salas de cómputo, áreas de dibujo, laboratorios.	500
Distinción fina de detalles: maquinado de precisión, ensamble e inspección de trabajos delicados, manejo de instrumentos y equipo de precisión, manejo de piezas pequeñas.	Talleres de alta precisión: de pintura y acabado de superficies y laboratorios de control de calidad.	750
Alta exactitud en la distinción de detalles: ensamble, proceso e inspección de piezas pequeñas y complejas, acabado con pulidos finos.	Proceso: ensamble e inspección de piezas complejas y acabados con pulidos finos.	1,000
Alto grado de especialización en la distinción de detalles.	Proceso de gran exactitud. Ejecución de tareas visuales: • de bajo contraste y tamaño muy pequeño por periodos prolongados; • exactas y muy prolongadas, y • muy especiales de extremadamente bajo contraste y pequeño tamaño.	2,000

Figura 10. Tabla 1 - Niveles de iluminación. De "NOM-025-STPS-2008: Condiciones de iluminación en los centros de trabajo", por la Secretaría del Trabajo y Previsión Social (STPS), 2008 (<https://asinom.stps.gob.mx/upload/noms/Nom-025.pdf>).

2.1.2 NOM-007-ENER-2014

Esta NORMA Oficial Mexicana de nombre Eficiencia energética para sistemas de alumbrado en edificios no residenciales, es de mucha importancia para fines de este trabajo ya que en ella se establecen los niveles de eficiencia energética en términos de Densidad de Potencia Eléctrica para Alumbrado, con el objetivo de disminuir el consumo de energía de los sistemas instalados y promover el uso eficiente de la energía (Secretaría de Energía, 2014).

De acuerdo con el campo de aplicación para actualizaciones o modificaciones de los sistemas de alumbrado interior y exterior con carga total conectada mayor o igual a 3kW, se desglosan los niveles de DPEA en la Tabla 1 de la Figura 11, los cuales, no se deben de exceder pues están asignados en función del área de trabajo y actividades específicas que en ellos se desarrollen (Secretaría de Energía, 2014).

Tabla 1. Densidades de Potencia Eléctrica para Alumbrado (DPEA)

Tipo de edificio	DPEA (W/m²)
Oficinas	
Oficinas	12
Escuelas y demás centros docentes	
Escuelas o instituciones educativas	14
Bibliotecas	15
Establecimientos comerciales	
Tiendas de autoservicio, departamentales y de especialidades	15
Hospitales	
Hospitales, sanatorios y clínicas	14
Hoteles	
Hoteles	12
Moteles	14
Restaurantes	
Bares	14
Cafeterías y venta de comida rápida	15

Restaurantes	14
Bodegas	
Bodegas o áreas de almacenamiento	10
Recreación y Cultura	
Salas de cine	12
Teatros	15
Centros de convenciones	15
Gimnasios y centros deportivos	14
Museos	14
Templos	14
Talleres de servicios	
Talleres de servicio para automóviles	11
Talleres	15
Carga y pasaje	
Centrales y terminales de transporte de carga	10
Centrales y terminales de transporte de pasajeros, aéreas y terrestres	13

Figura 11. Tabla 1 - Densidades de Potencia Eléctrica para Alumbrado (DEPEA). De “NOM-007-ENER-2017: Eficiencia energética para sistemas de alumbrado en edificios no residenciales”, por la Secretaría de Energía, 2008 (https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/181647/NOM_007_ENER_2014.pdf).

2.1.3 Normas de apoyo

NOM-028-ENER-2017

En la NORMA Oficial Mexicana, de nombre Eficiencia energética de lámparas para uso general. Límites y métodos de prueba, se discute la importancia de promover la eficiencia energética a partir de comparar las características fotométricas de distintas tecnologías de lámparas, estableciendo los valores mínimos de eficacia con el objetivo (Secretaría de Energía, 2017).

NOM-013-ENER-2013

La NORMA Oficial Mexicana llamada Eficiencia energética para sistemas de alumbrado en vialidades, tiene como objetivo regular el consumo de energía de las luminarias públicas, buscando optimizar el uso de la energía eléctrica, reducir costos y minimizar el

impacto ambiental. Esta norma fue consultada para las definiciones retomadas en el capítulo uno de este trabajo (Secretaría de Energía, 2013).

NMX-J-019-ANCE-2011

La Norma Mexicana ANCE llamada Iluminación- Lámparas incandescentes de filamento metálico para alumbrado general- Especificaciones y métodos de prueba, indica los estándares de calidad, eficiencia y calidad con los que deben de cumplir los productos para la protección del consumidor. Esta norma fue consultada para las definiciones retomadas en el capítulo uno de este trabajo (ANCE, 2011).

2.2 Norma europea

2.2.1 EN 12464-1:2021

Emitida en 2021, esta norma europea especifica los requisitos de iluminación para personas en lugares de trabajo interiores, que satisfacen las necesidades de confort visual y rendimiento de las personas con capacidad visual normal, o corregida a normal. En este escrito se consideran todas las tareas visuales comunes y se incluye el uso de equipos de pantalla (EN 12464-1:2021, 2021).

Capítulo 3. Características físicas del sitio del proyecto y sistema de iluminación anterior

En este capítulo se establecen las características más importantes del laboratorio, tales como sus dimensiones, las alturas de trabajo consideradas y la disposición de las luminarias.

De igual forma, se desglosan las mediciones de iluminancia tomadas con las luminarias de haluro metálico desde distintos puntos dentro del laboratorio, especificando si se contaba, o no, con luz solar. Se obtuvieron los promedios de iluminancia para cada caso y se compararon con lo establecido en la norma.

Finalmente, se muestran los valores medidos y las formas de onda de las principales características de la red eléctrica a la que se conectan las luminarias de haluro metálico, para ello se realizaron conexiones en los interruptores termomagnéticos y barras.

3.1 Descripción del Laboratorio de Máquinas Eléctricas

El Departamento de Mantenimiento de la Coordinación de Servicios Generales de la Facultad de Ingeniería (UNAM) proporcionó el plano de la planta baja del Edificio D de la Figura 12 (a), en el que se visualiza el laboratorio de Máquinas Eléctricas.

En la Figura 12 (b) se muestran los cuadrantes en los que se dividió el laboratorio para poder facilitar la ubicación de las luminarias y las mediciones tomadas, puesto que en cada cuadrante se ubica una cúpula con cuatro luminarias.

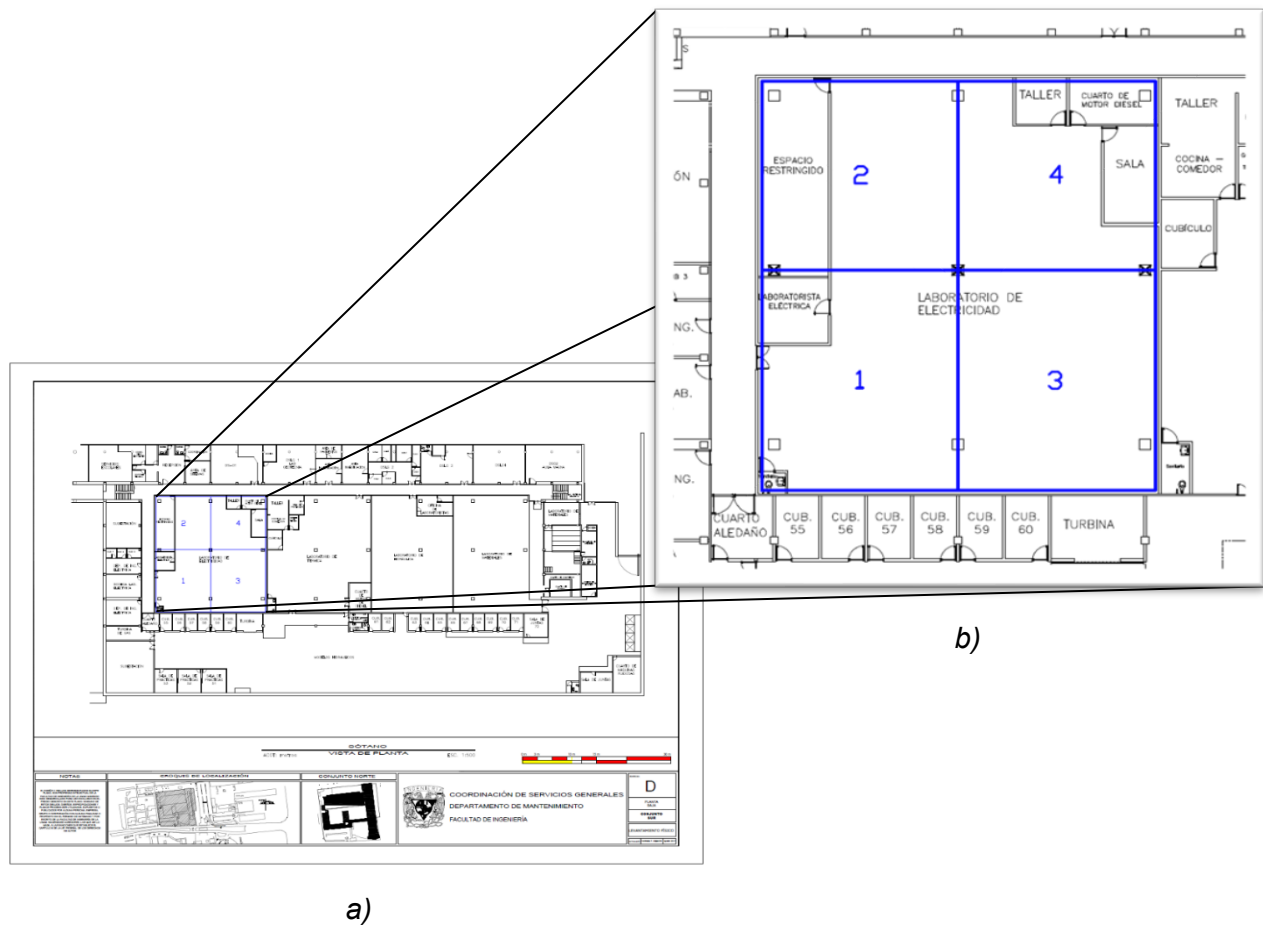


Figura 12. Plano del sótano del Edificio D.

Gracias al plano, se obtuvieron los valores aproximados en metros del laboratorio de Máquinas Eléctricas.

Las mediciones de altura de barda, de oficinas, de altura de trabajo y de mobiliario, requirieron de un metro, ya que su altura no compromete la seguridad.

Para la altura aproximada del laboratorio, de las columnas y las luminarias, se utilizó un láser.

En la Tabla 4 se desglosan las mediciones anteriormente mencionadas, las cuales fueron de gran importancia en el desarrollo del proyecto.

Tabla 4. Parámetros del laboratorio

Laboratorio				
Altura (m)	Largo (m)	Ancho (m)	Altura de trabajo mínima (m)	Altura de trabajo máxima(m)
8.7	24.510	21.957	0.70	1.02
Laboratorio				
Altura de la barda (m)	Altura de oficina (m)	Altura de columna (m)	Altura de las luminarias MH (m)	Altura de las luminarias PLEP (m)
2.3	2.3	6.891	8.50	7.679

3.2Luminarias del laboratorio

El laboratorio de Máquinas Eléctricas cuenta con 16 luminarias instaladas, como se observa en la Figura 13, dichas luminarias están al pie de las cúpulas del techo y a su vez, se encuentran agrupadas en 4 luminarias por cúpula. Todas son del tipo haluro metálico.

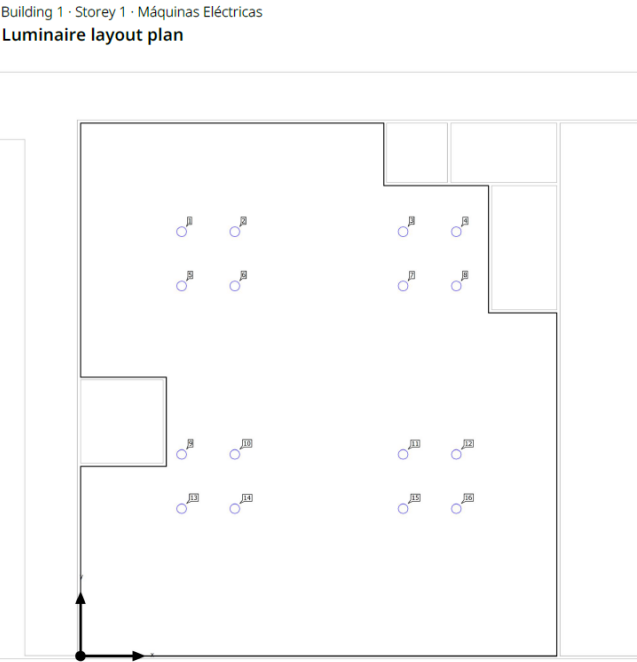


Figura 13. Disposición de las luminarias en el laboratorio de Máquinas Eléctricas.

En Tabla 5 se enlistan las principales características técnicas proporcionadas por el fabricante de las lámparas de haluro metálico, que se encuentran instaladas en el laboratorio. Estos datos permiten documentar las condiciones de iluminación existentes, incluyendo aspectos como potencia, flujo luminoso, temperatura de color y vida útil, lo cual resulta fundamental para comprender el desempeño del sistema de iluminación previo y contextualizar las mediciones de iluminancia realizadas en este capítulo.

Tabla 5. Características de las lámparas de haluro metálico.

	Haluro metálico		
	Lámpara OSRAM POWERARC MI 400W/U CLEAR ED37	Lámpara OSRAM 400W E40 Recubierto	Lámpara Philips 400W H33GL-400/DX
Potencia eléctrica (W)	400	400	400
Tensión eléctrica nominal (V_{AC})	*	135	140
Corriente eléctrica nominal (A)	3.3	3.25	3.25
Flujo luminoso (lm)	32000	24000	22000
Eficacia lumínica (lm/W)	80	60	53
CCT (K)	4000	3800	4200
CRI	65	39	39
Vida útil (h)	15000	24000	15000

3.3 Mediciones de iluminación

Para la medición de los niveles de iluminancia en el laboratorio de Máquinas Eléctricas se empleó el luxómetro digital Kyoritsu modelo 5202 de la Figura 14, el cual cuenta con un

sensor de luz separado de la unidad del display, permitiendo colocar el sensor exactamente en el punto de medición sin que la presencia del operador genere sombras o reflejos que alteren el resultado. Además, facilita la lectura a distancia y brinda mayor comodidad y precisión durante las tomas de medición (Kyoritsu electrical instrument works, 2024).

Este equipo dispone de tres rangos de medición (200, 2000 y 20000 lux), función de retención de datos con el botón *hold* y ajuste a cero para poder tomar lecturas estables y exactas. Su precisión es del $\pm 4\%$ y presenta tiempos de respuesta rápidos, lo que lo hace adecuado para evaluaciones de iluminación en interiores y exteriores (Kyoritsu electrical instrument works, 2024).



Figura 14. Luxómetro digital Kyoritsu modelo 5202.

Para facilitar la toma de mediciones, se definieron nomenclaturas para cada área medida, como se observa en la Figura 15, lo que permitió un registro más ordenado de los resultados. Dichas nomenclaturas específicas sirvieron de apoyo visual para que todas las mediciones fueran tomadas en el mismo lugar, permitiendo identificar de forma clara y

ordenada cada una de las mediciones, entonces, se registrarán en tablas de medición de iluminancia para garantizar coherencia y una lectura más sencilla de los resultados obtenidos.

