

 Institución Universitaria Reacreditada en Alta Calidad	INFORME FINAL TRABAJO DE GRADO ESPECIALIZACIÓN TIPO ARTÍCULO DEPARTAMENTO DE MECATRÓNICA Y ELECTROMECAÁNICA	Código	FDE 283
		Versión	01
		Fecha	14-10-2025

Análisis técnico–económico para la automatización del sistema de iluminación en los parqueaderos de un centro comercial

Technical and economic analysis for the automation of the lighting system in the parking lots of a shopping center

Edinson Chaverra Villarreal¹, Daniel Hincapié Baena², María Vilma García Buitrago³,

Resumen

El presente trabajo realizó un análisis técnico–económico para la automatización del sistema de iluminación en los parqueaderos de un centro comercial, con el propósito de reducir el consumo energético y mejorar la eficiencia operativa sin afectar las condiciones de seguridad y visibilidad exigidas por la normativa vigente. Inicialmente, se llevó a cabo un diagnóstico del sistema de iluminación existente, identificando las características de operación, la infraestructura instalada, la distribución de luminarias y los niveles de consumo energético asociados al funcionamiento continuo del sistema. Posteriormente, se diseñó una propuesta de automatización basada en tecnología KNX y controladores DALI, integrando sensores de ocupación y una plataforma de supervisión centralizada para regular dinámicamente los niveles de iluminación según la presencia de usuarios y las condiciones operativas de cada zona del estacionamiento. A partir de los datos recopilados, se desarrolló un análisis energético y financiero considerando el consumo actual, el escenario proyectado de ahorro, los costos de implementación, operación y mantenimiento del sistema. Los resultados mostraron una reducción energética proyectada cercana al 31,1 %, permitiendo disminuir significativamente los costos asociados al consumo eléctrico y alcanzando un periodo estimado de recuperación de la inversión inferior a tres años. Finalmente, se concluye que la automatización del sistema de iluminación representa una alternativa técnica y económicamente viable porque a partir de los resultados VPN (65, 89 MCOP) se demuestra la viabilidad de las implementaciones, siendo capaz de mejorar la sostenibilidad energética del complejo comercial, optimizar la operación del sistema y garantizar el cumplimiento de los requisitos normativos de iluminación y seguridad.

Palabras clave

Automatización de iluminación, eficiencia energética, sensores de ocupación, sistema KNX, control DALI, parqueaderos inteligentes.

Abstract

This study carried out a technical and economic analysis for the automation of the lighting system in the parking areas of a shopping center, with the aim of reducing energy consumption and improving operational efficiency without affecting the safety and visibility conditions required by current regulations. Initially, a diagnosis of the existing lighting system was conducted, identifying the operating characteristics, installed infrastructure, luminaire distribution, and energy consumption associated with the continuous operation of the system. Subsequently, an automation proposal based on KNX technology and DALI controllers was designed, integrating occupancy sensors and a centralized monitoring platform to dynamically regulate lighting levels according to user presence and the operational conditions of each parking area. Based on the collected data, an energy and financial analysis was developed considering current consumption, the projected savings scenario, and the implementation, operation, and maintenance costs of the system. The results showed a projected energy reduction of approximately 38.4%, significantly decreasing electricity

¹ ITM, Medellín-Colombia, edinsonchaverra1127860@correo.itm.edu.co; <https://orcid.org/0009-0006-8182-060X>

² ITM, Medellín-Colombia, danielhincapie8556@correo.itm.edu.co; ORCID:0000-0001-9802-0621

³ ITM, Medellín-Colombia, mariagarcia86910@correo.itm.edu.co; ORCID:0000-0002-7943-2636

	INFORME FINAL TRABAJO DE GRADO ESPECIALIZACIÓN TIPO ARTÍCULO DEPARTAMENTO DE MECATRÓNICA Y ELECTROMECAÁNICA	Código	FDE 283
		Versión	01
		Fecha	14-10-2025

consumption costs and achieving an estimated investment payback period of less than three years. Finally, it is concluded that the automation of the lighting system represents a technically and economically viable alternative, capable of improving the energy sustainability of the shopping complex, optimizing system operation, and ensuring compliance with lighting and safety regulatory requirements.

Keywords

Lighting automation, energy efficiency, occupancy sensors, KNX system, DALI control, smart parking systems.

NOMENCLATURA

BEMS: Sistema de gestión de energía en edificios.

CCTV: Circuito cerrado de televisión.

CO₂: Dióxido de carbono.

DALI: Interfaz de iluminación digital direccionable.

Ē_m: Establece la iluminancia media (promedio mantenido).

HVAC: Calefacción, ventilación y aire acondicionado.

LED: Diodo emisor de luz.

R_a: Establece los índices mínimos de reproducción cromática.

Retie: Reglamento técnico de instalaciones eléctricas.

Retilap: Reglamento técnico de iluminación y alumbrado público.

UGRL: Proporciona el límite máximo de deslumbramiento.

TIR: Tasa interna de retorno.

U_o: Establece la uniformidad de iluminancia mínimo sobre la superficie de cálculo.

VPN: Valor presente neto.

WSN: Redes de sensores inalámbricos.

1. INTRODUCCIÓN

Los parqueaderos de los centros comerciales representan áreas de operación continua que requieren sistemas de iluminación confiables para garantizar condiciones adecuadas de seguridad, visibilidad y circulación de vehículos y peatones. Debido a estas exigencias, la iluminación suele permanecer encendida durante amplios periodos de tiempo, independientemente del nivel real de ocupación, lo que conlleva a un consumo energético elevado y a un uso ineficiente de los recursos disponibles.

En muchos centros comerciales, los sistemas de iluminación de parqueaderos operan bajo esquemas convencionales de encendido permanente o por franjas horarias fijas, sin considerar variables como la ocupación, la luz natural disponible o las condiciones específicas de operación. Esta forma de funcionamiento limita la posibilidad de implementar estrategias de ahorro energético y dificulta el control eficiente de la infraestructura, generando sobrecostos asociados al consumo eléctrico y al mantenimiento de los equipos.

El consumo energético en edificios representa una proporción significativa a nivel global, alcanzando aproximadamente el 40 % de la energía total y cerca del 30 % de las emisiones de CO₂ asociadas (Baharudin et al., 2021; Wagiman, Abdullah, Hassan, Mohammad Radzi, et al., 2020). Dentro de este contexto, la iluminación constituye uno de los principales usos finales de energía, con participaciones que oscilan entre el 17 % en edificios comerciales y hasta el 45 % en edificios de oficinas, dependiendo del tipo de uso, condiciones operativas y estrategias de control implementadas (Jin et al., n.d.; Wagiman, Abdullah, Hassan,

	INFORME FINAL TRABAJO DE GRADO ESPECIALIZACIÓN TIPO ARTÍCULO DEPARTAMENTO DE MECATRÓNICA Y ELECTROMECAÁNICA		Código	FDE 283
			Versión	01
			Fecha	14-10-2025

& Radzi, 2020). En algunos casos específicos, la iluminación puede alcanzar incluso valores cercanos al 40 % del consumo total, lo que evidencia su alto potencial de optimización energética (Haq et al., 2014).

Adicionalmente, la modernización de estos sistemas se enfrenta a restricciones técnicas y normativas relacionadas con los niveles mínimos de iluminación exigidos para garantizar la seguridad de los usuarios, así como con los criterios de confiabilidad y continuidad del servicio. Esto implica que cualquier propuesta de automatización debe contemplar no solo la reducción del consumo energético, sino también el cumplimiento de los estándares de iluminación Retilap y las condiciones de operación propias de este tipo de espacios.

Desde el punto de vista económico, la inversión requerida para implementar sistemas de automatización puede representar una barrera para su adopción si no se cuenta con un análisis que permita demostrar su viabilidad financiera. La ausencia de estudios técnico-económicos que integren el diagnóstico del sistema actual, la formulación de alternativas de control y la evaluación de los beneficios energéticos y económicos limita la toma de decisiones informadas por parte de los administradores de este tipo de infraestructuras.

Diversos estudios han demostrado que la implementación de estrategias de control inteligente permite reducir significativamente el consumo energético asociado a la iluminación. En este sentido, los sistemas basados en sensores de ocupación han mostrado reducciones del orden del 25 % al 45 %, mientras que tecnologías más avanzadas, como el control combinado de ocupación, regulación de intensidad (*dimming*) y aprovechamiento de luz natural, pueden alcanzar ahorros de hasta el 72 % (Chaudhari et al., 2024; Wagiman, Abdullah, Hassan, Mohammad Radzi, et al., 2020). Asimismo, la sustitución de tecnologías tradicionales por iluminación LED puede generar reducciones de hasta el 60 % del consumo energético, consolidándose como una de las estrategias más efectivas en procesos de modernización (Al-Ghaili et al., 2020).

En cuanto a casos de éxito, diferentes investigaciones han validado la efectividad de sistemas inteligentes de iluminación en entornos reales. Cheng et al. (2020) desarrollaron un sistema basado en redes inalámbricas de sensores (WSN) que logró ahorros energéticos de aproximadamente 36 % en oficinas y hasta 45 % en estaciones de metro, evidenciando la aplicabilidad de soluciones distribuidas en escenarios reales. De manera similar, Jin et al. (n.d.) propusieron un modelo de control predictivo basado en redes neuronales, logrando reducciones de errores de apagado cercanas al 99 % y ahorros energéticos de hasta el 60 %, lo que demuestra el potencial de la inteligencia artificial en la optimización de sistemas de iluminación.

Por otro lado, el uso de tecnologías emergentes como la visión artificial también ha mostrado resultados prometedores. Gala et al. (2024) desarrollaron un sistema basado en cámaras CCTV y algoritmos de detección que permite identificar condiciones de consumo ineficiente, logrando reducciones potenciales de hasta el 30 % mediante el control basado en ocupación. Estos resultados refuerzan la tendencia hacia el uso de infraestructura existente para la implementación de soluciones de eficiencia energética sin requerir inversiones adicionales significativas.

Desde una perspectiva más amplia, la literatura coincide en que la detección de ocupación es un factor clave en la gestión energética de edificios. Trivedi & Badarla (2020) destacan que la información de ocupación permite optimizar sistemas como iluminación, HVAC y ventilación, mejorando simultáneamente la eficiencia energética y el confort del usuario. En este sentido, los sistemas basados en Internet de las Cosas (IoT) han adquirido gran relevancia, ya que permiten integrar sensores, plataformas de análisis y sistemas

	INFORME FINAL TRABAJO DE GRADO ESPECIALIZACIÓN TIPO ARTÍCULO DEPARTAMENTO DE MECATRÓNICA Y ELECTROMECAÁNICA		Código	FDE 283
			Versión	01
			Fecha	14-10-2025

de control para una gestión energética inteligente. Chaudhari et al. (2024) señalan que estos sistemas pueden lograr reducciones de hasta el 30 % en el consumo energético total de edificios comerciales.

Adicionalmente, la integración de tecnologías IoT con sistemas de gestión energética en edificios (BEMS) ha permitido avanzar hacia modelos de automatización más eficientes. Baharudin et al., 2021 indican que estos sistemas pueden generar ahorros superiores al 50 % en iluminación mediante el uso de estrategias de control automatizado, mientras que otros estudios destacan la importancia de combinar múltiples variables como ocupación, luz natural y comportamiento del usuario para maximizar la eficiencia energética (Al-Ghaili et al., 2020; Wagiman, Abdullah, Hassan, Mohammad Radzi, et al., 2020).

En este contexto, las técnicas de control de iluminación han evolucionado desde sistemas manuales hacia soluciones inteligentes basadas en optimización, aprendizaje automático y control distribuido. Wagiman, Abdullah, Hassan, Mohammad Radzi, et al., 2020 destacan que más del 50 % de los estudios recientes utilizan técnicas de optimización, las cuales permiten resolver problemas multiobjetivo relacionados con consumo energético y confort visual. Asimismo, la fusión de sensores (sensor fusión) ha demostrado mejorar la precisión de los sistemas de detección de ocupación, superando las limitaciones de tecnologías individuales (Trivedi & Badarla, 2020).

Un aspecto fundamental en el diseño e implementación de sistemas de iluminación eficientes es el cumplimiento de normativas nacionales e internacionales, las cuales establecen criterios mínimos de seguridad, eficiencia energética y calidad de iluminación. En el contexto colombiano, regulaciones como el RETIE (Reglamento Técnico de Instalaciones Eléctricas) y el RETILAP (Reglamento Técnico de Iluminación y Alumbrado Público) definen requisitos específicos sobre niveles de iluminancia, eficiencia energética y condiciones de operación en espacios como parqueaderos. Ministerio De Minas Y Energía (2024) (Ministerio De Minas Y Energía, 2024).

A nivel internacional, estándares como ISO 50001 (gestión de la energía) y normativas de iluminación como IES y EN 12464-1 proporcionan lineamientos para garantizar tanto la eficiencia energética como el confort visual de los usuarios. En relación con la temática del presente artículo, enfocada en la automatización del sistema de iluminación en parqueaderos, los estudios revisados evidencian que este tipo de espacios presenta un alto potencial de ahorro energético debido a sus características de ocupación variable y baja permanencia de usuarios.

La implementación de sensores de ocupación, sistemas de control automático y tecnologías como DALI o BEMS permite adaptar los niveles de iluminación en función de la demanda real, reduciendo significativamente el consumo energético sin comprometer la seguridad ni el confort visual, y cumpliendo simultáneamente con los requisitos normativos vigentes.

Los altos costos de energía eléctrica facturados por operación continua de sistema de iluminación representan un problema para los centros comerciales, siendo así los sistemas de iluminación para parqueaderos en centros comerciales típicamente presentan un modo de operación convencional que consta de iluminación permanente incluso ante la ausencia de personas y vehículos o cuando está fuera de servicio, lo que representa un consumo energético adicional considerando que es prioridad la seguridad del establecimiento; sin embargo hay proyectos como la terminal de transporte del sur de Medellín que han demostrado que mediante la automatización de la intensidad de la iluminación en función de la frecuencia y el uso de los parqueaderos, apoyado en la norma Retilap capítulo 4, se pueden generar ahorros energéticos y económicos sin poner en riesgo la seguridad.

	INFORME FINAL TRABAJO DE GRADO ESPECIALIZACIÓN TIPO ARTÍCULO DEPARTAMENTO DE MECATRÓNICA Y ELECTROMECAÁNICA	Código	FDE 283
		Versión	01
		Fecha	14-10-2025

El presente trabajo busca analizar de manera técnica y económica la oportunidad de automatizar el sistema de iluminación en los parqueaderos de un centro comercial, teniendo en cuenta sus condiciones de operación, aspectos de seguridad y normativos; con el propósito de reducir el consumo energético, mejorar la eficiencia operativa y permitir ahorros económicos que brinden viabilidad para la recuperación de la inversión. Para ello se debe revisar el estado actual de la infraestructura y del modo de operación del sistema de iluminación, se debe estructurar una alternativa de automatización técnicamente viable teniendo en cuenta aspectos de seguridad y normativos, para finalmente realizar un estudio económico de la implementación basado en la reducción de consumo energético y empleando indicadores clave que viabilicen el proyecto.

2. METODOLOGÍA

La metodología de la investigación se desarrolló mediante un enfoque técnico–económico orientado al análisis y diseño de un sistema automatizado de iluminación para los parqueaderos de un centro comercial. Inicialmente, se realizó un diagnóstico del sistema de iluminación existente mediante visitas técnicas de inspección, observación directa y recopilación de información suministrada por el propietario del complejo comercial. Durante esta etapa se efectuó el conteo de luminarias, identificación de características técnicas de los equipos instalados, medición de áreas y análisis del modo de operación actual del sistema de iluminación. Asimismo, se recolectaron datos relacionados con potencia instalada, cantidad de celdas de parqueo, distribución por niveles y condiciones de operación del sistema.

Posteriormente, se desarrolló un análisis energético considerando la potencia instalada total y el tiempo de operación continuo de 24 horas, con el fin de estimar consumos energéticos semanales, mensuales y anuales expresados en kWh. Para ello, se emplearon medidas eléctricas como potencia en watts (W), energía en kilovatios-hora (kWh), iluminancia media en lux (lx) y parámetros normativos establecidos por el RETILAP, tales como uniformidad (U_o), índice de reproducción cromática (R_a) y control de deslumbramiento (UGRL). Además, se verificaron los niveles de iluminancia existentes mediante mediciones en las diferentes zonas de circulación y estacionamiento del parqueadero.

En la fase de diseño, se estructuró una propuesta de automatización basada en tecnología KNX y controladores DALI, integrando sensores de ocupación y sistemas de supervisión centralizada. Para la selección de los dispositivos y estrategias de control se consideraron variables como ocupación de las zonas, requerimientos normativos, condiciones de seguridad y potencial de ahorro energético. El sistema fue planteado bajo estrategias de control automático por ocupación y zonificación, permitiendo regular dinámicamente los niveles de iluminación según la demanda real de uso del parqueadero.

Finalmente, se efectuó una evaluación económica mediante el análisis de costos de implementación, operación y mantenimiento del sistema automatizado, comparando el escenario actual frente al escenario propuesto de ahorro energético. Para determinar la viabilidad financiera del proyecto se emplearon indicadores como el Valor Presente Neto (VPN), la Tasa Interna de Retorno (TIR) y el periodo de recuperación de la inversión. Los cálculos y análisis se desarrollaron utilizando herramientas computacionales para la organización, procesamiento y representación gráfica de la información técnica y energética recopilada durante el estudio.

3. RESULTADOS

	INFORME FINAL TRABAJO DE GRADO ESPECIALIZACIÓN TIPO ARTÍCULO DEPARTAMENTO DE MECATRÓNICA Y ELECTROMECAÁNICA	Código	FDE 283
		Versión	01
		Fecha	14-10-2025

La presente sección expone los principales resultados obtenidos durante el desarrollo del análisis técnico–económico para la automatización del sistema de iluminación en los parqueaderos del centro comercial. Los resultados se estructuran de acuerdo con los objetivos específicos planteados en la investigación, permitiendo evidenciar el proceso de diagnóstico, diseño y evaluación financiera del sistema propuesto. Inicialmente, se presentan los hallazgos derivados del diagnóstico técnico y energético de la infraestructura existente, incluyendo la caracterización del sistema de iluminación, distribución de luminarias, niveles de iluminancia y consumo energético asociado a la operación continua de los parqueaderos. Posteriormente, se describen los resultados obtenidos en el planteamiento y diseño del sistema de automatización basado en tecnología KNX y control DALI, integrando sensores de ocupación y estrategias de regulación inteligente de iluminación.

Finalmente, se desarrolla el análisis energético y financiero del escenario proyectado, evaluando los ahorros energéticos obtenidos, el comportamiento de los indicadores económicos y la viabilidad técnica, operativa y económica del sistema propuesto. Para facilitar la interpretación de los resultados, se emplean tablas, figuras y gráficas comparativas que permiten visualizar las variaciones, tendencias y mejoras alcanzadas mediante la implementación de las estrategias de automatización.

3.1 Diagnóstico técnico y análisis energético del sistema de iluminación existente

Ubicado en el sector norte del Valle de Aburrá, en el municipio de Bello y con conexión directa a los principales corredores viales y al sistema de transporte metropolitano de Medellín, este complejo comercial se consolida como uno de los polos urbanos más relevantes de la zona norte del área metropolitana. El proyecto cuenta con un área construida aproximada de 120.000 a 130.000 m², distribuida en varios niveles que integran comercio, entretenimiento, servicios y zonas gastronómicas.