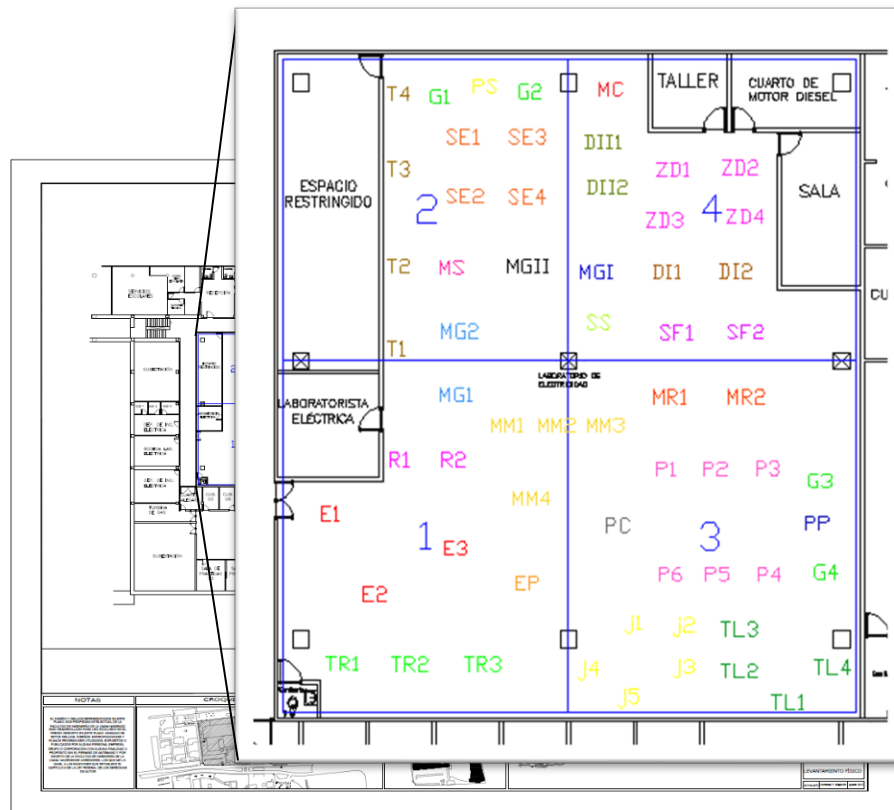


Figura 15. Plano del laboratorio de Máquinas Eléctricas con nomenclatura.

Como el laboratorio se dividió en cuatro cuadrantes, en ellos se ubicaron las áreas de mayor interacción y por cada área se tomaron una o más mediciones, dependiendo del tamaño y accesibilidad de la superficie.

La altura de trabajo indicada en las tablas corresponde al nivel establecido según el área donde se realizó la medición. Esta altura se mantuvo constante en todas las mediciones, ya que se trabajó en las mismas áreas o superficies durante el proyecto.

Con base en lo anterior, se observa que en la Tabla 6 se desglosan todas las mediciones tomadas durante el día, las cuales, se realizaron el 28 de febrero de 2025 en un horario comprendido entre las 07:30 y las 10:00 horas.

Tabla 6. Medición de iluminancia (lx) con luz de día y luminarias de haluro metálico.

Cuadrante	Área	Nomenclatura	Luxes(Lx)	Altura (cm)
1	Entrada	E1	214	70
		E2	308	70
		E3	225	70
	Transformadores	T1	286	70
		T2	270	70
		T3	255	70
	Registro	R1	313	96
		R2	328	70
	Equipo de Pruebas	EP	299	100
	Mesa máquinas I	MM1	466	96
		MM2	523	96
		MM4	604	70
	MG	MG1	412	70
2	Tablero	T1	428	70
		T2	366	70
		T3	218	70
		T4	154	70

3	Pizarrón SEP 1	PS	273	91
	Gabinetes SEP 1	G1	117	91
		G2	112	91
	Mesas SEP I	SE1	226	102
		SE2	326	102
		SE3	266	102
		SE4	378	102
	MG	MG2	333	70
	MGII	MGII	497	70
	Motor serie	MS	452	70
	Protecciones (Computadoras)	P1	430	90
		P2	367	90
		P3	339	90
		P4	325	90
		P5	384	90
		P6	404	90
	Protecciones centro	PC	479	70
	Pizarrón Protecciones	PS	401	96
	Protecciones (Gabinete Azul)	G3	487	88
	Protecciones (Gabinete Café)	G4	502	88

4	Mesa Máquinas I	MM3	455	96
	Máquina marina	MR1	468	85
		MR2	473	85
	Jaula	J1	217	80
		J2	299	80
		J3	245	80
		J4	181	75
		J5	102	78
	Taller	TL1	120	90
		TL2	133	92
		TL3	238	92
		TL4	155	100
	Mesa de control	MC	134	95
	Dinamómetro I	DI1	498	70
		DI2	415	70
	Dinamómetro II	DII1	292	70
		DII2	435	70
	Zona dinamómetro	ZD1	363	70
		ZD2	260	70
		ZD3	439	70
		ZD4	321	70

	Sistemas fotovoltaicos	SF1	574	84
		SF2	390	84
	Sistema solar	SS	399	84
	MGI	MGI	445	70

El valor promedio de iluminancia obtenido a partir de todas las mediciones registradas en la Tabla 6 fue de 335.77lx, representando el nivel medio de iluminación en el laboratorio de Máquinas eléctricas cuando únicamente permanecen encendidas ocho de las dieciséis luminarias instaladas.

Las tablas de medición de iluminancia tienen como finalidad mostrar los niveles de iluminación presentes en el laboratorio bajo las diferentes condiciones de prueba. Para observar el comportamiento de la iluminación sin la influencia de la luz natural, las mediciones de la Tabla 7, se efectuaron el 10 de febrero de 2025 entre las 20:00 y las 22:00 horas.

Tabla 7. Medición de iluminancia (lx) sin luz de día y luminarias de haluro metálico.

Cuadrante	Área	Nomenclatura	Luxes(Lx)	Altura (cm)
1	Entrada	E1	90	70
		E2	130	70
		E3	136	70
	Transformadores	T1	189	70
		T2	177	70
		T3	161	70
	Registro	R1	236	96
		R2	304	70

	Equipo de Pruebas	EP	201	100
	Mesa máquinas I	MM1	357	96
		MM2	401	96
		MM4	492	70
	MG	MG1	355	70
2	Tablero	T1	378	70
		T2	371	70
		T3	271	70
		T4	178	70
	Pizarrón SEP 1	PS	188	91
	Gabinetes SEP 1	G1	120	91
		G2	95	91
	Mesas SEP I	SE1	326	102
		SE2	405	102
		SE3	260	102
		SE4	355	102
	MG	MG2	320	70
	MGII	MGII	525	70
	Motor serie	MS	435	70
3	Protecciones (Computadoras)	P1	424	90
		P2	412	90

		P3	358	90
		P4	393	90
		P5	486	90
		P6	534	90
	Protecciones centro	PC	458	70
	Pizarrón Protecciones	PS	242	96
	Protecciones (Gabinete Azul)	G3	174	88
	Protecciones (Gabinete Café)	G4	254	88
	Mesa Máquinas I	MM3	357	96
	Máquina marina	MR1	337	85
		MR2	3588	85
	Jaula	J1	376	80
		J2	310	80
		J3	214	80
		J4	149	75
		J5	140	78
	Taller	TL1	88	90
		TL2	195	92
		TL3	261	92

		TL4	39	100
4	Mesa de control	MC	121	95
	Dinamómetro I	DI1	384	70
		DI2	351	70
	Dinamómetro II	DII1	326	70
		DII2	449	70
	Zona dinamómetro	ZD1	344	70
		ZD2	243	70
		ZD3	428	70
		ZD4	314	70
	Sistemas fotovoltaicos	SF1	405	84
		SF2	310	84
	Sistema solar	SS	396	84
	MGI	MGI	510	70

Con las mediciones de iluminancia registradas en la Tabla 7, el promedio se calculó y resultó ser de 299.93lx, esto, cuando las dieciséis luminarias permanecían encendidas al no contar con aporte de luz natural.

3.4 Registro fotográfico

En este apartado se presenta un registro fotográfico del laboratorio con las luminarias de haluro metálico instaladas, con el fin de mostrar el espacio durante el cual se tenía en operación el sistema de iluminación con luminarias de haluro metálico.



Figura 16. Foto 1 del registro fotográfico de las luminarias de haluro metálico instaladas.



Figura 17. Foto 2 del registro fotográfico de las luminarias de haluro metálico instaladas.



Figura 18. Foto 3 del registro fotográfico de las luminarias de haluro metálico instaladas.

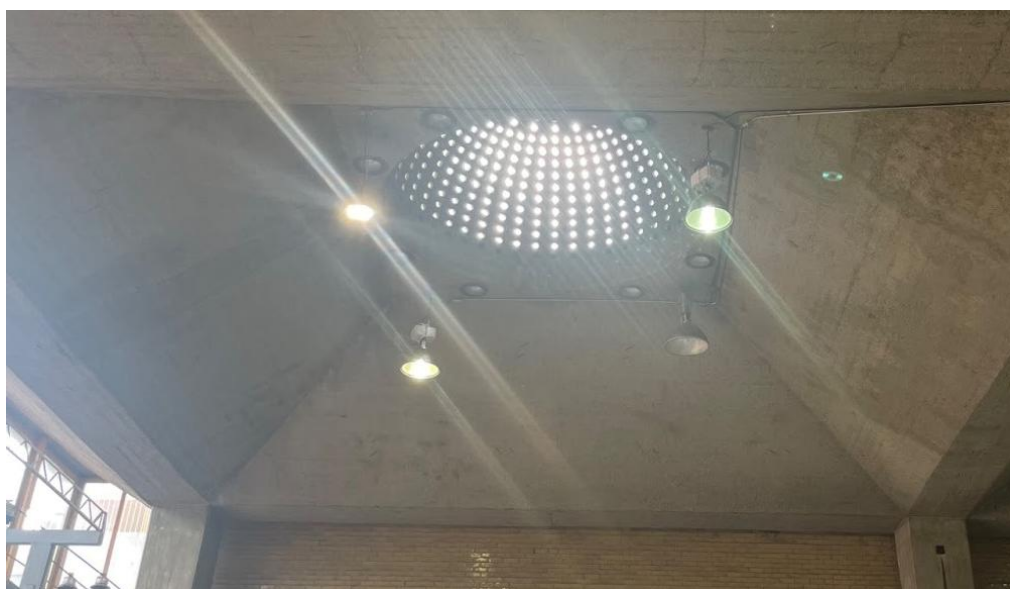


Figura 19. Foto 4 del registro fotográfico de las luminarias de haluro metálico instaladas.

3.5 Análisis de calidad de la potencia

El analizador comercial 3945-B AEMC de la Figura 20 es una herramienta de medición imprescindible para la realización de este proyecto, ya que permite medir voltaje, corriente, potencia, frecuencia y armónicos en sistemas eléctricos, tanto en AC como en DC. También analiza formas de onda y distorsión armónica, lo que ayuda a evaluar la calidad de energía. Con una pantalla LCD y capacidad de almacenar datos, que se pueden transferir a una computadora para crear un informe más detallado.



Figura 20. Analizador AEMC 3945-B.

Se seleccionó la configuración monofásica para conectar el analizador 3945-B de AEMC a un interruptor termomagnético, utilizando dos fases para realizar las mediciones. Este tipo de conexión permitió conocer medir los voltajes, las corrientes, las potencias los factores de potencia, las formas de onda, los fasores, las distorsiones armónicas individual y total.

En la Figura 21 se muestra el esquema de cómo se realizaron las conexiones del analizador al interruptor termomagnético.

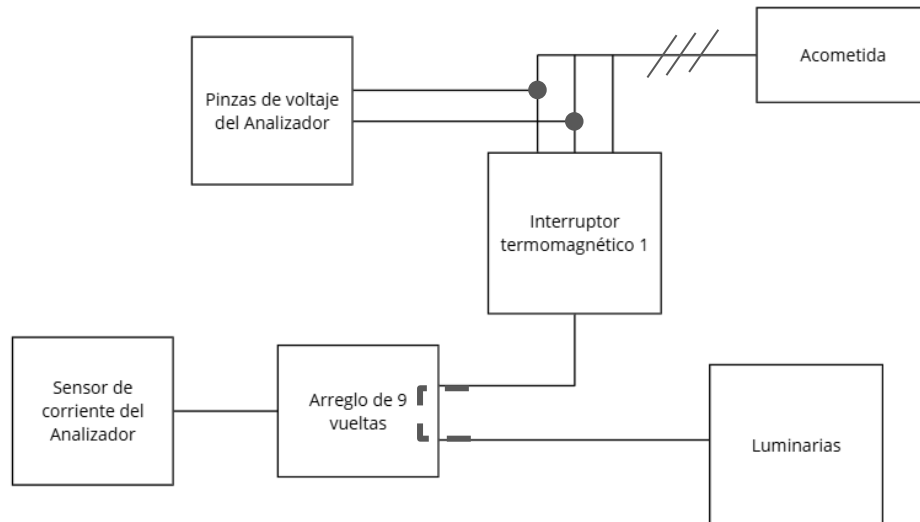
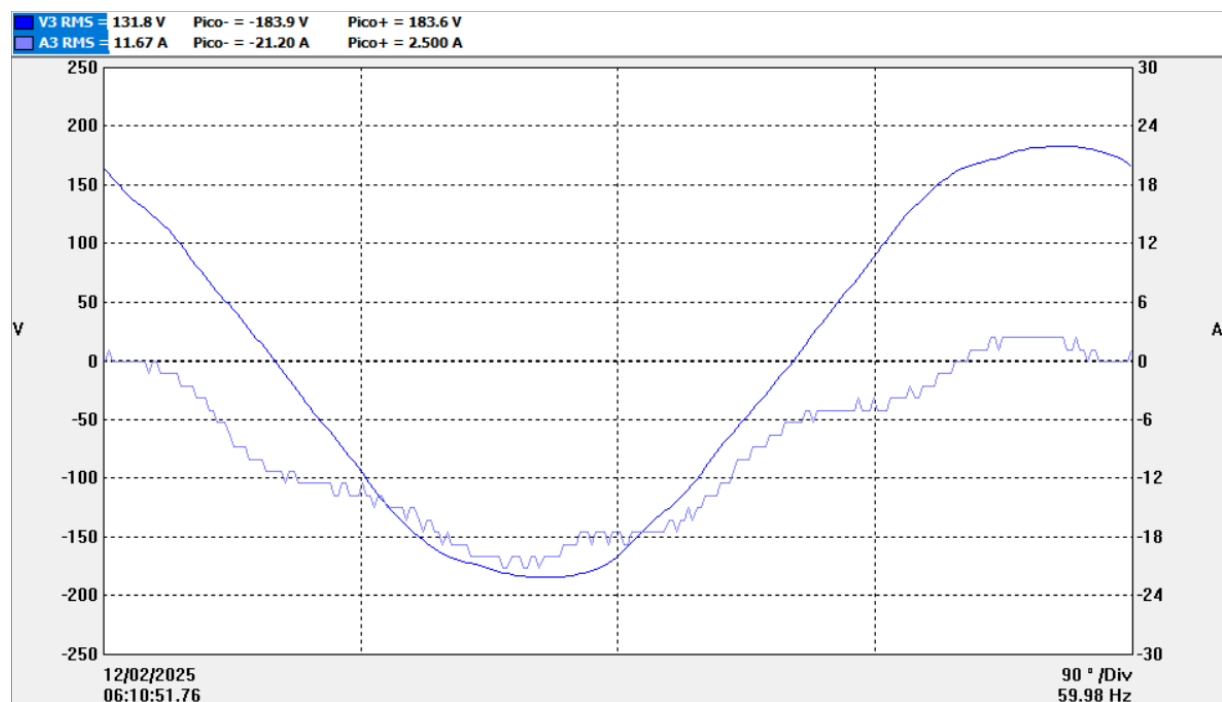


Figura 21. Esquema de conexión del analizador al interruptor termomagnético.