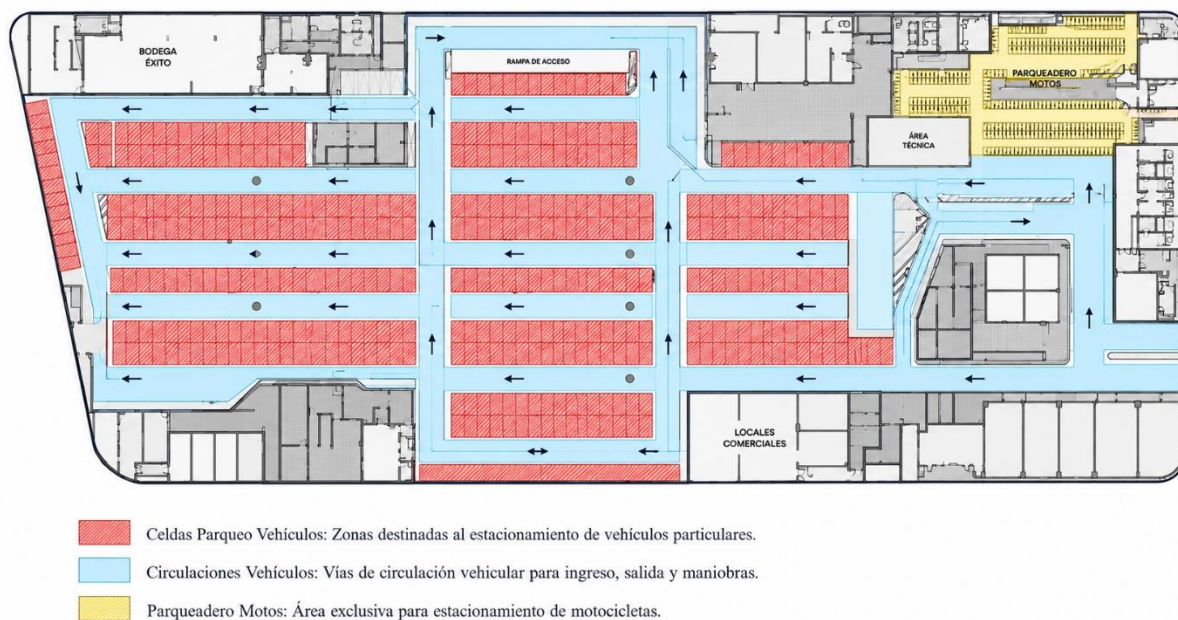
Esta magnitud lo posiciona como un equipamiento de gran escala, capaz de atender una alta demanda de usuarios y de dinamizar significativamente la actividad económica del sector. Dentro de su configuración, los parqueaderos juegan un papel esencial. El complejo dispone de una amplia capacidad de estacionamiento distribuida en sótanos y niveles superiores, diseñada para soportar el flujo constante de visitantes. Así, el sistema de parqueaderos no solo responde a una necesidad funcional, sino que se convierte en un elemento estratégico que garantiza la operación eficiente del complejo y mejora la experiencia integral de quienes lo visitan.

En la Figura 1 se puede observar cómo está distribuido el sótano 1 con el propósito de identificar las zonas y actividades que se realizan en el parqueadero interno del centro comercial, cabe destacar que la distribución es similar en las otras zonas.

Figura 1

Distribución de zonas en el sótano 1.

	INFORME FINAL TRABAJO DE GRADO ESPECIALIZACIÓN TIPO ARTÍCULO DEPARTAMENTO DE MECATRÓNICA Y ELECTROMECAÁNICA	Código	FDE 283
		Versión	01
		Fecha	14-10-2025



Nota: Imagen elaborada por los autores con herramienta IA (GPT-5.2) y planos suministrados por el cliente.

En la Figura 2 se puede observar cómo están distribuidos los pisos superiores con el propósito de identificar las zonas y actividades que se realizan en el parqueadero interno del centro comercial.

Figura 2

Distribución de zonas en los pisos superiores.

	INFORME FINAL TRABAJO DE GRADO ESPECIALIZACIÓN TIPO ARTÍCULO DEPARTAMENTO DE MECATRÓNICA Y ELECTROMECAÁNICA		Código	FDE 283
			Versión	01
			Fecha	14-10-2025



- Celdas Parqueo Vehículos: Zonas destinadas al estacionamiento de vehículos particulares.
- Circulaciones Vehículos: Vías de circulación vehicular para ingreso, salida y maniobras.

Nota: Imagen elaborada por los autores con herramienta IA (GPT-5.2) y planos suministrados por el cliente.

La norma Retilap en su libro 3 establece unos requisitos mínimos específicos en los en los parqueaderos interiores se deben garantizar condiciones adecuadas de visibilidad y seguridad mediante niveles mínimos de iluminación. En este sentido, se establece que la iluminancia mantenida ($\bar{E}_m$) debe estar típicamente entre 50 y 150 lux en las zonas de circulación y estacionamiento, asegurando que la luz disponible sea suficiente para la correcta percepción del entorno. Asimismo, se exige una uniformidad (U_o) mínima de 0,25, con el fin de evitar contrastes marcados entre áreas iluminadas y zonas oscuras que puedan afectar la conducción y el desplazamiento peatonal. En cuanto al deslumbramiento (UGRL), aunque no se fija un valor único como en otros espacios interiores, el reglamento indica que este debe ser controlado mediante una adecuada selección y disposición de luminarias, evitando efectos que incomoden o dificulten la visión de los usuarios. Finalmente, se enfatiza que estos niveles deben mantenerse en el tiempo y que cualquier sistema de control de iluminación no debe reducirlos por debajo de los valores exigidos durante la operación del parqueadero (Ministerio De Minas Y Energía, 2024).

En la tabla 1 se pueden validar los niveles estipulados por la norma Retilap se deben cumplir para las actividades realizadas en los parqueaderos interiores, además se muestra un promedio de iluminancia media medido actualmente en el parqueadero.

Tabla 1.

Niveles normativos para actividades o áreas en parqueaderos interiores

	INFORME FINAL TRABAJO DE GRADO ESPECIALIZACIÓN TIPO ARTÍCULO DEPARTAMENTO DE MECATRÓNICA Y ELECTROMECAÁNICA				Código	FDE 283
					Versión	01
					Fecha	14-10-2025

Ref.	Tipo de tarea o área de actividad	Ēm (Lx)	Uo	Ra	UGRL	Requisitos específicos	Ēm (Lx) (*Actuales)
34,2	Rampas de entrada/salida (por la noche)	75	0.4	40	25	1. Iluminancias a nivel del piso.	136
34,3	Carriles de circulación de vehículos, rampas internas y sendas peatonales adyacentes a los carriles de circulación vehicular	75	0.4	40	25	1. Iluminancias a nivel del suelo. 2. Una alta iluminancia vertical aumenta el reconocimiento de los rostros de las personas y la sensación de seguridad.	165
34,4	Áreas de estacionamiento – no abiertas al público	75	0.25	40	-	1. Iluminancias a nivel del suelo. 2. Una alta iluminancia vertical aumenta el reconocimiento de los rostros de las personas y la sensación de seguridad.	135
34,5	Áreas de estacionamiento abiertas al público con gran	150	0.4	40	-	1. Iluminancias a nivel del suelo. 2. Una alta iluminancia vertical aumenta el	189

	INFORME FINAL TRABAJO DE GRADO ESPECIALIZACIÓN TIPO ARTÍCULO DEPARTAMENTO DE MECATRÓNICA Y ELECTROMECAÁNICA	Código	FDE 283
		Versión	01
		Fecha	14-10-2025

número de usuarios	reconocimiento de los rostros de las personas y la sensación de seguridad.
--------------------	--

Nota: (Ministerio De Minas Y Energía, 2024)

Nota: Uo, Ra y UGRL son características que se deben cumplir y validar en el diseño, teniendo en cuenta que la instalación fue certificada Retilap en su construcción se asume que las características anteriores cumplen con los valores establecidos en la tabla 1.

Nota: *Corresponde a valores actuales de iluminancia media sin automatización y niveles de iluminación al 100% recolectados 22 de mayo del 2026.

Para una correcta evaluación energética son necesarias las características técnicas de las luminarias instaladas, en la Tabla 2 se presenta las principales características técnicas de la luminaria LED industrial de 48 W y del driver electrónico utilizado para el sistema de iluminación inteligente implementado en las áreas de estacionamiento. La información técnica permite identificar los parámetros eléctricos, fotométricos y operativos necesarios para evaluar el desempeño energético, compatibilidad y capacidad de regulación del sistema de iluminación propuesto.

Tabla 2.

Características técnicas de la luminaria instalada en el centro comercial

Característica	Luminaria LED 48 W	Balastro electrónico / Driver LED
Modelo	Hermética Duna LED Zalux	OTi 50/120-277/1A4 DX L
Potencia nominal	48 W	15 – 50 W
Tensión de entrada	110 – 277 V	120 – 277 V
Frecuencia	50/60 Hz	0/50/60 Hz
Corriente de salida	2x454 mA	600 – 1400 mA programable
Flujo luminoso real	5000 lm	—
Eficiencia	85%	88%
Eficacia luminosa	113 lm/W	—
Factor de potencia	> 0.95	> 0.95
Distorsión armónica THD	< 10 %	< 10 %
Protección	IP66	IP20
Protección contra sobre temperatura	Sí	Automática reversible
Protección contra cortocircuito	—	Automática reversible
Atenuación	Opcional 0-10 V / DALI	DALI / DEXAL (1–100 %)
Vida útil	50 000 h	50 000 h

	INFORME FINAL TRABAJO DE GRADO ESPECIALIZACIÓN TIPO ARTÍCULO DEPARTAMENTO DE MECATRÓNICA Y ELECTROMECAÁNICA	Código	FDE 283
		Versión	01
		Fecha	14-10-2025

Material carcasa	Polycarbonato	Metal
Temperatura de operación	—	-30 °C a +50 °C
Clase eléctrica	Clase I	SELV / Clase I
Dimensiones	1.2 m	360 × 30 × 25.4 mm
Aplicación	Parqueaderos y áreas industriales	Control y alimentación LED

Nota: Tabla elaborada por los autores con información de las fichas técnicas de los equipos instalados por el cliente.

Con las características técnicas de los equipos de iluminación recolectadas el siguiente paso requiere conocer como están distribuidos todos estos equipos en los diferentes niveles, en la Figura 3 presenta la caracterización general del sistema de iluminación instalado en cada nivel del estacionamiento, incluyendo la cantidad de luminarias, potencia instalada, número de celdas de parqueo y área intervenida. Se observa que los niveles subterráneos concentran la mayor cantidad de luminarias y demanda energética, especialmente el Sótano 2, debido a su mayor extensión y capacidad de estacionamiento. Esta distribución permitió identificar las zonas con mayor potencial de optimización energética para la implementación de estrategias de control y automatización de iluminación.

Figura 3

Distribución del sistema de iluminación por niveles del estacionamiento.

NIVEL	ESQUEMA	CARACTERÍSTICAS PRINCIPALES
PISO 3.5		61 luminarias 2.928 kW 29 celdas de parqueo 2.604 m²
PISO 3		57 luminarias 2.736 kW 63 celdas de parqueo 2.645 m²
PISO 2.5		95 luminarias 4.566 kW 107 celdas de parqueo 5.678 m²
PISO 2		94 luminarias 4.512 kW 90 celdas de parqueo 3.365 m²
PISO 1		13 luminarias 0.624 kW 0 celdas de parqueo 3.18 m²
SÓTANO 1		362 luminarias 17.376 kW 634 celdas de parqueo 15.559 m²
SÓTANO 2		434 luminarias 20.832 kW 1.835 celdas de parqueo 18.656 m²

 Luminarias
  Potencia total (kW)
  Celdas de parqueo
  Área (m²)

Nota: Imagen elaborada por los autores con herramienta IA (GPT-5.2).

El sistema de control de iluminación en los parqueaderos del complejo se encuentra actualmente fuera de operación, a pesar de contar con una infraestructura instalada basada en seis procesadores QP3-1PL-100-240 y catorce módulos QSN-2DAL-S, gestionados desde el software Quantum View, recuperar este sistema implica una inversión muy alta comparada con otras soluciones incluyendo los sensores de ocupación. En su estado actual, el sistema no dispone de sensores de ocupación, fotoceldas u otros dispositivos periféricos que permitan una operación automática o inteligente. Esto significa que no puede adaptarse de forma autónoma a las condiciones reales de uso, como la presencia de vehículos o los cambios en los niveles de luz natural.

La tabla 3 muestra que los parqueaderos cuentan con una infraestructura de iluminación considerable, distribuida en varios niveles entre sótanos y pisos superiores. En total, se disponen 1116 luminarias con una potencia instalada de 53.568 W, lo que evidencia un alto consumo energético asociado a la operación del sistema. Los niveles con mayor demanda son los sótanos, especialmente el Sótano 2, que presenta la mayor cantidad de luminarias y potencia instalada, seguido del Sótano 1. Esto es coherente con su mayor número de celdas de parqueo y área construida. En conjunto, el sistema cubre aproximadamente 52.811 m² y ofrece 2758 celdas de estacionamiento, lo que confirma la gran capacidad operativa del parqueadero y su importancia dentro del complejo.

	INFORME FINAL TRABAJO DE GRADO ESPECIALIZACIÓN TIPO ARTÍCULO DEPARTAMENTO DE MECATRÓNICA Y ELECTROMECAÁNICA		Código	FDE 283
			Versión	01
			Fecha	14-10-2025

Los datos de la tabla 3 se obtuvieron haciendo una visita técnica al centro comercial con el propósito de recoger la información haciendo conteo de luminarias, revisando características técnicas de la luminaria y parqueaderos, medir áreas y observar cómo opera actualmente el sistema.

Tabla 3.

Caracterización de los parqueaderos del centro comercial

Descripción	Cantidad De luminarias	Potencia Instalada Total (W)	Número de Celdas de Parqueo	Área (m2)
Sótano 1	362	17376	634	16545
Sótano 2	434	20832	1835	21656
Piso 1	13	624	0	318
Piso 2	94	4512	90	3365
Piso 2.5	95	4560	107	5678
Piso 3	57	2736	63	2645
Piso 3.5	61	2928	29	2604
Totales	1116	53568	2758	52811

Nota: Elaborado por los autores con base en información de planos arquitectónicos suministrados por el propietario.

Nota: Las fachadas de todos los pisos carecen de cualquier tipo de iluminación natural, todas sus paredes fueron construidas a partir de concreto vaciado.

Teniendo en cuenta la potencia instalada presentada en la tabla 1 y el tiempo de operación en 24 horas se proyectan unos consumos teóricos que van a ser la base para la validación de los resultados de la implementación del proyecto, cálculo de los ahorros y el tiempo en que se retorna la inversión.

La Tabla 4 presenta el consumo energético distribuido por niveles del edificio, expresado en consumo semanal, mensual y anual en kWh. A partir de los datos se puede concluir que el mayor consumo energético se concentra en los sótanos, especialmente en el Sótano 2, el cual registra un consumo anual de 167,989.248 kWh, equivalente aproximadamente al 39 % del consumo total del edificio. De manera similar, el Sótano 1 presenta un consumo anual de 140,120.064 kWh, representando cerca del 33 % del total anual.

En conjunto, la iluminación de ambos sótanos consume más del 70 % de la energía total de la iluminación de los parqueaderos, lo que implica que en estas áreas se puede obtener mayores ahorros. El consumo energético total estimado de la iluminación del edificio es de 429,666.048 kWh al año.

Tabla 4.

Consumos de energía proyectados semanales, mensuales y anuales.

Descripción	Semanal (kWh)	Mensual (kWh)	Anual (kWh)
-------------	---------------	---------------	-------------

	INFORME FINAL TRABAJO DE GRADO ESPECIALIZACIÓN TIPO ARTÍCULO DEPARTAMENTO DE MECATRÓNICA Y ELECTROMECAÁNICA		Código	FDE 283
			Versión	01
			Fecha	14-10-2025

Sótano 1	2919,168	11676,672	140120,064
Sótano 2	3499,776	13999,104	167989,248
Piso 1	56,784	227,136	2725,632
Piso 2	758,016	3032,064	36384,768
Piso 2.5	766,08	3064,32	36771,84
Piso 3	459,648	1838,592	22063,104
Piso 3.5	491,904	1967,616	23611,392
Total	8951,376	35805,504	429666,048

Nota: Elaborado por los autores con base en información de planos arquitectónicos suministrados por el propietario.

La implementación de estrategias de control de iluminación es fundamental para mejorar la eficiencia energética en los edificios, siempre garantizando condiciones adecuadas de visibilidad. Entre las principales estrategias se encuentra el control por horarios, que permite programar el encendido y apagado de la iluminación según la operación del espacio, logrando ahorros del orden del 10% al 20%. Asimismo, el uso de sensores de ocupación resulta altamente efectivo en zonas de uso intermitente, como parqueaderos, donde pueden alcanzarse reducciones entre el 20% y el 40% al evitar el funcionamiento innecesario de las luminarias. (Chaudhari et al., 2024)

Otra estrategia relevante es el aprovechamiento de la luz natural mediante sistemas de atenuación, los cuales ajustan la iluminación artificial en función de la iluminación exterior y pueden generar ahorros entre el 20% y el 60% en espacios con buena disponibilidad de luz natural. Adicionalmente, la zonificación o control por áreas permite adaptar los niveles de iluminación según la actividad, aportando reducciones adicionales entre el 10% y el 30%. Finalmente, cuando estas estrategias se integran en sistemas inteligentes de gestión, es posible alcanzar ahorros globales que oscilan entre el 30% y el 70%, dependiendo del grado de implementación. El documento enfatiza que estos beneficios solo se logran cuando los sistemas están correctamente diseñados, configurados y mantenidos, evitando así afectar los niveles de iluminación requeridos para la seguridad y el confort visual (Lawrence et al., 2018)

3.2 Planteamiento y diseño de automatización para controlar sistema iluminación

El diseño de control propuesto para la iluminación de los parqueaderos se fundamenta en la implementación de un sistema automatizado basado en tecnología KNX, integrando sensores de ocupación y controladores DALI, con supervisión centralizada mediante servidores Wiser LSS100100. (Schneider Electric, 2024). Este enfoque busca transformar la operación actual hacia un esquema eficiente, adaptable y alineado con los requerimientos normativos de iluminación. La estrategia principal se basa en el uso de sensores de ocupación que permiten ajustar dinámicamente los niveles de iluminación según la presencia de usuarios. En zonas con baja o nula disponibilidad de luz natural, como los sótanos 1 y 2, el control por ocupación se convierte en la solución predominante, garantizando que la iluminación se mantenga en niveles seguros y

	INFORME FINAL TRABAJO DE GRADO ESPECIALIZACIÓN TIPO ARTÍCULO DEPARTAMENTO DE MECATRÓNICA Y ELECTROMECAÁNICA		Código	FDE 283
			Versión	01
			Fecha	14-10-2025

constantes conforme a lo establecido por la normativa vigente. En los demás niveles, aunque existe cierta contribución de luz natural, la variabilidad de uso y la necesidad de condiciones uniformes hacen que la estrategia de ocupación también sea la más adecuada.

El sistema DALI permite regular la intensidad de las luminarias de forma precisa por zonas, facilitando transiciones suaves entre niveles de iluminación (por ejemplo, niveles base y niveles de ocupación), evitando apagados bruscos y mejorando la percepción de seguridad. A su vez, la integración con la plataforma de monitoreo posibilita la supervisión en tiempo real, la gestión de horarios, el análisis de consumo y la detección de fallas. En conjunto, este diseño no solo garantiza el cumplimiento de los niveles mínimos de iluminancia exigidos, sino que también optimiza el consumo energético, mejora la operación del sistema y proporciona una infraestructura escalable para futuras estrategias de automatización.

Recuperar el sistema actual implica unos costos elevados ya que es un sistema que no tiene soporte inmediato y los servicios de mantenimiento, configuración y reparación implican traslado de personal especializado desde otros países eleva los costos y al hacer la evaluación sale más rentable hacer el cambio de tecnología.

La Figura 4 presenta la arquitectura general de un sistema de control y supervisión de iluminación basado en tecnología KNX y DALI para un estacionamiento o edificio de varios niveles. El esquema se organiza en cuatro niveles principales: supervisión, automatización, campo e iluminación.

El nivel de supervisión corresponde a la capa de monitoreo y gestión centralizada del sistema. En este nivel se encuentra el servidor KNX y la plataforma Wiser, encargados de supervisar en tiempo real el estado de las luminarias, registrar alarmas, gestionar usuarios y analizar el consumo energético del sistema de iluminación.