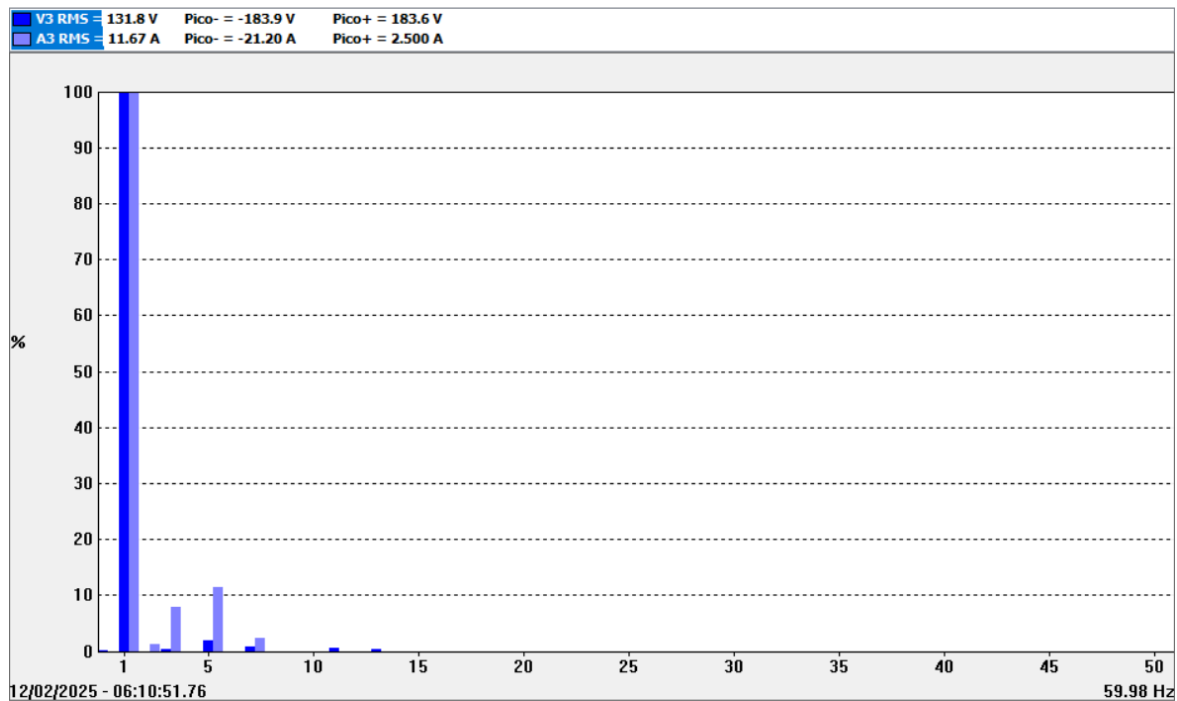
3.6 Luminarias de haluro metálico

Para las luminarias de haluro metálico, las mediciones de calidad de energía se realizaron en el interruptor termomagnético número 1, con la intención de observar el comportamiento de las ondas de corriente, voltaje y demás características eléctricas. En la Figura 22 (a), se presentan formas de onda de voltaje y corriente con valores RMS de 131.8V y 11.67A (representando 1.29A debido al arreglo de vueltas utilizado), respectivamente, con una frecuencia de 59.98Hz.

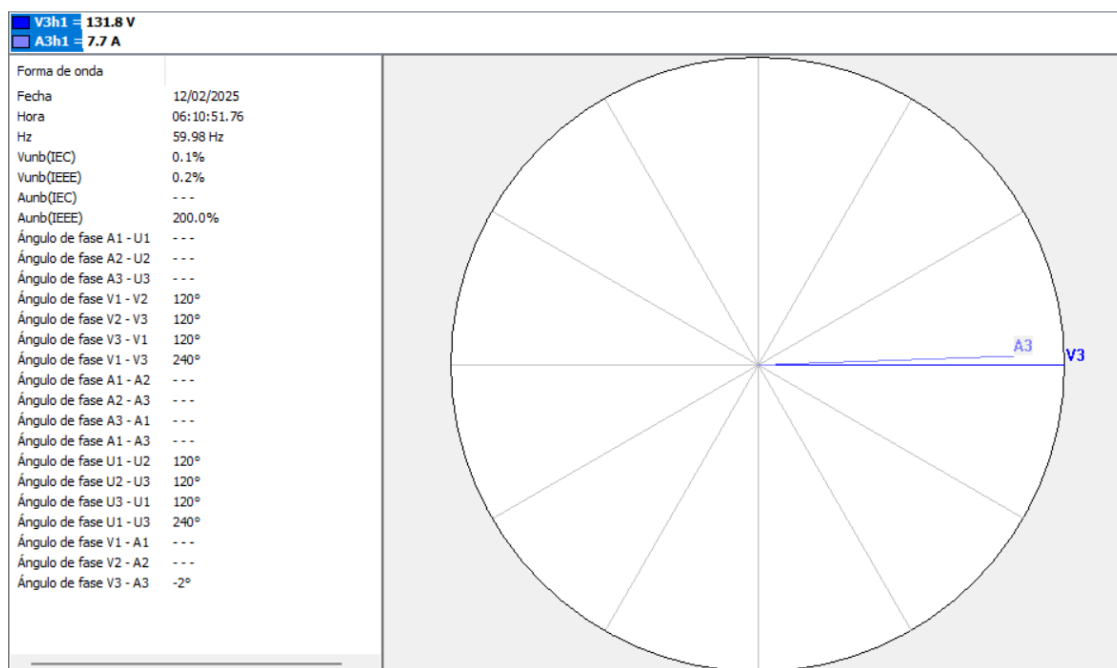
La distorsión armónica de voltaje y de corriente se presenta en la Figura 22 (b), nótese que no se evidencia la presencia de armónicos de voltaje pares, pero sí de impares (3° , 5° , 7° , 11° y 13°). Igualmente se observa la presencia de armónicos de corriente pares (2° armónico) e impares (3° , 5° y 7°). El desfase entre los fasores de voltaje y corriente se ilustra en la Figura 22 (c), exhibiendo un desfase de 2° .



(a)



(b)



(c)

Figura 22. Comportamiento de variables eléctricas en el interruptor termomagnético 1.

En la Tabla 8 se presentan las potencias activas y reactivas que demandan las luminarias conectadas al interruptor termomagnético 1, así como su factor de potencia.

Tabla 8. Datos de potencia en el interruptor termomagnético 1 con luminarias de haluro metálico.

W					
(W)	(var)	(VA)	PF	DPF	Tan
998	-1119	1499	0.666	0.992	-0.037

Capítulo 4. Situación posterior con luminarias PLEP

En este capítulo se presenta la situación posterior a la instalación de las nuevas luminarias con tecnología PLEP, las cuales fueron implementadas con el propósito de mejorar las condiciones de iluminación y eficiencia energética del laboratorio de Máquinas Eléctricas.

Se describe el laboratorio modelado en el software DIALux, recreando las características físicas del espacio donde se realizaron las mediciones, incluyendo dimensiones, disposición de las áreas o mobiliario, y ubicación de las luminarias.

Como el entorno de trabajo de DIALux Evo está conformado por diversas herramientas y módulos que permiten desarrollar, simular y analizar proyectos de iluminación, el modelo permitió representar el entorno real para analizar el comportamiento de las nuevas luminarias y su distribución dentro del espacio.

A partir de esta descripción, se busca establecer una base para la comparación y evaluación de los resultados que pueda arrojar el programa.

4.1 Descripción del laboratorio en DIALux (con imágenes)

Se realizó el diseño del modelado 3D del laboratorio de Máquinas Eléctricas en el software DIALux, con las dimensiones y algunas características físicas del espacio real. Dentro de este modelo se incorporaron las luminarias PLEP del Grupo IEBSA, con el propósito de representar su ubicación en el área de estudio, permitiendo así una visualización muy cercana a la del laboratorio con las nuevas luminarias instaladas.

La Figura 23 muestra la vista superior del laboratorio simulado en DIALux, donde es posible observar la disposición general del espacio, incluyendo la ubicación de las luminarias PLEP y los elementos principales del laboratorio.

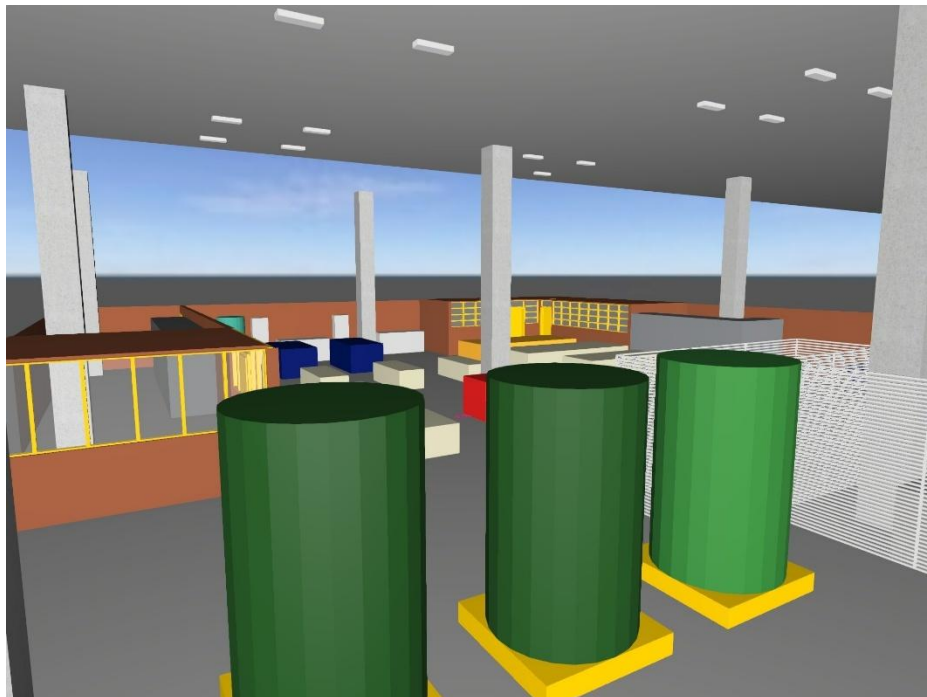


Figura 23. Vista superior del laboratorio de Máquinas Eléctricas simulado en DIALux.

La vista frontal derecha del laboratorio simulado en DIALux se observa en la Figura 24 (a), mientras que la Figura 24 (b) muestra la vista desde el frente izquierdo. A través de estas figuras es posible observar con mayor detalle la distribución del mobiliario, la ubicación de las luminarias PLEP y la disposición espacial del laboratorio. Estas perspectivas complementan la visualización del modelo 3D y permiten comprender de forma más completa la configuración del área de estudio.



(a)



(b)

Figura 24. Vista frontal del laboratorio de Máquinas Eléctricas.

DIALux Evo cuenta con diversas opciones de trabajo que aparecen en la interfaz, como herramientas, menús, pestañas y funciones para modelar, colocar luminarias o realizar cálculos. La Figura 25 es una captura de pantalla del entorno de trabajo de la pestaña objetos de cálculo y en ella se observan los paneles, menús y barras de herramientas que diversifican la configuración de los cálculos del proyecto.

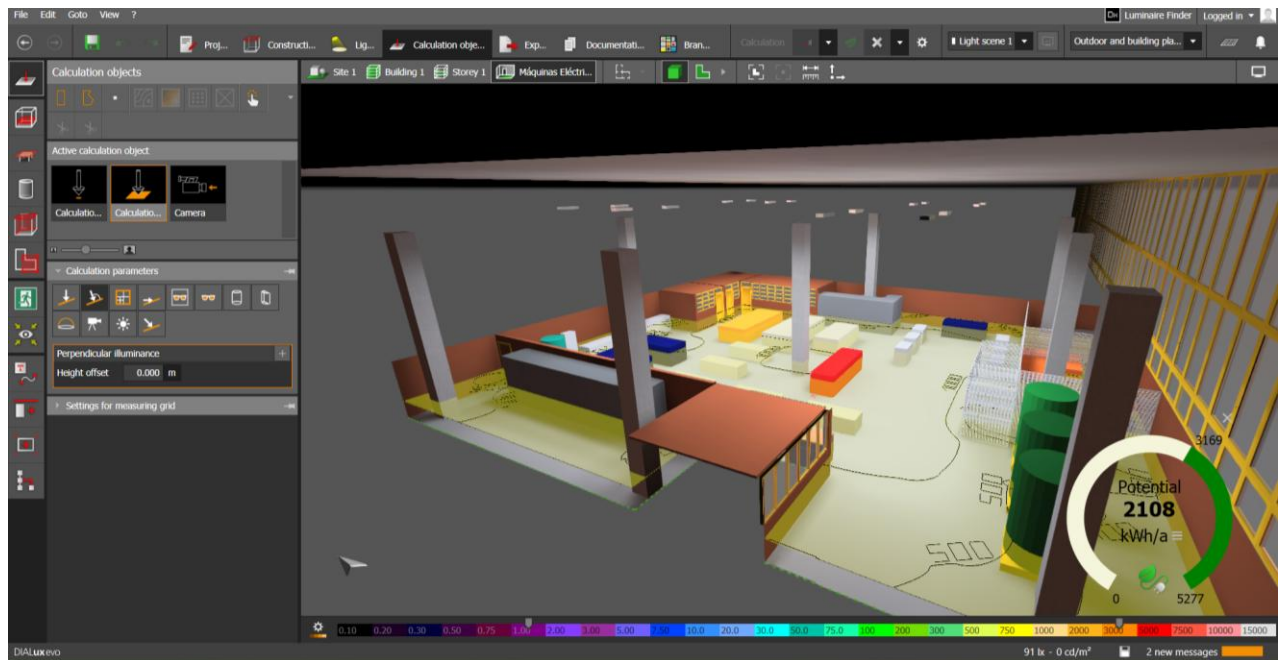


Figura 25. Captura de pantalla de la interfaz de usuario en la pestaña de cálculo de iluminancia del laboratorio de Máquinas Eléctricas en DIALux Evo.

La captura de pantalla de la Figura 26 (a) muestra la superficie de los objetos de cálculo con los resultados obtenidos, la cual se representa en color amarillo dentro de la simulación y tiene una altura de 0.70m que corresponde a la altura mínima que se registró en las tablas de medición de iluminancia en el capítulo anterior. Este color indica la zona donde se realizó el análisis de iluminancia para visualizar la distribución de la luz en el modelo del laboratorio.

En la Figura 26 (b) se visualiza la superficie correspondiente al área de trabajo, la cual se representa en color morado dentro del modelo, que también tiene una altura de 0.70m.



(a)



(b)

Figura 26. Captura de pantalla frontal derecha del cálculo de iluminación del laboratorio de Máquinas Eléctricas en DIALux Evo.

Con la opción de mostrar las texturas o efectos visuales de la luz proyectada por las luminarias en la vista 3D de DIALux Evo, se mantuvo visible la luz emitida por las luminarias dentro de la simulación. En la Figura 27, la captura de pantalla permite observar la distribución y el alcance de la iluminación, facilitando la evaluación visual del ambiente iluminado, esto, con la visualización del cielo en el entorno desactivada.