El servidor utilizado en el nivel de supervisión SpaceLYnk LSS100200 de Schneider Electric es un controlador lógico multiprotocolo diseñado para sistemas de automatización de edificios basados en tecnología KNX. Este dispositivo permite integrar funciones de supervisión, monitoreo energético, control de iluminación y automatización centralizada mediante comunicación KNX, DALI, Modbus y BACnet. El equipo opera con una alimentación de 24 VDC y presenta un consumo aproximado de 2 W. Dispone de interfaces de comunicación Ethernet RJ45, RS485, RS232, USB 2.0 y conexión directa al bus KNX, permitiendo la integración con redes IP y dispositivos de automatización inteligentes.

El nivel de automatización es la red principal de comunicación KNX que integra todos los dispositivos del sistema. Este nivel permite el intercambio de información entre sensores, controladores y dispositivos de control, facilitando la ejecución de estrategias automáticas de iluminación y regulación por zonas.

El bus KNX es una red de comunicación utilizada en sistemas de automatización de edificios para integrar y controlar dispositivos inteligentes como sensores, actuadores, controladores de iluminación, climatización y sistemas de supervisión. Esta tecnología permite el intercambio de información entre los diferentes equipos mediante un protocolo estandarizado internacionalmente bajo la norma KNX Association.(KNX Association, 1999).

El nivel de campo incluye los dispositivos físicos instalados en el estacionamiento, como sensores de ocupación KNX, pulsadores y controladores KNX-DALI. Los sensores detectan presencia y envían señales a los controladores, los cuales ejecutan acciones de encendido, apagado y regulación de las luminarias según las condiciones de ocupación.

	INFORME FINAL TRABAJO DE GRADO ESPECIALIZACIÓN TIPO ARTÍCULO DEPARTAMENTO DE MECATRÓNICA Y ELECTROMECAÁNICA	Código	FDE 283
		Versión	01
		Fecha	14-10-2025

A nivel de campo los gateways KNX-DALI son dispositivos de comunicación encargados de integrar la red de automatización KNX con el sistema de iluminación digital DALI (Digital Addressable Lighting Interface). Su función principal es traducir y transferir comandos entre ambos protocolos, permitiendo que sensores, pulsadores y sistemas de supervisión KNX controlen luminarias LED regulables conectadas a la red DALI.

Otro equipo importante son los sensores de ocupación, que son dispositivos electrónicos utilizados para detectar presencia o movimiento de personas y vehículos dentro de un área determinada. En sistemas de iluminación inteligente, estos sensores permiten automatizar el funcionamiento de las luminarias según el nivel de ocupación del espacio. El principio de funcionamiento se basa generalmente en tecnología infrarroja pasiva (PIR), microondas o multisensor, capaces de identificar cambios térmicos o movimientos dentro de su zona de cobertura. Cuando el sensor detecta presencia, envía una señal al sistema KNX o al controlador DALI para incrementar el nivel de iluminación de la zona correspondiente.

El nivel de iluminación corresponde al conjunto de luminarias LED regulables conectadas a la red DALI. En este nivel se realiza el control directo de la intensidad lumínica por grupos o zonas del estacionamiento, permitiendo adaptar la iluminación según la presencia de usuarios y las necesidades operativas de cada área.

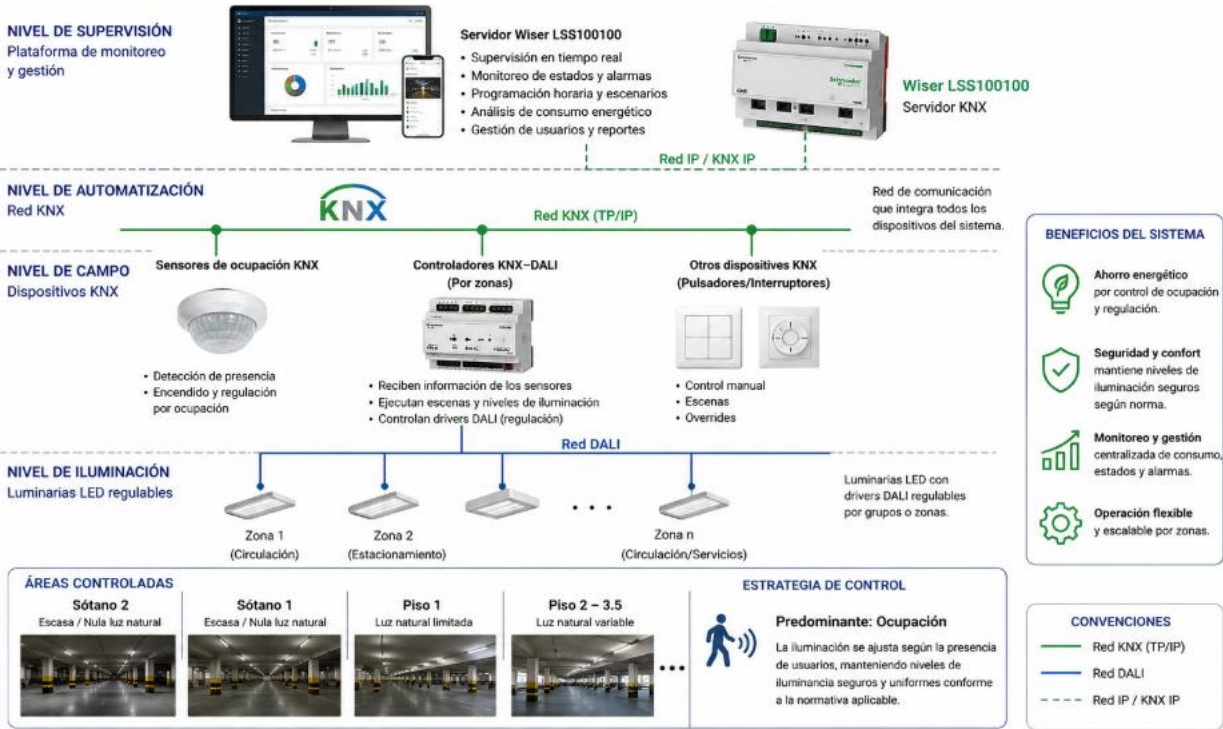
La luminaria presentada corresponde a un modelo LED industrial hermético diseñado para aplicaciones de estacionamientos interiores y ambientes de uso continuo. La luminaria posee una potencia nominal de 48 W y un flujo luminoso aproximado de 5000 lm, ofreciendo una eficacia luminosa de 113 lm/W, lo que permite reducir el consumo energético respecto a sistemas convencionales de iluminación.

Adicionalmente, incorpora protección IP66 contra polvo y humedad, factor de potencia superior a 0.95 y compatibilidad con sistemas de regulación DALI, permitiendo controlar dinámicamente la intensidad lumínica mediante sensores de ocupación y estrategias de automatización orientadas a la eficiencia energética. Su vida útil estimada es de aproximadamente 50 000 horas de operación, lo que garantiza alta confiabilidad y bajos requerimientos de mantenimiento para aplicaciones en estacionamientos inteligentes.

Figura 4

Esquema de control diseñado para implementación en los parqueaderos.

	INFORME FINAL TRABAJO DE GRADO ESPECIALIZACIÓN TIPO ARTÍCULO DEPARTAMENTO DE MECATRÓNICA Y ELECTROMECAÁNICA		Código	FDE 283
			Versión	01
			Fecha	14-10-2025



Nota: Imagen elaborada por los autores con herramienta IA (GPT-5.2).

Para la modernización del sistema de control de iluminación en los parqueaderos del complejo comercial, se consideró la incorporación de una solución integral orientada a mejorar la eficiencia energética, la operación y el cumplimiento normativo. Esta propuesta contempla la instalación de sensores de ocupación, el reemplazo de los controladores DALI existentes, la implementación de servidores de monitoreo y la inclusión de todos los elementos complementarios necesarios para la correcta integración del sistema bajo tecnología KNX. (Hrmo et al., 2025)

En la Figura 5 se presenta el tablero principal de control que corresponde al gabinete central de automatización del sistema de iluminación inteligente del estacionamiento. Este tablero fue diseñado con dimensiones aproximadas de 60 cm × 80 cm e integra los principales dispositivos de supervisión, comunicación y control del sistema KNX/DALI.

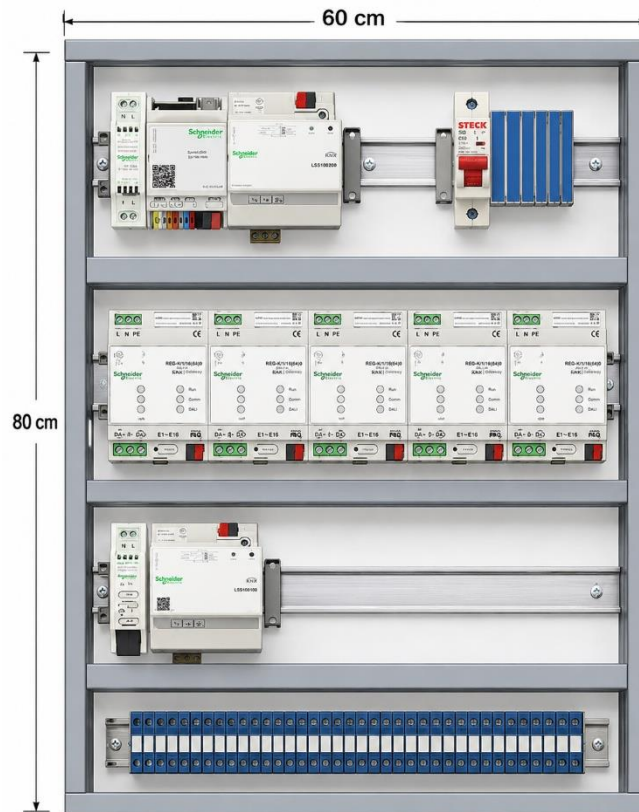
En su interior se encuentran instalados el servidor KNX LSS100200 ubicado en el riel superior segundo equipo de izquierda a derecha, fuente de alimentación KNX ubicada en riel superior tercer equipo de izquierda a derecha, protecciones eléctricas ubicada en el riel superior componente de color rojo y blanco a la derecha y múltiples controladores KNX-DALI ubicados en rieles inferiores encargados de gestionar la regulación y operación de las luminarias LED por zonas. Asimismo, incorpora borneras de distribución y elementos de protección para garantizar una operación segura y confiable del sistema.

El tablero principal actúa como núcleo de comunicación y automatización, permitiendo integrar sensores de ocupación, controladores DALI y el sistema de supervisión centralizado para optimizar el consumo energético y ejecutar estrategias automáticas de iluminación en tiempo real.

	INFORME FINAL TRABAJO DE GRADO ESPECIALIZACIÓN TIPO ARTÍCULO DEPARTAMENTO DE MECATRÓNICA Y ELECTROMECAÁNICA		Código	FDE 283
			Versión	01
			Fecha	14-10-2025

Figura 5

Gabinete de control KNX sótano 1 costado sur.



Nota: Imagen elaborada por los autores con herramienta IA (GPT-5.2) y diseños de control suministrados por empresa.

El diseño parte de la necesidad de migrar desde un sistema actualmente inoperante hacia una infraestructura funcional y automatizada, capaz de gestionar la iluminación en función de la ocupación real de los espacios. Para ello, los sensores de ocupación permitirán detectar presencia en cada zona del parqueadero, mientras que los nuevos controladores DALI garantizarán una regulación eficiente y precisa de las luminarias. (Kim & Choi, 2023)

La Figura 6 ilustra la lógica de operación del sistema de control de iluminación basado en sensores de ocupación y protocolo DALI implementado en las áreas de parqueadero. En la parte superior se representa la condición de presencia detectada, donde el sensor identifica ocupación dentro de su área de cobertura y envía una señal al controlador DALI, el cual incrementa la intensidad de iluminación de las luminarias hasta un nivel alto de operación.

En la parte inferior se muestra la condición de ausencia de ocupación, en la cual el sensor deja de detectar movimiento durante un tiempo previamente configurado. Posteriormente, el controlador DALI ejecuta una

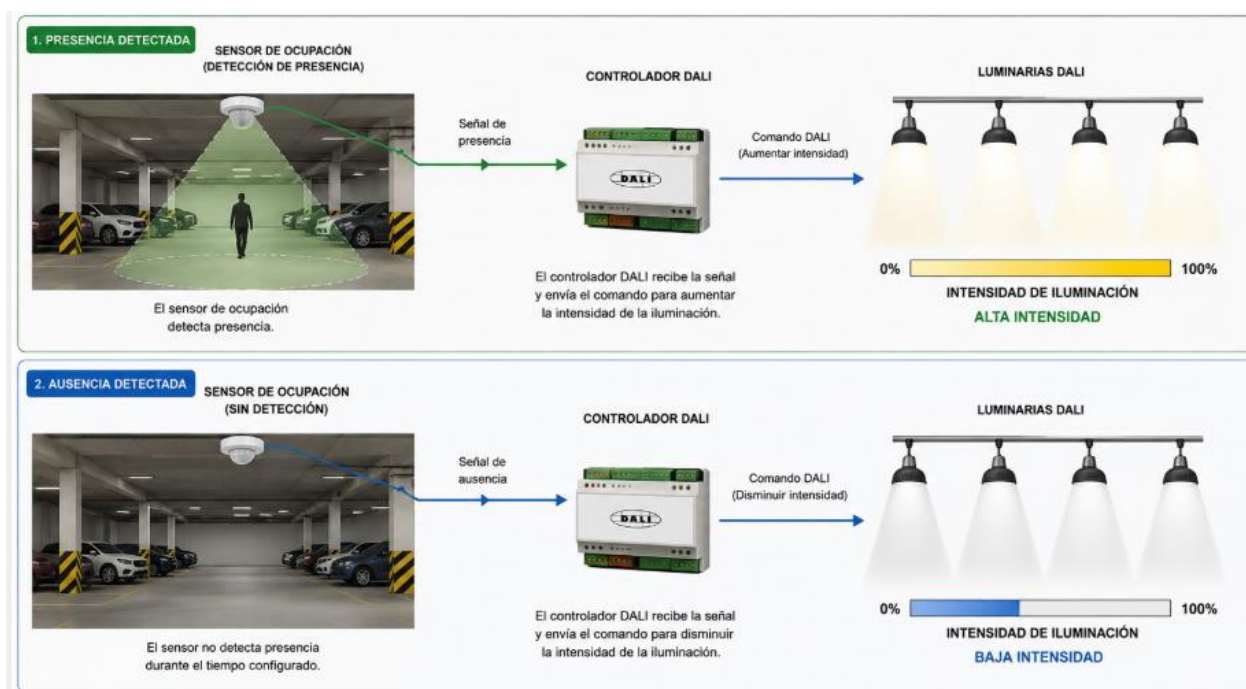
	INFORME FINAL TRABAJO DE GRADO ESPECIALIZACIÓN TIPO ARTÍCULO DEPARTAMENTO DE MECATRÓNICA Y ELECTROMECAÁNICA	Código	FDE 283
		Versión	01
		Fecha	14-10-2025

reducción automática del nivel lumínico, disminuyendo la intensidad de las luminarias para reducir el consumo energético manteniendo niveles mínimos de iluminación de seguridad.

El esquema evidencia la interacción entre el sensor de ocupación, el controlador DALI y las luminarias regulables, permitiendo implementar estrategias de automatización orientadas a la eficiencia energética y al uso inteligente de la iluminación en estacionamientos.

Figura 6

Esquema de funcionamiento de los sensores de presencia en el estacionamiento.



Nota: Imagen elaborada por los autores con herramienta IA (GPT-5.2).

3.3 Análisis técnico económico del sistema de automatización

Se tiene un sistema de iluminación que opera de manera continua las 24 horas y 365 días del año generando un consumo anual 429666,048 kWh, a partir de esto se identifican oportunidades de mejora para reducir el consumo actual de la iluminación haciendo uso de sensores de ocupación para atenuar la iluminación en ausencia de personas en la zona. Para esto se debe tener en cuenta las siguientes afirmaciones.

La iluminación debe reducirse automáticamente al menos un 50 % cuando no se detecte actividad durante un tiempo máximo de 15 minutos. Para garajes interiores, toda la iluminación debe estar controlada mediante sensores de ocupación. La potencia de las luminarias debe disminuir automáticamente cuando las zonas estén desocupadas (ASHRAE Standard Project Committee 90.1, 2022). El escenario proyectado fue desarrollado considerando la implementación de un sistema de control inteligente de iluminación basado en

	INFORME FINAL TRABAJO DE GRADO ESPECIALIZACIÓN TIPO ARTÍCULO DEPARTAMENTO DE MECATRÓNICA Y ELECTROMECAÁNICA		Código	FDE 283
			Versión	01
			Fecha	14-10-2025

sensores de ocupación y regulación mediante protocolo DALI, con el objetivo de reducir el consumo energético del sistema de iluminación del estacionamiento sin afectar las condiciones de seguridad y visibilidad.

En el sistema actual, todas las luminarias operan de manera continua al 100 % de su capacidad durante las 24 horas del día, independientemente de la ocupación real del parqueadero. Para el escenario proyectado se planteó una estrategia de regulación dinámica, en la cual la intensidad lumínica se ajusta automáticamente según la presencia de usuarios y el nivel de ocupación de cada zona. La formulación del modelo proyectado consideró tres variables principales: Porcentaje máximo de iluminación permitido, porcentaje de ocupación estimado y nivel de atenuación durante ausencia de ocupación.

Se estableció que las luminarias operarían a un máximo del 80 % de su capacidad nominal durante condiciones normales de ocupación, conservando niveles adecuados de iluminancia conforme a criterios de eficiencia energética. Esto se soporta en los valores de iluminancia media actuales en el centro comercial comparados con los establecidos en la norma permiten la reducción del límite máximo al 80% y seguir cumpliendo con lo establecido en la tabla 1. La relación entre flujo luminoso y potencia de la luminaria se va a considerar con un comportamiento lineal entre los rangos en lo que se va a operar el sistema (80%-50%) para un límite menor ya se debe considerar un comportamiento no lineal y aplican otro tipo de fórmulas.

La reducción inicial se expresa como la potencia máxima operativa es igual a la potencia total instalada por el nivel máximo en el cual va a operar el sistema que es 80%.

El modelo incorpora un factor de ocupación promedio asociado al uso real de cada nivel del estacionamiento. Este valor representa el porcentaje de tiempo en que las zonas permanecen ocupadas y requieren iluminación en nivel operativo. Este factor fue suministrado por el cliente en base a seguimientos de la operación diaria de los parqueaderos.

La Figura 7 presenta la comparación entre el nivel máximo de iluminación del sistema actual y el nivel de iluminación propuesto para cada zona del estacionamiento, junto con el porcentaje de ocupación estimado para la operación proyectada del parqueadero.