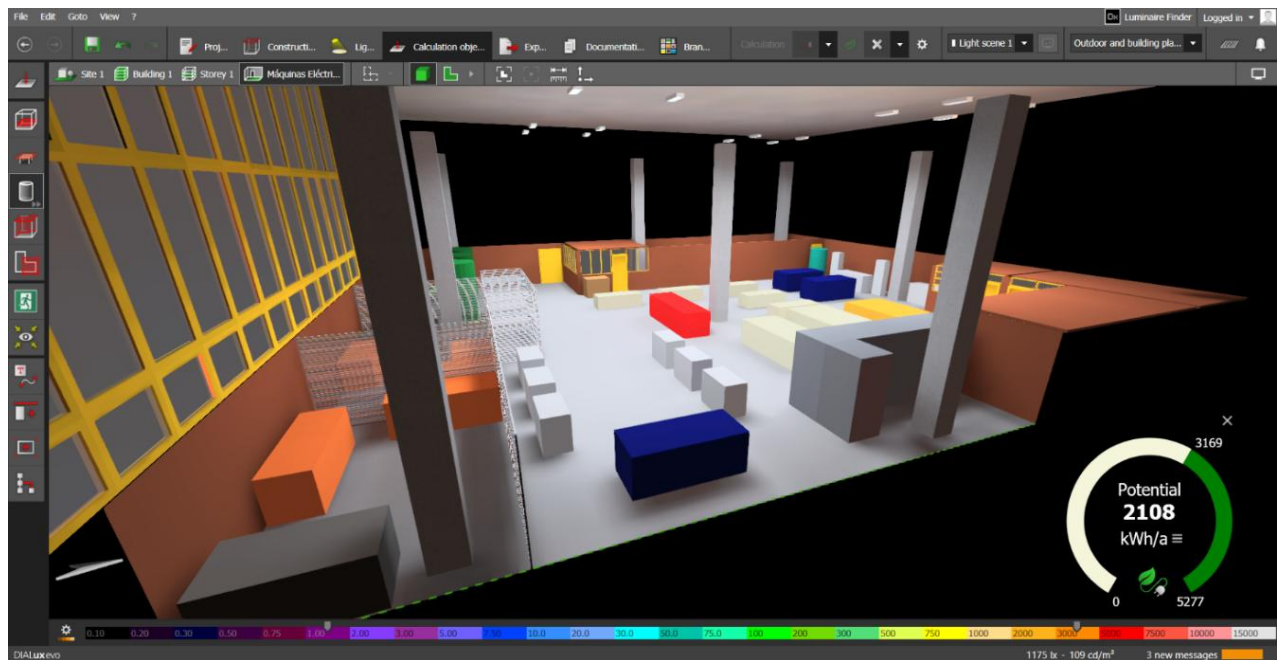


Figura 27. Captura de pantalla del cálculo de iluminancia en DIALux Evo con efectos de luz de las luminarias del laboratorio de Máquinas Eléctricas.

En la Figura 28 se muestra la simulación del laboratorio en DIALux Evo con la visualización del cielo en el entorno desactivada y la función *show false colours* activada, esta última permite identificar de forma clara los diferentes niveles de iluminancia mediante una escala de colores, lo que facilita el análisis de la distribución lumínica y la detección de zonas con mayor o menor iluminación.

En la parte inferior del modelado 3D una vez que se realizaron los cálculos, se muestra una barra indicadora de los niveles de lux correspondientes a cada color, permitiendo asociar un nivel de iluminación a los colores obtenidos del cálculo

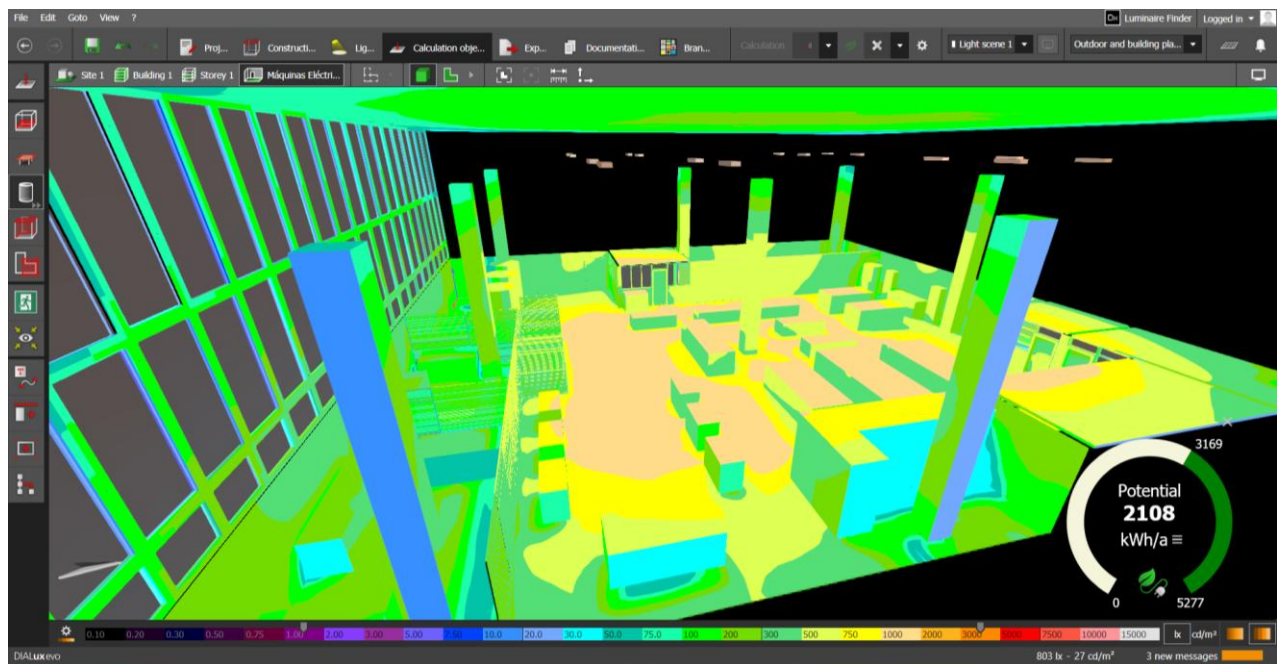


Figura 28. Captura de pantalla de los resultados del cálculo de iluminación usando un mapa de colores del laboratorio de Máquinas Eléctricas.

Es muy importante mencionar que los valores de reflectancia de las superficies son datos esenciales en la simulación de iluminación en DIALux Evo, ya que determinan la cantidad de luz que se refleja en las paredes, techos y suelos dentro del espacio de estudio. Estos valores afectan directamente a la distribución de la luz y la uniformidad de la iluminancia, ya que superficies más reflectantes pueden aumentar la eficiencia lumínica al redirigir la luz hacia otras áreas. Por lo anterior, la Tabla 9 presenta los valores de reflectancia asignados automáticamente por DIALux Evo al seleccionar los colores de las superficies durante la configuración del modelo.

Tabla 9. Valores de reflectancias de las superficies.

Superficie	Reflectancia
Techo	70%
Pared	22.7%
Suelo	31%

4.2 Tipo y características de las lámparas, distribución fotométrica potencia luminosa de las luminarias.

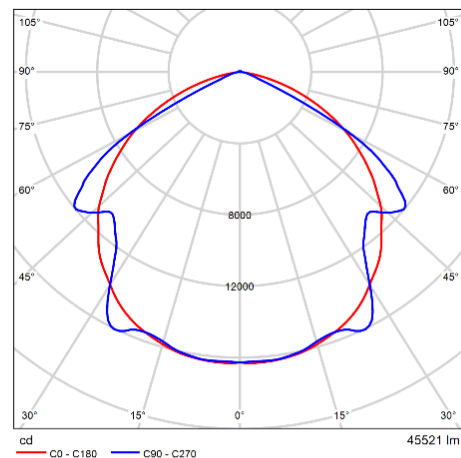
Para realizar el proyecto de iluminación en DIALux es indispensable conocer las características fotométricas y eléctricas de la lámpara elegida, las cuales se observan en la Figura 29.

Como nuestro objetivo es que el programa reproduzca el comportamiento real de la luz en el laboratorio, buscamos en el catálogo de DIALux Evo una luminaria cuyas características eléctricas y fotométricas fueran muy similares a las de las luminarias ya instaladas, esto porque no se encuentra el modelo exacto instalado dentro del catálogo.

Ya que no se trata de la misma luminaria, sino de una sustitución aproximada, es importante reconocer que puede haber ligeras diferencias entre el modelo real y el modelo simulado.

Current - ABV3 48H 5000K 80 CRI 120DEG CLEAR LENS

 	
Article No.	ABV3448H581Cxxxxx xx - 120-277V
P	248.0 W
Φ_{Lamp}	–
$\Phi_{Luminaire}$	45521 lm
η	–
Luminous efficacy	183.6 lm/W
CCT	5000 K
CRI	80



Polar LDC

Figura 29. Características de la lámpara CURRENT ABV3.

En el informe generado por DIALux Evo obtuvimos el plano de distribución de luminarias que se observa en la Figura 30, el cual muestra la disposición y la ubicación de las luminarias dentro del área de estudio. Este plano permite visualizar la distribución del sistema de iluminación con la numeración de las luminarias, y sirve como referencia para verificar si el diseño planteado en la simulación corresponde con el real.

La lista de luminarias de la Figura 31 enriquece la información del plano de distribución, ya que proporciona información detallada sobre las coordenadas de su posición, la altura de montura y el número de cada luminaria representada en la Figura 30. De esta manera, el plano muestra la disposición espacial detallada del sistema de iluminación.

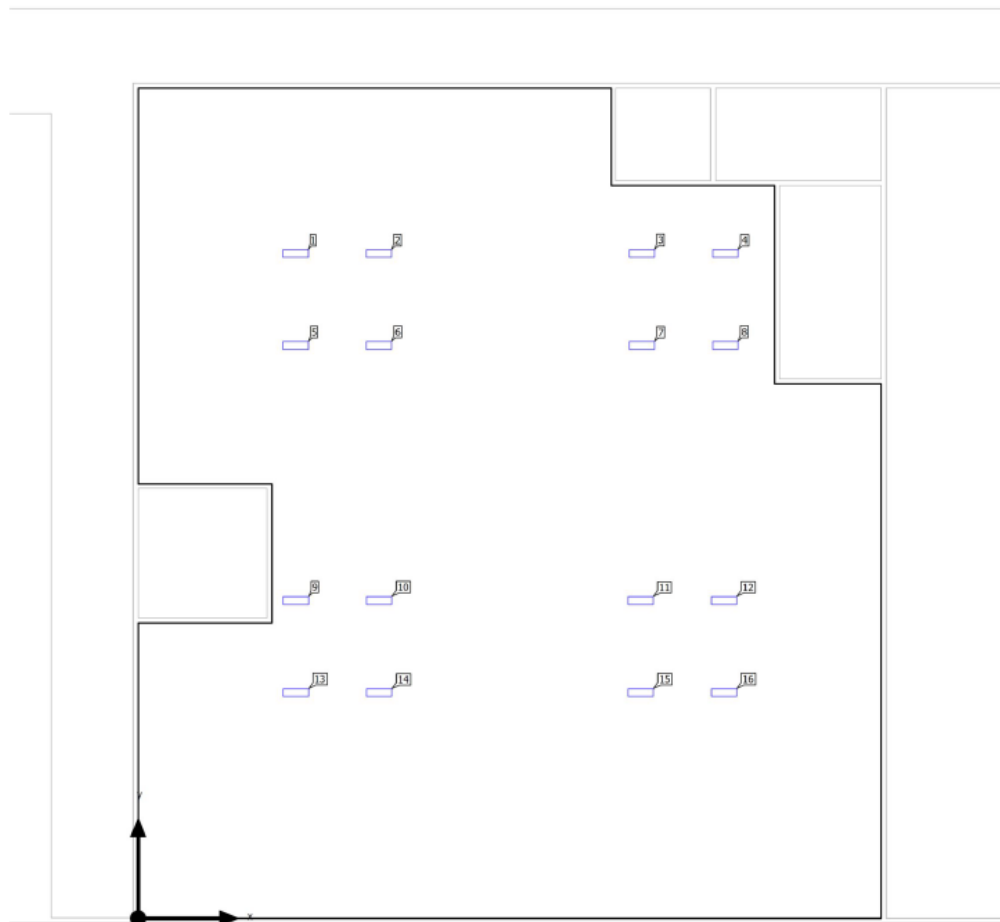


Figura 30. Plano de distribución de luminarias del laboratorio de Máquinas Eléctricas en DIALux Evo.

X	Y	Mounting height	Luminaire
4.651 m	19.631 m	7.679 m	1
7.113 m	19.631 m	7.679 m	2
14.886 m	19.631 m	7.679 m	3
17.348 m	19.631 m	7.679 m	4
4.651 m	16.914 m	7.679 m	5
7.113 m	16.914 m	7.679 m	6
14.886 m	16.914 m	7.679 m	7
17.348 m	16.914 m	7.679 m	8
4.657 m	9.383 m	7.679 m	9
7.119 m	9.383 m	7.679 m	10
14.848 m	9.383 m	7.679 m	11
17.310 m	9.383 m	7.679 m	12
4.657 m	6.666 m	7.679 m	13
7.119 m	6.666 m	7.679 m	14
14.848 m	6.666 m	7.679 m	15
17.310 m	6.666 m	7.679 m	16

Figura 31. Lista de las luminarias del plano de distribución de la Figura 30.

4.3 Plano de cálculo y niveles de iluminancia

También se obtuvo un plano típico de los objetos de cálculo de la Figura 32, en el cual se visualizan las luminarias instaladas y parte del mobiliario del laboratorio; a partir de este plano se llevó a cabo el cálculo de la iluminancia en el laboratorio de Máquinas Eléctricas, permitiendo identificar y cuantificar los niveles de iluminación reales del espacio.

Calculation objects

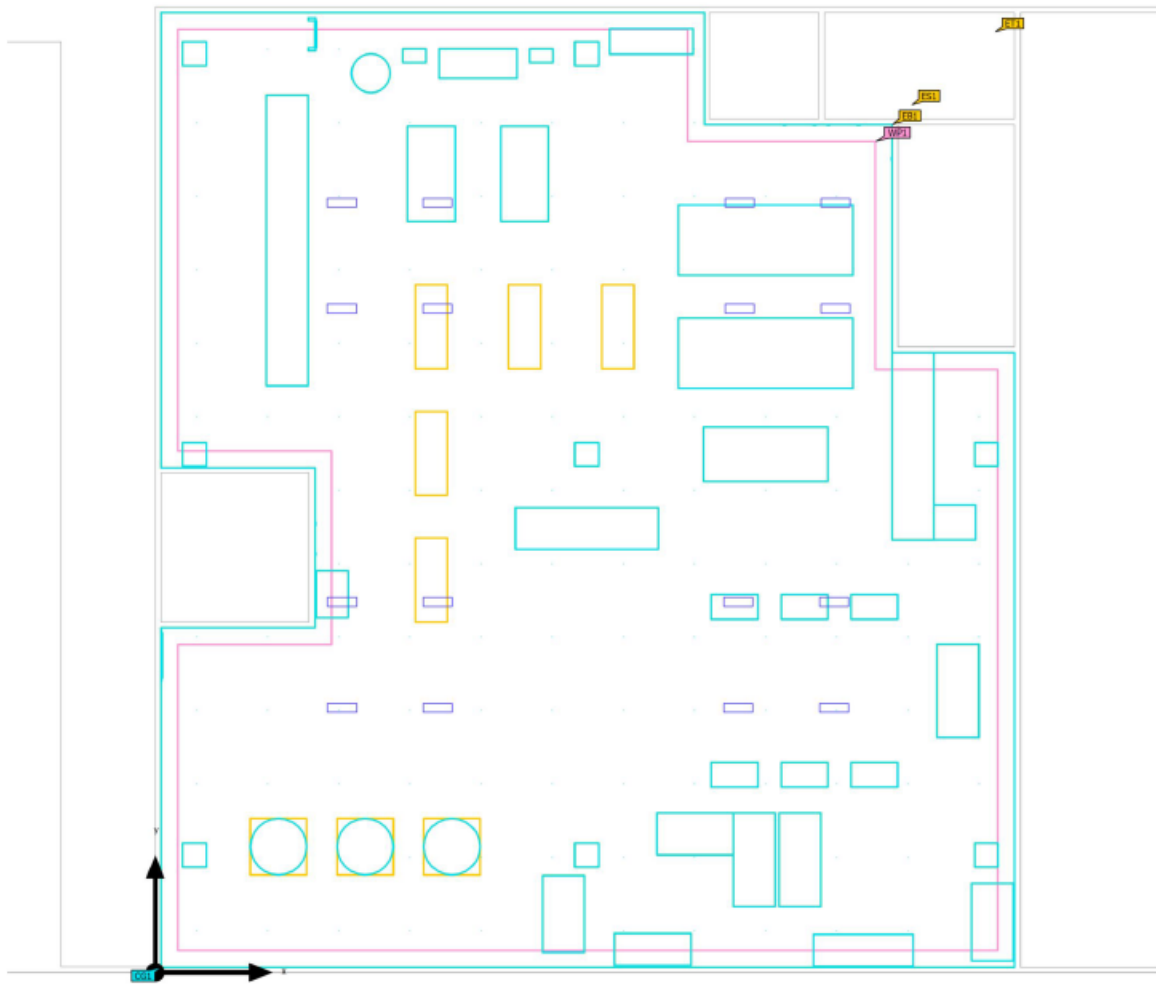


Figura 32. Plano de los objetos de cálculo.

Como parte de los resultados, DIALux Evo genera un plano llamado *Escena de Luz 1 – Resumen* que ilustra la Figura 33, en el cual se presenta una visión general del diseño lumínico de la escena principal configurada en el proyecto.

En dicho plano, se incluyen datos esenciales como la distribución de luminarias en el espacio, los niveles de iluminancia (lux) obtenidos en las superficies de trabajo o áreas relevantes, la uniformidad de la iluminación y los valores promedio, máximo y mínimo de luz, así como la información del espacio.

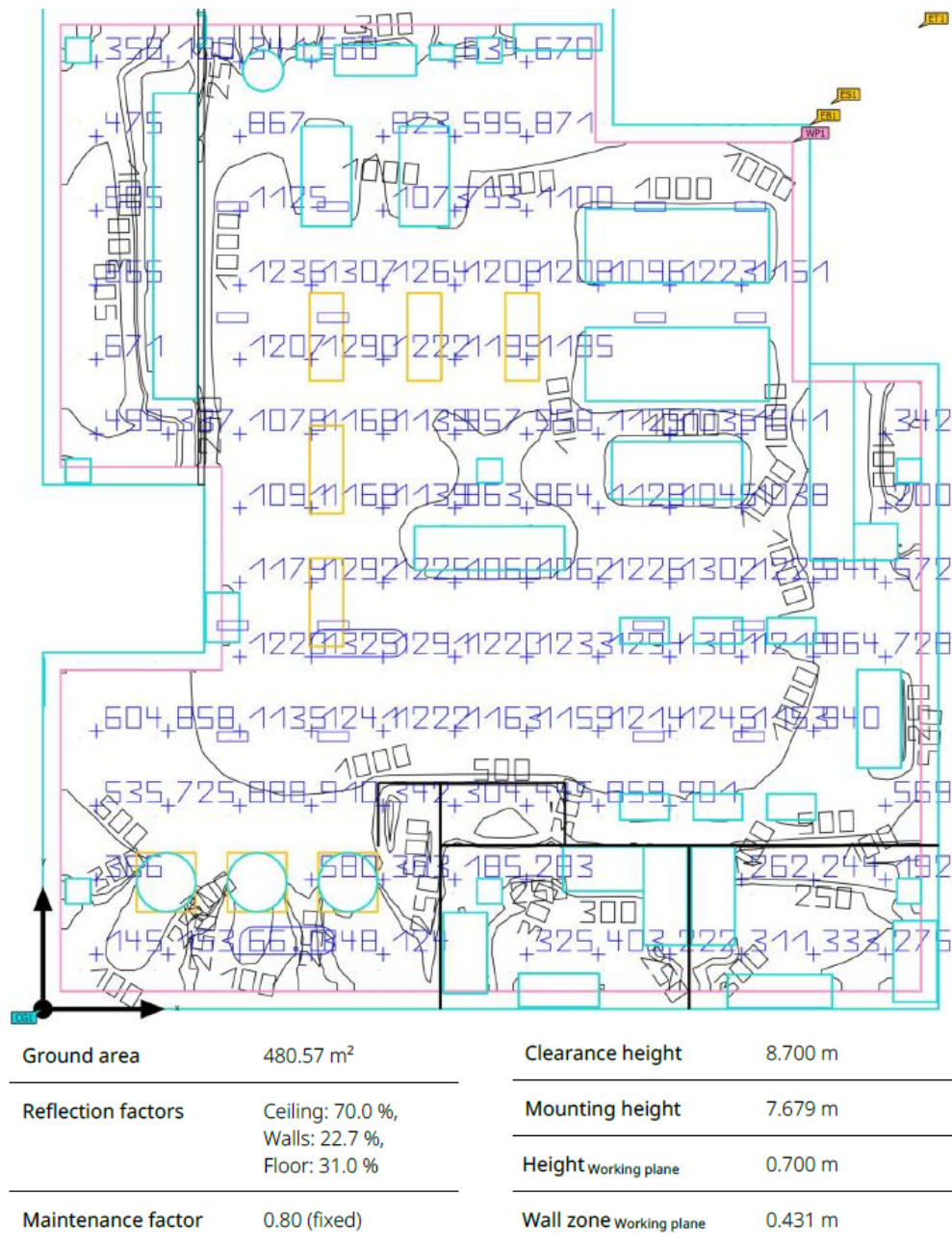


Figura 33. Plano Escena de Luz 1 - Resumen del laboratorio de Máquinas Eléctricas en DIALux Evo.

Aunado al plano de la Figura 33, también se proporciona un resumen con los principales resultados de los distintos objetos de cálculo (como el plano de trabajo, las áreas de tarea visual y el espacio completo), según se observa en la Figura 34.

Aunque DIALux Evo se basa en parámetros y normativas de origen europeo para el cálculo de iluminancia, los niveles de iluminación recomendados son equivalentes a los establecidos por la normativa mexicana. Es por esto que tomamos como referencia a la NOM-025-STPS-2008, que regula las condiciones de iluminación en los centros de trabajo en México, tomando sus valores como referencia para el análisis de los resultados obtenidos.

Para el *Working plane* se obtuvo una iluminancia calculada de 851 lx frente al objetivo ≥ 500 lx, indicando que se cumplió el nivel requerido por la norma NOM-025-STPS-2008, sin embargo, otros parámetros como la uniformidad y/o el índice de deslumbramiento (UGR) no alcanzaron los niveles esperados.

La densidad de potencia de iluminación, la estimación de consumo anual, así como los valores calculados frente a los objetivos de la norma, es información clave para evaluar si el proyecto (diseño lumínico) cumple con los requisitos técnicos y de confort visual, considerando dónde existen áreas de mejora.

Por lo anterior, también se retoma la NOM-007-ENER-2014, que especifica los requisitos de eficiencia energética para sistemas de alumbrado en interiores. Ambas normas sirven como fundamento para la evaluación y análisis de los resultados obtenidos en la simulación.

Es así que los resultados reflejados en el resumen (nivel de iluminancia, densidad de potencia, consumo estimado) no solo cumplen con los requisitos fotométricos del espacio, sino que también se evalúan frente a los límites energéticos establecidos según el marco normativo.

Summary

Results

	Symbol	Calculated	Target	Check	Index
Working plane	$\bar{E}_{\text{perpendicular}}$	834 lx	≥ 500 lx	✓	WP1
	$U_o (g_1)$	0.031	≥ 0.60	✗	WP1
	Lighting power density	9.06 W/m ²	-		
		1.09 W/m ² /100 lx	-		
Visual task areas	$\bar{E}_{\text{Task Area}}$	823 lx	≥ 500 lx	✓	ET1
	$U_o (g_1)_{\text{Task Area}}$	0.18	≥ 0.60	✗	ET1
	$\bar{E}_{\text{Background area}}$	-	≥ 100 lx	✗	EB1
	$U_o (g_1)_{\text{Background area}}$	-	≥ 0.10		EB1
Glare valuation ⁽¹⁾	$R_{UG, \text{max}}$	33	≤ 19	✗	
Energy estimation ⁽²⁾	Consumption	[3169 - 5277] kWh/a	max. 16850 kWh/a	✓	
Space	Lighting power density	8.26 W/m ²	-		
		0.99 W/m ² /100 lx	-		

(1) Based on a rectangular space of 24.510 m x 21.957 m and SHR of 0.25.

(2) Calculated using DIN:18599-4.

Utilisation profile: Educational premises - Educational buildings (44.14 Practical rooms and laboratories)

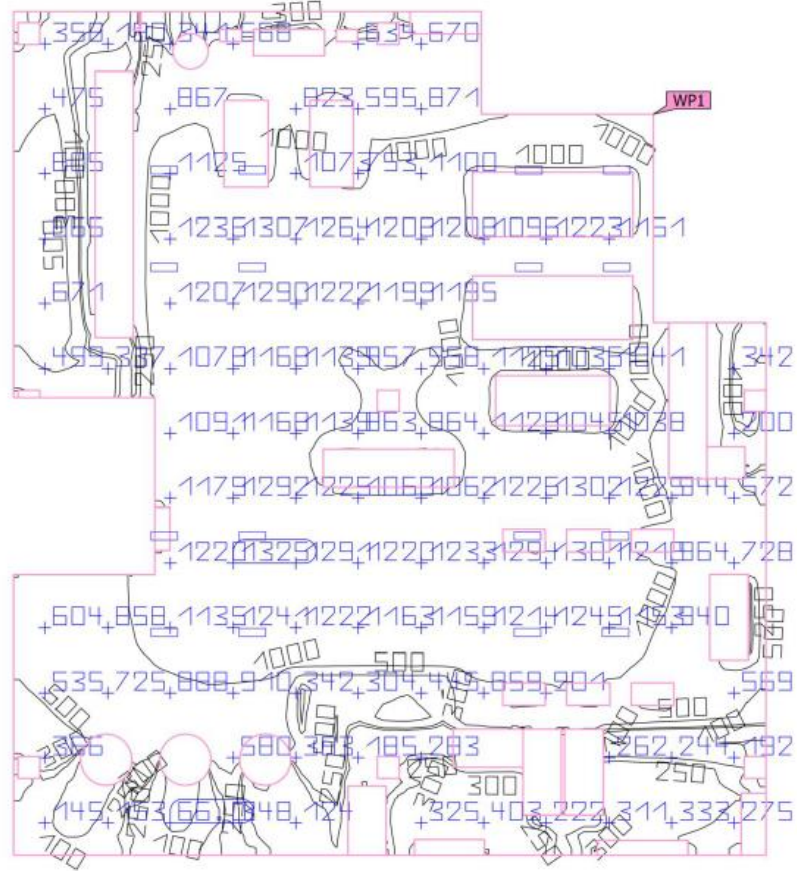
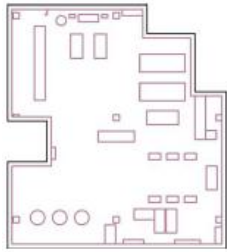
Figura 34. Cálculos de la Escena de Luz 1 - Resumen del laboratorio de Máquinas Eléctricas realizados en la simulación con DIALux Evo.

Los planos de la Figura 35 facilitan la evaluación de los niveles de iluminancia emitida por las, permitiendo ver si se cumple con los requisitos normativos y de confort visual establecidos (500 lx) para la actividad que se desarrolla en el espacio (laboratorio). En los planos se encuentran desglosados algunos indicadores que permiten evaluar y verificar a partir de ellos, si los niveles cumplen con lo requerido.

El Plano de trabajo del laboratorio de Máquinas Eléctricas de la Figura 35 (a) muestra la distribución de los niveles de iluminancia sobre la superficie de trabajo considerada en el proyecto. Este plano permite visualizar los resultados que corresponden únicamente a esa superficie de referencia.

La Figura 35 (b) corresponde a los resultados del Área de tarea visual, en donde se muestran los niveles de iluminancia, siendo evaluado únicamente el espacio donde se realizan actividades que requieren precisión visual, esto, para garantizar que la iluminación sea adecuada para la seguridad y el desempeño eficiente de las tareas a realizar en el laboratorio.

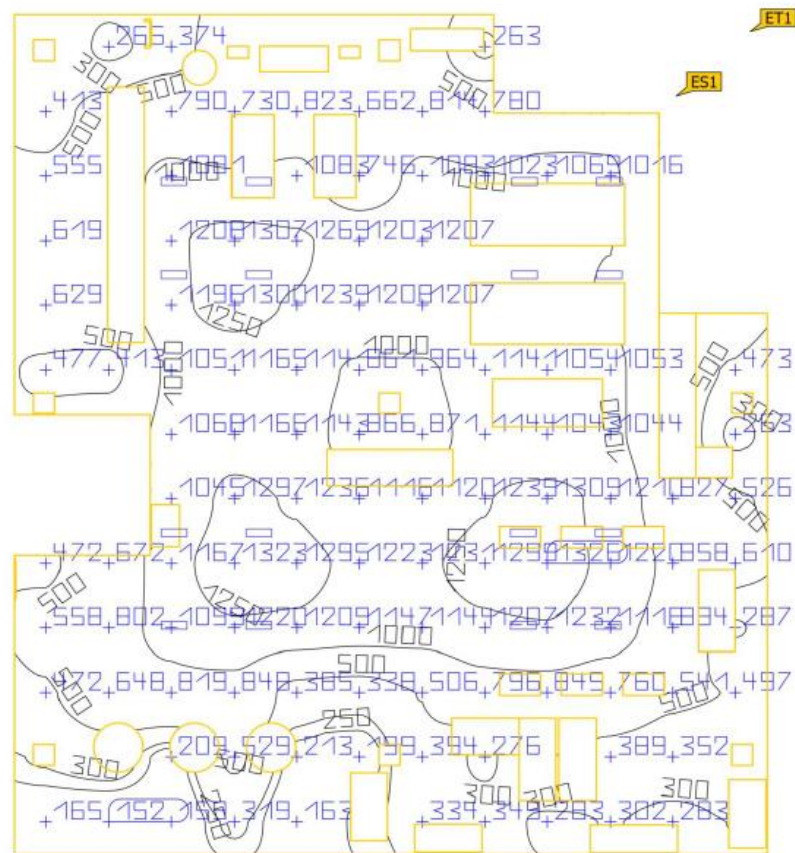
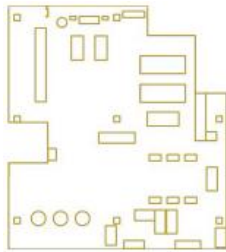
El plano Superficie de Cálculo de la Figura 35 (c) presenta los valores de iluminancia obtenidos sobre la superficie definida en el modelo de DIALux Evo. En este plano se representan parámetros técnicos tales como la iluminancia media (E_{med}), la iluminancia mínima (E_{min}) y la uniformidad de la iluminación ($U0=E_{min}/E_{med}$).