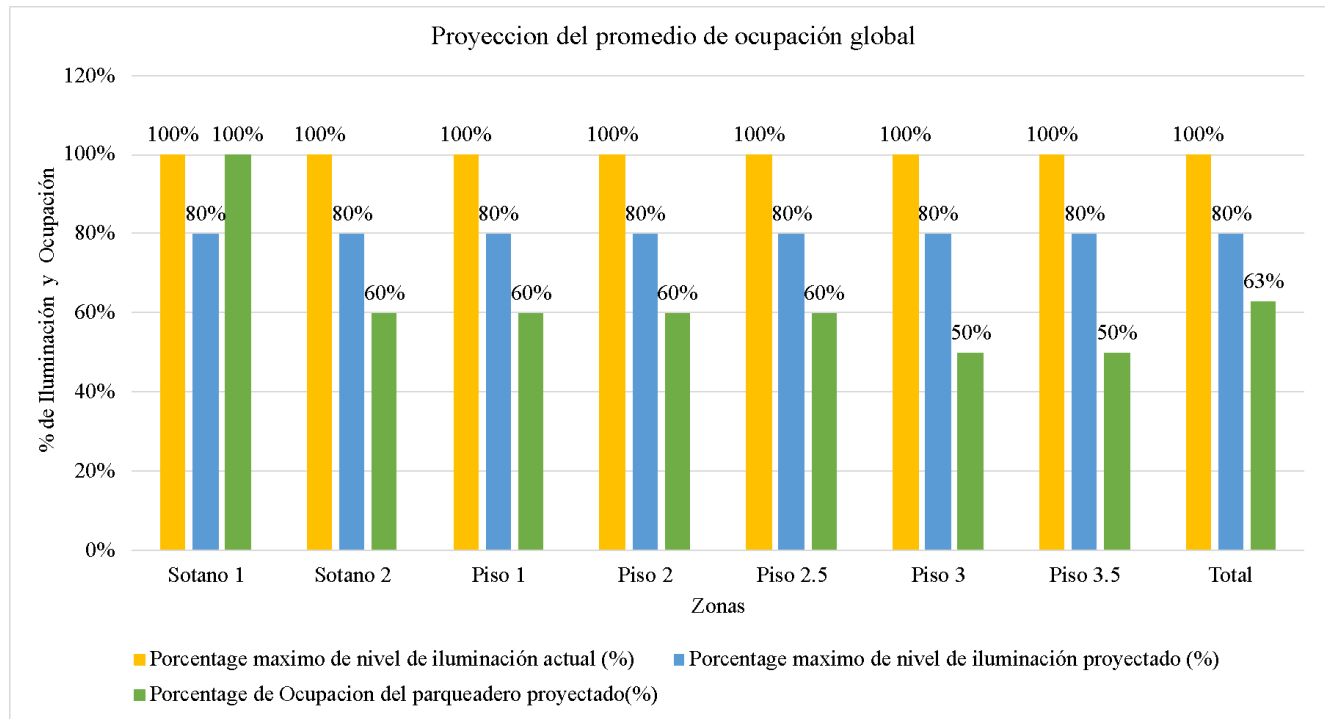
En el sistema existente, todas las zonas operan al 100 % de intensidad lumínica, independientemente de la ocupación real de los espacios, lo que genera un funcionamiento continuo de las luminarias y un mayor consumo energético. En contraste, la propuesta de automatización plantea limitar el nivel máximo de iluminación al 80 %, manteniendo condiciones adecuadas de visibilidad y seguridad conforme a criterios de eficiencia energética. Este valor se soporta en los valores actuales de iluminancia media tomadas en sitio superiores a niveles establecidos en Retilap lo que permite establecer un nivel máximo de 80%.

Adicionalmente, el análisis de ocupación proyectada evidencia que no todas las áreas del estacionamiento presentan el mismo nivel de utilización. Los sótanos y niveles principales presentan mayores porcentajes de ocupación, mientras que los niveles superiores muestran menores tasas de uso. El valor promedio de ocupación total estimado corresponde al 63 %, lo que indica que gran parte del tiempo existen zonas parcialmente desocupadas que pueden beneficiarse de estrategias de regulación automática de iluminación.

Estos resultados justifican la implementación de sensores de ocupación y controladores DALI, permitiendo adaptar dinámicamente la intensidad lumínica según la presencia de usuarios y el nivel de utilización de cada zona, reduciendo el consumo energético sin afectar las condiciones operativas del estacionamiento.

Figura 7

Gráfico de porcentaje de iluminación y ocupación por cada zona.



Nota: Imagen elaborada por los autores con herramienta Excel e información suministrada por el cliente.

Nota: Los valores de ocupación proyectado fueron entregados por el cliente basado en la percepción y operación diaria.

El factor promedio de ocupación proyectado fue del 63 %. Por ende, la potencia demandada en el momento en que hay ocupación es igual potencia máxima operativa multiplicada por el factor de ocupación calculado con los datos suministrados por el cliente.

Cuando el sensor no detecta presencia dentro del tiempo configurado, el controlador DALI reduce automáticamente la intensidad de iluminación a un nivel de espera o “stand-by”, garantizando iluminación mínima de seguridad.

Para el análisis se consideró que cuando no haya ocupación el nivel mínimo será del 50% ya que este es el nivel mínimo en el cual el comportamiento de la potencia en relación con el flujo luminoso tiene un comportamiento aproximadamente lineal.

La potencia en estado de espera es la potencia total instalada menos la potencia demandada en momentos de ocupación y todo multiplicado por el factor de desocupación el cual se estableció en 50%.

La ecuación 1 corresponde a el consumo total proyectado corresponde a la suma de la potencia utilizada durante ocupación y la potencia consumida en estado atenuado.

	INFORME FINAL TRABAJO DE GRADO ESPECIALIZACIÓN TIPO ARTÍCULO DEPARTAMENTO DE MECATRÓNICA Y ELECTROMECAÁNICA	Código	FDE 283
		Versión	01
		Fecha	14-10-2025

$$P_{total\ proyectado} = 0.63(0.8) + 0.37(0.5) = 0.689 \quad (1)$$

lo que representa un consumo equivalente al 68.9 % respecto al sistema en operación actual.

Finalmente, en la ecuación 2 se calcula el porcentaje de ahorro energético se calculó mediante la diferencia entre el consumo del sistema actual y el consumo del escenario proyectado.

$$Ahorro = (1 - 0.689) \times 100 = 31.1\% \quad (2)$$

La formulación del escenario proyectado demuestra que la incorporación de sensores de ocupación y control DALI permite adaptar dinámicamente los niveles de iluminación según la utilización real del estacionamiento. La reducción automática de potencia durante periodos de baja ocupación genera una disminución significativa del consumo energético, manteniendo simultáneamente condiciones adecuadas de operación y seguridad conforme a los lineamientos de ASHRAE 90.1 y Retilap para estacionamientos interiores. (Lawrence et al., 2018; Ministerio De Minas Y Energía, 2024)

La tabla 5 resume el listado de equipos y costos asociados a la implementación del sistema de control de iluminación, contemplando una solución integral basada en tecnología KNX y DALI. En ella se incluyen los principales componentes requeridos para la operación del sistema, tales como el servidor de monitoreo, fuentes de alimentación, dispositivos de comunicación KNX (routers y acopladores), controladores DALI, sensores de ocupación, interfaces de usuario, así como el cableado, tubería y gabinetes necesarios para la instalación. Un aspecto relevante es que los sensores de ocupación (73 unidades) y los controladores KNX-DALI (27 unidades) representan una parte significativa de la inversión, debido a su papel fundamental en la estrategia de control basada en presencia. Asimismo, se incluye el servidor web de supervisión, que permitirá la gestión centralizada del sistema, junto con los elementos de infraestructura que garantizan la correcta integración y funcionamiento de todos los dispositivos.

El presupuesto también contempla actividades de programación, configuración del sistema y capacitación, asegurando no solo la instalación física, sino también la correcta puesta en marcha y operación por parte del personal encargado. Es importante destacar que los valores presentados incluyen tanto el suministro de los equipos como la mano de obra y todos los accesorios necesarios para la implementación, tales como cableado, canalizaciones, montaje e integración. El costo total estimado del proyecto asciende a aproximadamente \$190 millones de pesos colombianos, lo que corresponde a una solución completa, funcional y alineada con criterios de eficiencia energética, automatización y cumplimiento normativo.

Tabla 5.

Presupuesto y equipos necesarios para implementación del sistema.

Ítem	Descripción	Referencia	Unidad	Cantidad	Valor total
------	-------------	------------	--------	----------	-------------

	INFORME FINAL TRABAJO DE GRADO ESPECIALIZACIÓN TIPO ARTÍCULO DEPARTAMENTO DE MECATRÓNICA Y ELECTROMECAÁNICA				Código	FDE 283
					Versión	01
					Fecha	14-10-2025

1	Suministro e instalación de Servidor Web Spacelink, sistema de alarmas, monitoreo y ambiente grafico web	LS100200	UN	1	\$ 13,228,536.69
2	Suministro e instalación Fuente DC para Riel din 24 VDC	MTN693003	UN	1	\$ 923,025.27
3	Suministro e instalación KNX power supply, REG-K/640 mA	BBPS-02/640.1	UN	5	\$ 3,765,725.94
4	Suministro e instalación KNX IP Router DIN Rail	BNIPR-00/00.S	UN	2	\$ 3,338,498.37
5	Suministro e instalación KNX Coupler DIN Rail	BNLC-00/00.3	UN	2	\$ 2,295,739.52
6	Suministro e instalación KNX DALI Gateway Basic	BTDG-01/64.1	UN	27	\$ 18,972,361.20
7	Suministro e instalación KNX Smart Touch S7	CHTI7.0/120.1.22 (White)	UN	1	\$ 2,425,945.19
8	Suministro e instalación KNX Presence PIR	CSBP-04/00.1.00 (White)	UN	73	\$40,166,076.01
9	Suministro e instalación Cable de control 2*16 fplr	N/A	ML	2440	\$42,867,318.51
10	Suministro e instalación de Tubería Emt 1/2'	N/A	ML	1260	\$39,867,604.05
11	Suministro e instalación de Gabinetes de control y accesorios 80*60	N/A	UND	4	\$ 7,219,966.46
12	Programación del sistema incluye ambiente gráfico y capacitación de 2 horas	N/A	Horas	120	\$15,247,151.02
Subtotal					\$190,317,948.23

Nota: La tabla fue elaborada por los autores con herramienta Excel e información de la empresa consultora.

El presupuesto anterior incluye tanto el suministro de los equipos, mano de obra instalación, administración y capacitación del personal que va a operar y mantener el sistema. El costo de mantener y operar el sistema para el centro comercial es de aproximadamente \$27.000.000. Este valor debe considerar el aumento anual del IPC proyectado planteado más adelante.