Properties	$\bar{E}$ (Target)	E_{min}	E_{max}	$U_o (g_1)$ (Target)	g_2	Index
Working plane (Máquinas Eléctricas)	834 lx	25.7 lx	1335 lx	0.031	0.019	WP1
Perpendicular illuminance (adaptive)	(≥ 500 lx)			(≥ 0.60)		
Height: 0.700 m, Wall zone: 0.431 m	✓			✗		

Utilisation profile: Educational premises - Educational buildings (44.14 Practical rooms and laboratories)

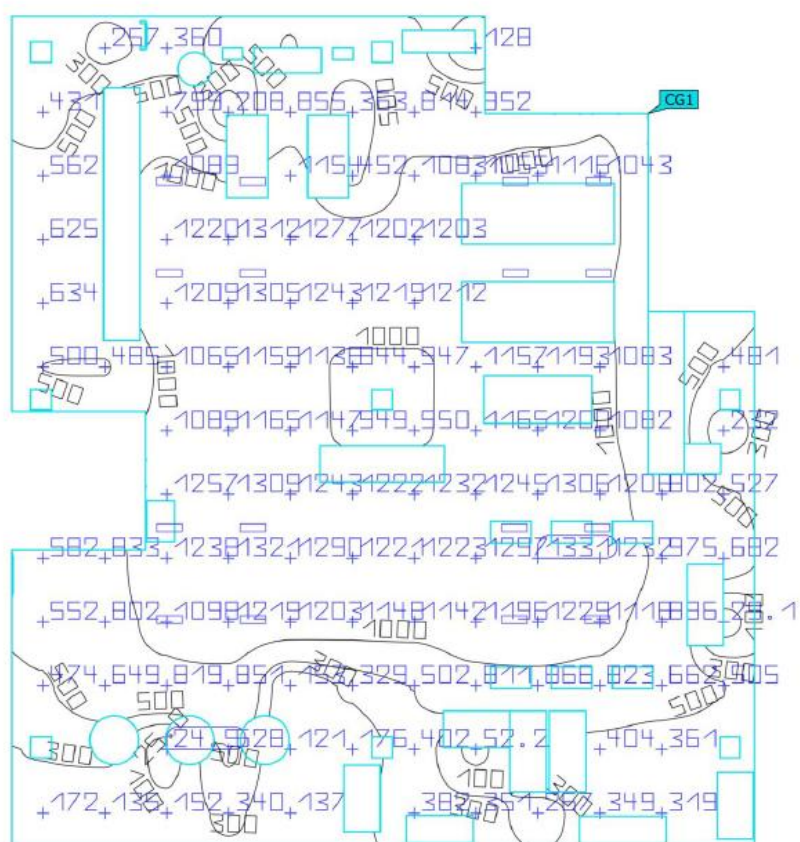
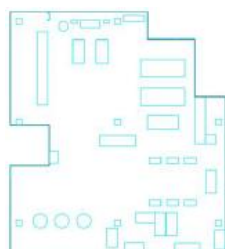
(a)



Properties	E (Target)	E _{min}	E _{max}	U _o (g ₁) (Target)	g ₂	Index
Máquinas Eléctricas Visual task area Perpendicular illuminance Height: 0.700 m, Surrounding area: 0.500 m	823 lx (≥ 500 lx) ✓	152 lx	1326 lx	0.18 (≥ 0.60) ✗	0.11	ET1
Background area 1 Perpendicular illuminance Height: 0.000 m, Wall zone: 0.500 m	✗ (≥ 100 lx)			- (≥ 0.10)	-	EB1

Utilisation profile: Educational premises - Educational buildings (44.14 Practical rooms and laboratories)

(b)



Properties	$\bar{E}$	E_{min}	E_{max}	$U_o (g_1)$	g_2	Index
Calculation surface Perpendicular illuminance Height: 0.700 m	822 lx	24.5 lx	1331 lx	0.030	0.018	CG1

Utilisation profile: Educational premises - Educational buildings (44.14 Practical rooms and laboratories)

(c)

Figura 35. Resultados los cálculos efectuados en DIALux Evo del laboratorio de Máquinas Eléctricas.

4.4 Luminarias PLEP

En la Tabla 10 se desglosan las especificaciones eléctricas y fotométricas de la luminaria BSA-UH-DCT00-101 B 240 W del grupo IEBSA de la Figura 36. Estos datos son de importancia ya que con ellos podremos conocer su desempeño energético y sus características lumínicas, permitiendo una visión general de sus propiedades técnicas más relevantes que proporciona el fabricante.

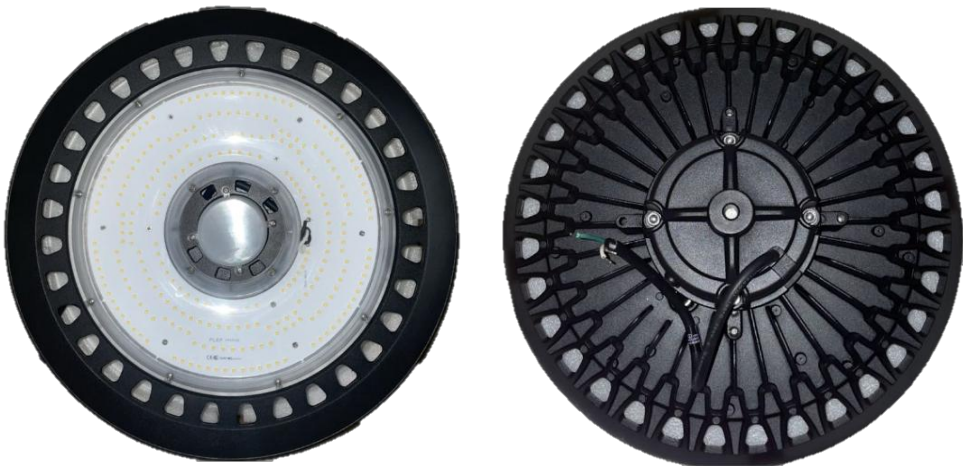


Figura 36. Luminaria PLEP BSA-UH-DCT00-101 B 240 W.

Tabla 10. Características de las lámparas PLEP.

Luminarias PLEP			
Especificaciones eléctricas		Especificaciones fotométricas	
Potencia eléctrica (W)	240	Flujo luminoso (lm)	45,568
Tensión eléctrica nominal (V _{AC})	100 - 277	Eficacia lumínica (lm/W)	189
Corriente eléctrica nominal (A)	*	CCT (K)	5,000
Frecuencia (Hz)	60	CRI	70

Vida útil (h)	100,000
---------------	---------

Se presentan nuevamente las tablas de medición de niveles de iluminancia (lux), elaboradas con el mismo formato utilizado en el capítulo anterior. En este caso, las mediciones corresponden a las nuevas luminarias PLEP instaladas, que fueron tomadas con el luxómetro y bajo dos condiciones: con y sin luz de día.

A continuación, se presenta la Tabla 11 correspondiente a las mediciones realizadas con luminarias PLEP y con luz de día, efectuadas el 26 de septiembre de 2025 entre las 07:30 y las 10:00 horas, permitiéndonos así, saber los niveles de iluminación bajo la influencia de la luz natural.

Tabla 11. Medición de iluminancia (lx) con luz de día y luminarias PLEP.

Cuadrante	Área	Nomenclatura	Luxes(Lx)	Altura (cm)
1	Entrada	E1	488	70
		E2	689	70
		E3	744	70
	Transformadores	TR1	751	70
		TR2	651	70
		TR3	622	70
	Registro	R1	820	96
		R2	839	70
	Equipo de Pruebas	EP	798	100
	Mesa máquinas I	MM1	998	96
		MM2	1974	96

		MM4	790	70
	MG	MG1	709	70
2	Tablero	T1	638	70
		T2	605	70
		T3	555	70
		T4	415	70
	Pizarrón SEP 1	PS	601	91
	Gabinetes SEP 1	G1	366	91
		G2	300	91
	Mesas SEP I	SE1	507	102
		SE2	576	102
		SE3	461	102
		SE4	537	102
	MG	MG2	746	70
	MGII	MGII	613	70
	Motor serie	MS	662	70
3	Protecciones (Computadoras)	P1	970	90
		P2	1008	90
		P3	1005	90
		P4	759	90
		P5	814	90
		P6	851	90

	Protecciones centro	PC	963	70
	Pizarrón Protecciones	PS	789*	96
	Protecciones (Gabinete Azul)	G3	895	88
	Protecciones (Gabinete Café)	G4	616	88
	Mesa Máquinas I	MM3	1018	96
	Máquina marina	MR1	763	85
		MR2	810	85
	Jaula	J1	1078	80
		J2	1065	80
		J3	1254	80
		J4	905	75
		J5	309	78
	Taller	TL1	325	90
		TL2	751	92
		TL3	961	92
		TL4	768	100
4	Mesa de control	MC	455	95
	Dinamómetro I	DI1	684	70
		DI2	621	70

	Dinamómetro II	DII1	400	70
		DII2	579	70
	Zona dinamómetro	ZD1	681	70
		ZD2	528	70
		ZD3	616	70
		ZD4	598	70
	Sistemas fotovoltaicos	SF1	707	84
		SF2	651	84
	Sistema solar	SS	812	84
	MGI	MGI	616	70

El valor promedio de iluminancia obtenido a partir de todas las mediciones registradas en la Tabla 11 es de 727.09lx, indicando el nivel medio de iluminación en el laboratorio de Máquinas eléctricas cuando permanecen encendidas sólo ocho de las dieciséis luminarias instaladas.

La Tabla 12 corresponde a los niveles de iluminación obtenidos durante las mediciones realizadas el 8 de agosto de 2025, entre las 19:30 y las 21:00 horas.

Tabla 12. Medición de iluminancia (lx) sin luz de día y luminarias PLEP.

Cuadrante	Área	Nomenclatura	Luxes(Lx)	Altura (cm)
1	Entrada	E1	517	70
		E2	695	70
		E3	956	70
	Transformadores	TR1	585	70

		TR2	359	70
		TR3	310	70
	Registro	R1	1009	96
		R2	1020	70
	Equipo de Pruebas	EP	801	100
	Mesa máquinas I	MM1	906	96
		MM2	927	96
		MM4	936	70
	MG	MG1	864	70
2	Tablero	T1	970	70
		T2	1013	70
		T3	996	70
		T4	800	70
	Pizarrón SEP 1	PS	725	91
	Gabinetes SEP 1	G1	530	91
		G2	496	91
	Mesas SEP I	SE1	871	102
		SE2	1010	102
		SE3	830	102
		SE4	933	102
	MG	MG2	802	70

	MGII	MGII	844	70
	Motor serie	MS	867	70
3	Protecciones (Computadoras)	P1	883	90
		P2	902	90
		P3	892	90
		P4	853	90
		P5	903	90
		P6	906	90
	Protecciones centro	PC	977	70
	Pizarrón Protecciones	PS	598	96
	Protecciones (Gabinete Azul)	G3	749	88
	Protecciones (Gabinete Café)	G4	761	88
	Mesa Máquinas I	MM3	916	96
	Máquina marina	MR1	869	85
		MR2	902	85
	Jaula	J1	426	80
		J2	463	80
		J3	330	80
		J4	182	75

		J5	236	78
	Taller	TL1	256	90
		TL2	372	92
		TL3	455	92
		TL4	157	100
4	Mesa de control	MC	473	95
	Dinamómetro I	DI1	879	70
		DI2	997	70
	Dinamómetro II	DII1	682	70
		DII2	804	70
	Zona dinamómetro	ZD1	912	70
		ZD2	837	70
		ZD3	945	70
		ZD4	910	70
	Sistemas fotovoltaicos	SF1	854	84
		SF2	789	84
	Sistema solar	SS	883	84
	MGI	MGI	836	70

Gracias a las mediciones de iluminancia registradas en la Tabla 12, se obtuvo que el promedio es de 747.75lx cuando las dieciséis luminarias permanecen encendidas y el laboratorio se encuentra únicamente bajo la influencia de luz artificial.

4.5 Registro fotográfico

En este apartado se presenta un registro fotográfico del laboratorio con las luminarias PLEP instaladas, con el objetivo de mostrar el espacio en el que se encuentran en operación el sistema de iluminación con luminarias de haluro metálico.

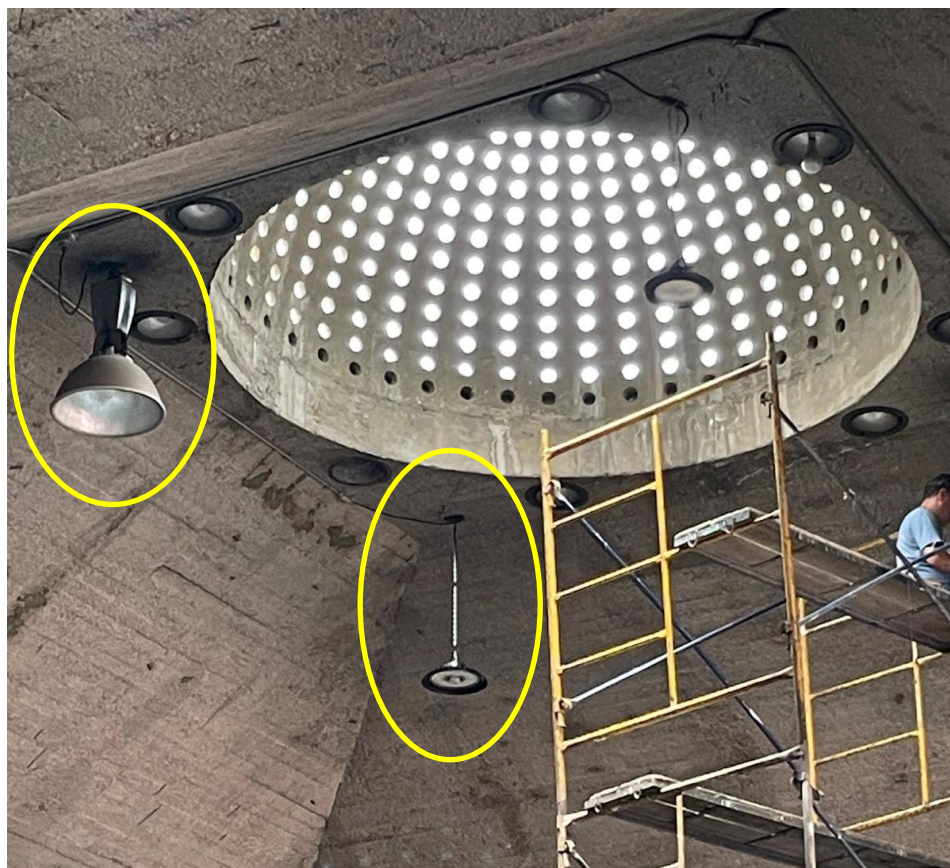


Figura 37. Foto 1 del registro fotográfico de las luminarias PLEP siendo instaladas.



Figura 38. Foto 2 del registro fotográfico de las luminarias PLEP instaladas.

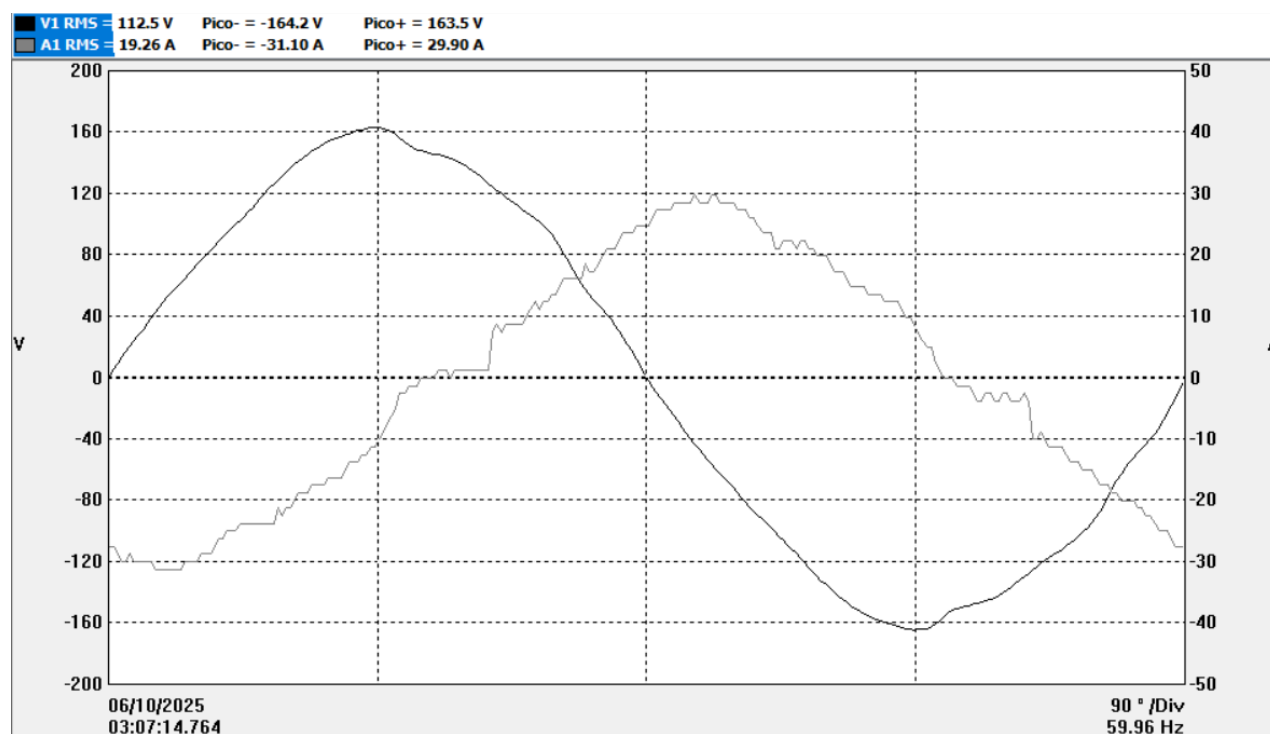


Figura 39. Foto 3 del registro fotográfico de las luminarias PLEP instaladas.

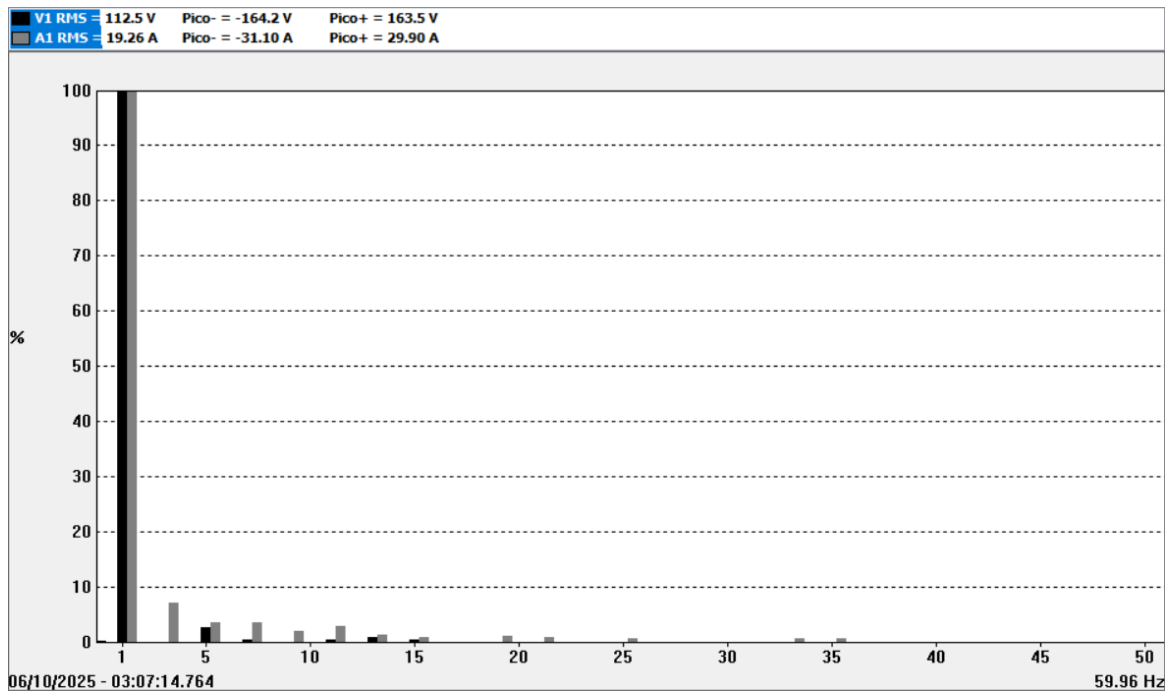
4.6 Calidad de potencia

Con las luminarias PLEP instaladas, las mediciones fueron tomadas en el interruptor número 1 para observar su comportamiento eléctrico y la calidad de la potencia. En la Figura 40 (a), se presentan formas de onda de voltaje y corriente con valores RMS de 113V y 21.55A (representando 2.15A debido al arreglo de vueltas utilizado), respectivamente, con una frecuencia de 59.96Hz.

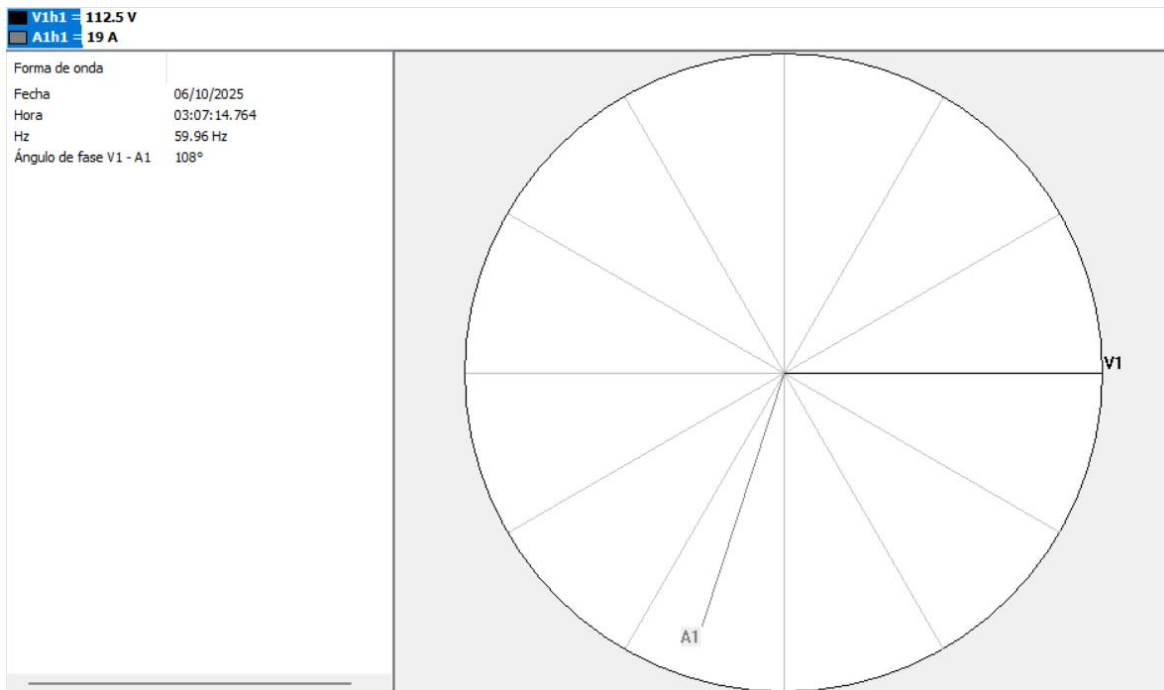
La distorsión armónica de voltaje y de corriente se presenta en la Figura 40 (b), en la cual, no se evidencia la presencia de armónicos de voltaje pares, pero sí de impares (5° , 7° , 11° , 13° y 15°). En el caso de los armónicos de corriente pares, no hay, pero de impares sí se presentan (3° , 5° , 7° , 9° , 11° , 13° , 15° , 19° , 21° , 25° , 33° y 35°). Se exhibe un desfase de 108° entre los fasores de voltaje y corriente como se observa en la Figura 40 (c).



(a)



(b)



(c)

Figura 40. Comportamiento de variables eléctricas en el interruptor termomagnético 1 con luminarias PLEP.

En la Tabla 13 se presentan las potencias activas y reactivas que demandan las luminarias PLEP conectadas al interruptor termomagnético 1, así como su factor de potencia.

Tabla 13. Datos de potencia en el interruptor termomagnético 1 con luminarias PLEP.

W					
(W)	(var)	(VA)	PF	DPF	Tan
783	-2271	2402	0.326	0.33	-2.86

Con el fin de complementar la evaluación de la calidad de la energía, además de la medición monofásica efectuada en el interruptor 1 con las luminarias PLEP, se empleó el analizador AEMC 3945-B para registrar parámetros eléctricos en configuración trifásica. Dichas mediciones abarcaron las 16 luminarias, permitiendo un análisis de todo el sistema de iluminación en condiciones operativas reales.

Las formas de onda de voltaje entre fases de las líneas L1, L2 y L3 se observan en la Figura 41 (a) con valores RMS de 224.6V, 224.8V y 226.1V, respectivamente, con una frecuencia de 60Hz.

En la Figura 41 (b), se presentan formas de onda de corriente A1, A2 y A3 con valores RMS de 12.87A, 15.11A y 9.305A, respectivamente, con una frecuencia de 60Hz.

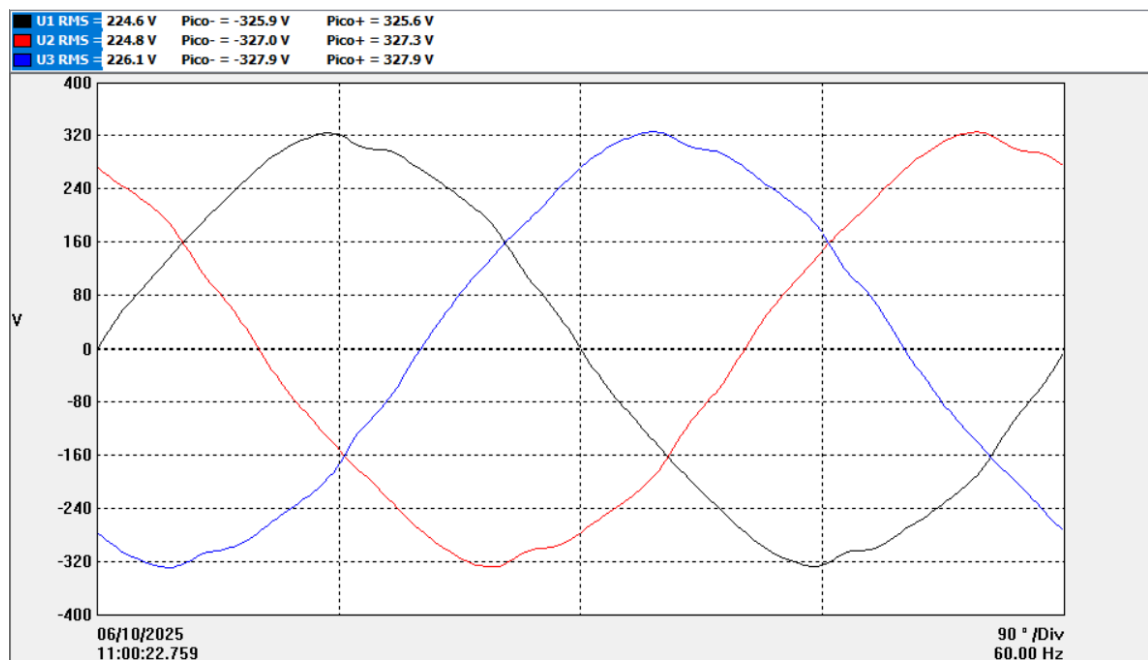
La distorsión armónica de voltaje entre fases y de corriente se presenta en la Figura 41 (c), de la cual, se identificaron los armónicos de voltaje y de corriente pares e impares y se registraron en la Tabla 14 para facilitar su lectura.

Se evidencian desfases de 13°, 58° y 67° entre los fasores de corriente y voltaje de fases A1 - U1, A2 - U2 y A3 - U3, respectivamente, como se observa en la Figura 41 (d).

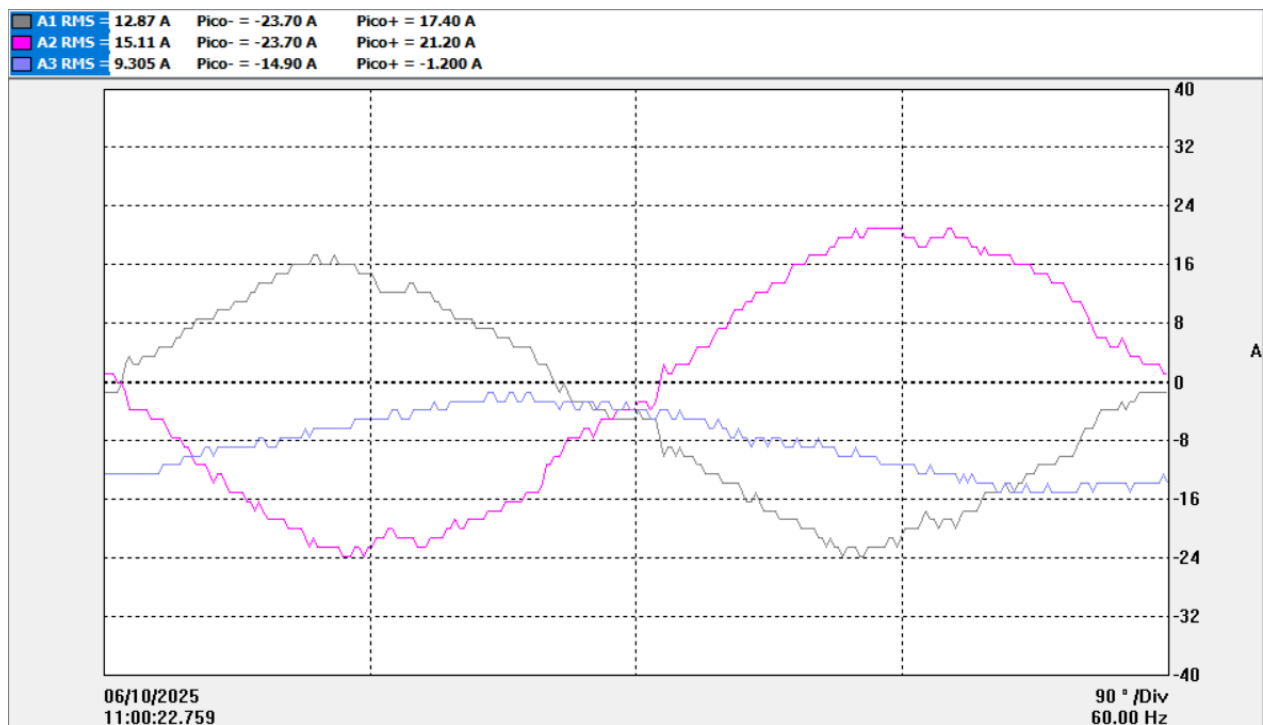
Tabla 14. Registro de la distorsión armónica de voltaje entre fases y de corriente del sistema de iluminación de 16 luminarias.

Canal	Voltaje entre fases	Corriente
-------	---------------------	-----------

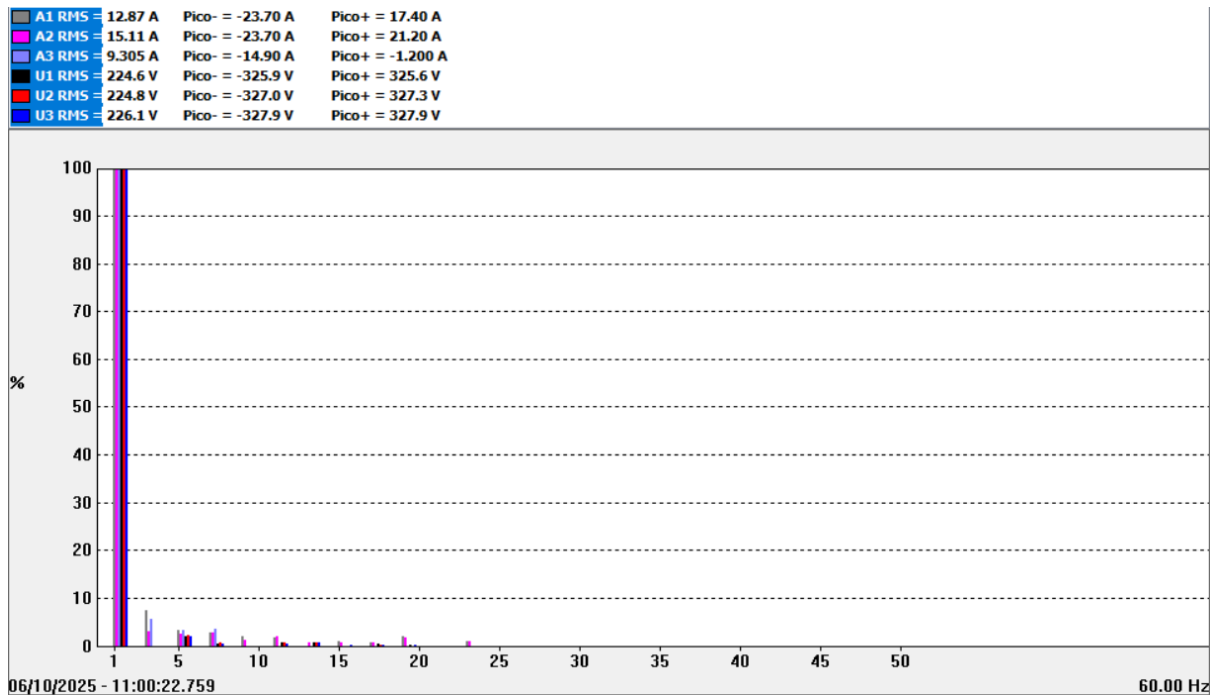
	Par	Impar	Par	Impar
A1	*	*	0	3°, 5°, 7°, 9°, 11°, 15°, 17°, 19° y 23°
A2	*	*	0	3°, 5°, 7°, 9°, 11°, 13°, 15°, 17°, 19° y 23°
A3	*	*	0	3°, 5° y 7°
U1	0	5°, 7°, 11°, 13° y 17°	*	*
U2	0	5°, 7°, 11° y 13°	*	*
U3	0	5°, 7°, 11° y 13° y 19°	*	*



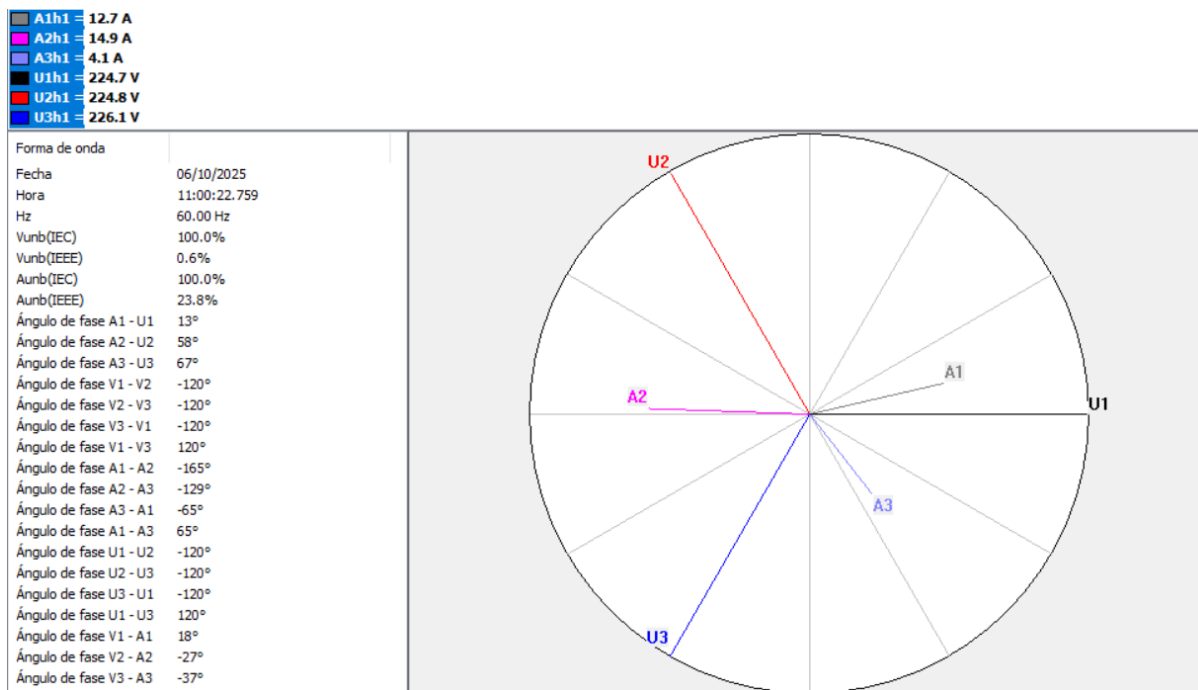
(a)



(b)



(c)



(d)

Figura 41. Comportamiento de variables eléctricas en el sistema de iluminación de 16 luminarias del laboratorio de Máquinas Eléctricas.

En la Tabla 15 se presentan las potencias activas y reactivas que demandan las 16 luminarias PLEP conectadas, así como su factor de potencia.

Tabla 15. Datos de potencia en las 16 luminarias.

W						
Canal	(W)	(var)	(VA)	PF	DPF	Tan
L1	1551	631	1674	0.926	0.95	0.025
L2	1714	-912	1942	0.883	0.886	-0.517
L3	434	-1164	1243	0.349	0.77	-0.776
Total	3699	-1446	4858	0.719	0.868	-0.322

Con la potencia total medida, de 3699W, que demanda el sistema de iluminación del laboratorio, y el valor del área total a iluminar que reportó el programa DIALux Evo en la Figura 33, de $480.57m^2$, se obtiene que la Densidad de Potencia Eléctrica para Alumbrado (DPEA) es de $7.69 W/m^2$.

Capítulo 5. Conclusiones

A partir de la hipótesis planteada, se evaluó si el cambio en el sistema de iluminación generó el incremento esperado en los niveles de iluminancia, el cual se evidencia comparando el promedio de iluminancia de 317lx que se tenía con las luminarias de haluro metálico y el valor de 737lx con las luminarias PLEP.

Los resultados obtenidos demostraron que los niveles de iluminación se incrementaron significativamente con el reemplazo del sistema de luminarias de haluro metálico por luminarias tipo PLEP, pasando de un valor promedio inicial de 335x a 727lx de la Tabla 6 y la Tabla 7, respectivamente.

Además de analizar el comportamiento de las nuevas luminarias y su distribución dentro del espacio a partir del modelado en DIALux Evo, los resultados del reporte generado mostraron una alta correspondencia con los medidos experimentalmente con el luxómetro, permitiendo que se confirme, por medio de ambos métodos, que la iluminación es la adecuada.

Aunque los niveles de iluminancia obtenidos en la simulación de DIALux Evo discrepan de los medidos con el luxómetro, estos son muy cercanos considerando que en el laboratorio hay mucho mobiliario que por su altura o ubicación genera sombras que no fueron consideradas en la simulación debido a las estructuras complidas de replicar: Pese a lo anterior, la implementación del nuevo sistema de iluminación permitió que nivel de iluminancia superara el mínimo establecido por la norma NOM-025-STPS-2008 de 500lx para laboratorios, garantizando óptima calidad visual en el espacio de trabajo.

Así como se observa en el capítulo 4, el consumo de energía eléctrica disminuyó de 998W a 783W, de acuerdo con la Tabla 13, evidenciando que el de las luminarias PLEP permanece por debajo del consumo que se tenía cuando se encontraban instaladas las luminarias de haluro metálico, aun cuando estas últimas proporcionaban un nivel de iluminancia mucho menor al requerido por la norma.

Se evidencia también que con la tecnología anterior la forma de onda de corriente (ver Figura 22 (a)) tiene mayor distorsión y menor forma sinusoidal con respecto a la forma de onda de corriente de la Figura 40 (a) que corresponde a las luminarias PLEP.

En las luminarias de haluro metálico se registraron armónicos pares e impares (ver Figura 22 (b)) debido a la distorsión asimétrica generada por sus balastos, los cuales, por su naturaleza electromagnética y envejecimiento, introducen desequilibrios en la forma de onda (Arrillaga, J. y Watson, N.R., 2003). Tras su sustitución por luminarias PLEP, las mediciones mostraron únicamente armónicos impares (ver Figura 40 (b)), es decir, se trata únicamente de distorsión simétrica. La ausencia de armónicos pares evidencia una mejora en la calidad de energía, con la comparación de ambos casos.

Con el fin de buscar el aprovechamiento máximo de la energía eléctrica mediante establecer valores límite de Densidad de Potencia Eléctrica de Alumbrado (DPEA), sin afectar el confort visual y psicofisiológico de los usuarios (Secretaría de Energía, 2014), se comprobó que el sistema de iluminación propuesto cumple en el ámbito de eficiencia energética con la norma pues el valor calculado es menor al máximo permitido por la norma. El reporte generado en DIALux registró que el valor de estimación de energía se encuentra muy por debajo del límite máximo, indicando que las luminarias PLEP no solo proporcionan niveles de iluminación adecuados, sino que además garantizan un uso eficiente de la energía eléctrica.

5.1 Trabajos futuros

Gracias al trabajo realizado, se propone continuar con el cambio de luminarias que encuentran instaladas a lo largo del sótano del Edificio D, pues en su mayoría son luminarias de haluro metálico en decadencia con un consumo probablemente igual al día de su instalación.

De igual forma, se identifica la necesidad de mejorar el nivel de deslumbramiento y de uniformidad con un estudio más profundo en cuanto a los materiales del mobiliario, y sus

colores, la disposición de las luminarias, y las sombras generadas en el laboratorio de Máquinas Eléctricas. Las oportunidades de mejora se pueden abordar desde una perspectiva más eléctrica en trabajos futuros, sin dejar de lado el estudio lumínico, con el objetivo de perfeccionar el diseño del sistema de iluminación y maximizar la eficiencia energética del sistema.

Referencias y bibliografía

AEMC. (s.f.). Manual de instrucciones. Consultado el 3 de noviembre de 2025.
https://www.aemc.com/userfiles/files/resources/usermanuals/Power-Meters-Loggers/3945-B_ES.pdf

Asociación de Normalización y Certificación. (2011). Iluminación – Lámparas Incandescentes de Filamento Metálico Para Alumbrado General – Especificaciones y Métodos de Prueba. Cancela a la NMX-J-019-ANCE-2006. (NMX-J-019-ANCE-2011). Recuperado de
<https://www.ance.org.mx/NormalizacionOnLine/DocsOnn/Documentos/DOC-26042021122928027.pdf>

Arrillaga, J. & Watson N.R. (2003). Power system harmonic (2nd ed.). John Wiley & Sons Ltd; England.
<https://ia903101.us.archive.org/28/items/PowerSystemHarmonicsSecondEditionByJArrillagaAndNRWatson/Power%20System%20Harmonics%20Second%20Edition%20By%20J%20Arrillaga%20and%20N%20R%20Watson.pdf>

Basanta, J., Suárez, J. & Vila, L. (2014). Iluminación exterior, LED, inducción y plasma.

Blom, P.W.M., & De Jong, M.J.M. (1998). Electrical characterization of polymer light-emitting diodes. IEEE Journal of selected Topics in Quantum Electronics. Vol. 4. Recuperado de
https://www.researchgate.net/publication/3408755_Electrical_characterization_of_polymer_light-emitting_diodes

De la Peña, L. (2018). La naturaleza de la luz. Revista Digital Universitaria, Vol. 19, Núm. 3. https://www.revista.unam.mx/wp-content/uploads/v19_n3_a1-Luis-de-la-Pen%CC%83a.pdf

IESNA. (2000). The IESNA lighting handbook: Reference & application. 9th Edition.

Iluminet. (2014). ¿Qué son y cómo funcionan las lámparas de plasma? Revista digital. Consultado el 28 de septiembre de 2025 de: <https://iluminet.com/iluminacion-plasma/>

Fundación de la Energía de la Comunidad de Madrid. (2015). Guía sobre tecnología. LED en el alumbrado. BOCM, M-16865-2015. <https://iluminet.com/newpress/wp-content/uploads/2018/07/Guia-sobre-Tecnologia-LED-en-el-Alumbrado-fenercom-2015.pdf>

Kyoritsu Electrical Instruments Works. (2024). Light meter model 5202. Consultado el 3 de noviembre de 2025. <https://www.kew-ltd.co.jp/en/products/detail/00968/>

Montalvo Arenas, C.E. (2010). Óptica. Recursos Digitales del Departamento de Biología Celular y Tisular. Facultad de Medicina, UNAM; Departamento de Biología Celular y Tisular, UNAM. Recuperado de <https://recursoseducativos.unam.mx/handle/123456789/20482>

OSRAM. (s.f.). Guide to metal halide lamps. Consultado el 20 de octubre de 2025.
https://cdn.isicloud.net/warshauers/Resources/Ledvance-OsramSylvania_00001_108_114_128_CAT.pdf

OSRAM. (s.f.). Metal halide lamps. Instructions for the use and application. Consultado el 20 de octubre de 2025. https://www.ledvance.com/00_Free_To_Use/asset-300284_Metal_halide_lamps_Application_guide_V1.pdf

PLEP. (s.f.). PLEP. La luz solar a tu alcance. Consultado el 21 de octubre de 2025.
<https://rseguridad.com/plep/>

Ministerio de Minas y Energía. (2024). Libro 3. Instalaciones de sistemas de iluminación. Reglamento técnico de iluminación y alambrado público (RETILAP).
https://www.minenergia.gov.co/documents/11687/03_Libro_3_RETILAP_2024_Rev_Final_WEB.pdf

Rodríguez, E. (2009). Automatización de un tubo de Kundt para la enseñanza en el bachillerato [Tesis de pregrado, Facultad de Ingeniería, UNAM]. Repositorio Institucional
<http://132.248.52.100:8080/xmlui/handle/132.248.52.100/616>

Secretaría de Energía. (2013). NOM-013-ENER-2013: Eficiencia energética para sistemas de alumbrado en vialidades. Recuperado de
https://www.dof.gob.mx/nota_detalle.php?codigo=5302568&fecha=14/06/2013#gsc.tab=0 (Fecha de acceso: 30 de agosto de 2020)

Secretaría de Energía. (2014). NOM-007-ENER-2014: Eficiencia energética para sistemas de alumbrado en edificios no residenciales. Recuperado de https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/181647/NOM_007_ENER_2014.pdf (Fecha de acceso: 30 de agosto de 2020)

Secretaría de Energía. (2017). NOM-028-ENER-2017: Eficiencia energética de lámparas para uso general. Límites y métodos de prueba. Recuperado de https://www.dof.gob.mx/normasOficiales/7027/sener11_C/sener11_C.html (Fecha de acceso: 30 de agosto de 2020)

Secretaria de Trabajo y Previsión Social (STPS). (2008). NOM-025-STPS-2008: Condiciones de iluminación en los centros de trabajo. Ciudad de México: STPS. Recuperado de <https://asinom.stps.gob.mx/upload/noms/Nom-025.pdf> (Fecha de acceso: 30 de agosto de 2020)

SIST. (2021). SLOVENSKI Standard Sist EN 12464-1:2021. <https://cdn.standards.iteh.ai/samples/61880/2af593c08198411988c1571e5046f45e/SIST-EN-12464-1-2021.pdf>

Zumtobel. (2013) The lighting handbook. 4th Edition. <https://www.hiteco-team.sk/uploads/files/Lichthandbuch.pdf>