	INFORME FINAL TRABAJO DE GRADO ESPECIALIZACIÓN TIPO ARTÍCULO DEPARTAMENTO DE MECATRÓNICA Y ELECTROMECAÁNICA		Código	FDE 283
			Versión	01
			Fecha	14-10-2025

Para hacer el análisis del flujo de caja se aplicará la metodología financiera flujo de caja descontado con lógica de método indirecto. El flujo de caja descontado (FCD) es una metodología financiera utilizada para determinar el valor presente de un proyecto, empresa o inversión a partir de los flujos de efectivo futuros esperados y una tasa de descuento asociada al riesgo y al costo del capital. Según el documento de revisión académica, este método permite estimar el valor actual considerando el valor del dinero en el tiempo, las proyecciones financieras y la capacidad de generación de efectivo del proyecto. (Zúñiga et al., 2022)

Se destaca que el método FCD ha alcanzado un alto nivel de aceptación en la valoración financiera debido a que incorpora elementos como oportunidades de crecimiento, costo del capital y análisis de escenarios futuros. Asimismo, se menciona que el método permite evaluar la rentabilidad económica mediante indicadores como el Valor Presente Neto (VPN) y la Tasa Interna de Retorno (TIR), facilitando la toma de decisiones de inversión. ((Zúñiga et al., 2022)

Adicionalmente, el flujo de caja descontado trabaja sobre escenarios futuros inciertos, por lo que requiere definir supuestos relacionados con crecimiento, riesgos, tasas de descuento, costos operativos y proyecciones económicas. Debido a ello, el análisis financiero debe complementarse con evaluaciones de sensibilidad, análisis de escenarios y variables del entorno que permitan obtener resultados más consistentes y cercanos a la realidad del proyecto. (Zúñiga et al., 2022)

El primer paso consiste en determinar la inversión inicial la cual es \$190.317.948.

En el siguiente paso se debe calcular los ahorros anuales esperados, para esto es necesario saber cuál es el costo de la energía y el consumo energético actual anual. El cliente suministra el valor actual de la energía (920COP/kWh) y el consumo anual actual es 429666.048 kWh/año.

El ahorro proyectado mediante sensores de ocupación y control DALI es del 31.1 %, por lo tanto, en la ecuación 3 se calcula el ahorro económico anual esperado en el primer año:

$$\text{Ahorro} = 429666.48 \times 920 \times 31.1\% = \$122.936.173\text{COP} \quad (3)$$

A partir del primer año se considera un aumento con respecto a la variación anual del Índice de Precios al Consumidor (IPC) en Colombia estimado en los próximos años en un 4.5% promedio. Su valor depende de variables económicas como la inflación, el costo de oportunidad del capital, las tasas financieras del mercado y el riesgo tecnológico del sistema implementado.

Aunque los equipos de control tienen una vida útil hasta de 15 años el análisis contemplara un tiempo de 5 años para el flujo de caja, ya que la vida útil de la luminaria es de aproximadamente 5 años. El análisis también contempla unos gastos operativos post venta del proyecto para garantizar operabilidad y soporte y capacitación constante durante el primer año lo cual representa el 20% de utilidad bruta obtenida durante el primer año.

En la Tabla 6 se plantea un posible financiamiento para compra de equipos del 45% de la inversión inicial que corresponde aproximadamente a lo que cuestan los equipos de control q \$85.643.076 con una tasa de interés del 28%. Esto nos obliga a hacer un descuento por gastos financieros de los intereses cada año de la utilidad de operación.

En Colombia cada año las empresas deben pagar impuesto sobre la renta el porcentaje aproximado en general es del 33%, por lo tanto, si la utilidad antes de impuestos es positiva se debe descontar este porcentaje todos los años lo cual hace que el VPN del proyecto sea más real. Finalmente se hacen ajustes

	INFORME FINAL TRABAJO DE GRADO ESPECIALIZACIÓN TIPO ARTÍCULO DEPARTAMENTO DE MECATRÓNICA Y ELECTROMECAÁNICA	Código	FDE 283
		Versión	01
		Fecha	14-10-2025

por depreciación, amortización y hace el descuento de la amortización de la deuda por cada año. Para todos los cálculos en la Tabla 6 su uso la herramienta Excel con sus funciones financieras.

Tabla 6.

Flujo de caja descontado para caso de estudio.

Flujos	Años					
	0	1	2	3	4	5
Inversión Inicial	-190.32					
+ Ahorros x Electricidad		122.9	128.47	134.25	140.29	146.60
- M&O		-27	-28.22	-29.48	-30.81	-32.20
= Utilidad bruta		95.94	100.25	104.76	109.48	114.41
- Gastos de operación de admón. y ventas		-19.19	0.00	0.00	0.00	0.00
= Utilidad de operación		76.75	100.25	104.76	109.48	114.41
- Gasto financiero		-23.98	-21.22	-17.70	-13.18	-7.40
- depreciación y amortización (no desembolsable)		-38.06	-38.06	-38.06	-38.06	-38.06
= Utilidad antes de impuestos		0	0	0	0	0
- impuestos (33%)		14.71	40.97	49.01	58.24	68.94

	INFORME FINAL TRABAJO DE GRADO ESPECIALIZACIÓN TIPO ARTÍCULO DEPARTAMENTO DE MECATRÓNICA Y ELECTROMECAÁNICA				Código	FDE 283
					Versión	01
					Fecha	14-10-2025

= Utilidad						
después de		-4.85	-13.52	-16.17	-19.22	-22.75
impuestos						
+ ajuste por						
depreciación y		9.85	27.45	32.83	39.02	46.19
amortización						
+ crédito						
recibido		38.06	38.06	38.06	38.06	38.06
- amortización						
deuda	85.64					
= Utilidad		-9.84	-12.60	-16.13	-20.64	-26.43
Neta						
Flujo de caja						
libre	-104.67	38.07	52.91	54.77	56.44	57.83

Nota: La tabla fue elaborada por los autores con herramienta Excel.

Nota: Las unidades en la tabla está en Millones de COP.

El escenario financiero evaluado presenta un comportamiento negativo debido al alto costo asociado al financiamiento de la inversión inicial. Para la adquisición de los equipos de control se consideró un crédito equivalente al 45% del valor total de la inversión inicial, correspondiente a 190.32 MCOP, con una tasa de interés anual del 28%. Esta condición incrementó significativamente los costos financieros del proyecto, afectando de manera directa los flujos de caja netos durante el horizonte de evaluación de cinco años.

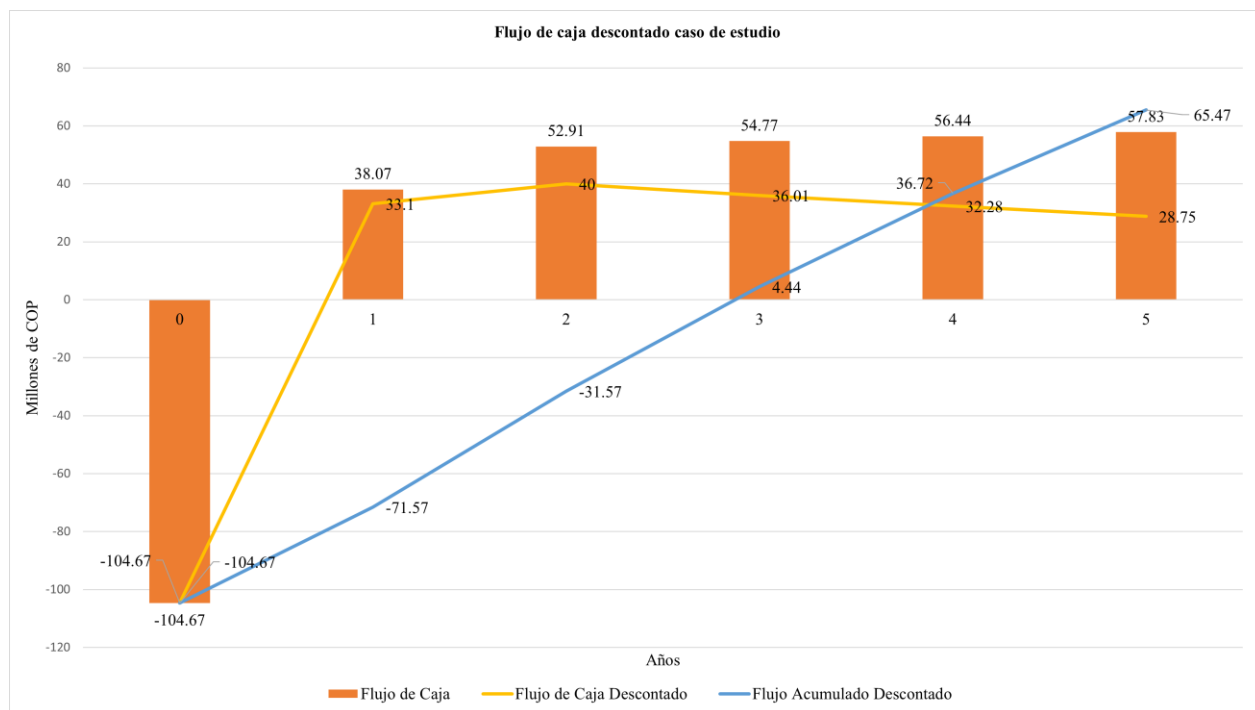
Como resultado, el proyecto obtuvo un Valor Presente Neto (VPN) negativo de 65.47 MCOP y una Tasa Interna de Retorno (TIR) de 37.31%, superior a la tasa de descuento establecida del 15%. Además, el periodo de recuperación de la inversión esta alrededor de los 2.9 años. Estos resultados demuestran la viabilidad del proyecto.

En la Figura 8 se evidencia un comportamiento financiero favorable para el proyecto durante el horizonte de evaluación de cinco años. Al aplicar una tasa de descuento del 15%, el proyecto genera un Valor Presente Neto (VPN) positivo de 65.47 MCOP y una Tasa Interna de Retorno (TIR) de 37.31%, superior a la rentabilidad mínima esperada. Asimismo, el flujo acumulado descontado se vuelve positivo a partir del tercer año, indicando una recuperación adecuada de la inversión inicial y confirmando la viabilidad económica del proyecto bajo las condiciones evaluadas.

Figura 8

Gráfico de flujo de caja descontado para caso pesimista.

	INFORME FINAL TRABAJO DE GRADO ESPECIALIZACIÓN TIPO ARTÍCULO DEPARTAMENTO DE MECATRÓNICA Y ELECTROMECAÁNICA		Código	FDE 283
			Versión	01
			Fecha	14-10-2025



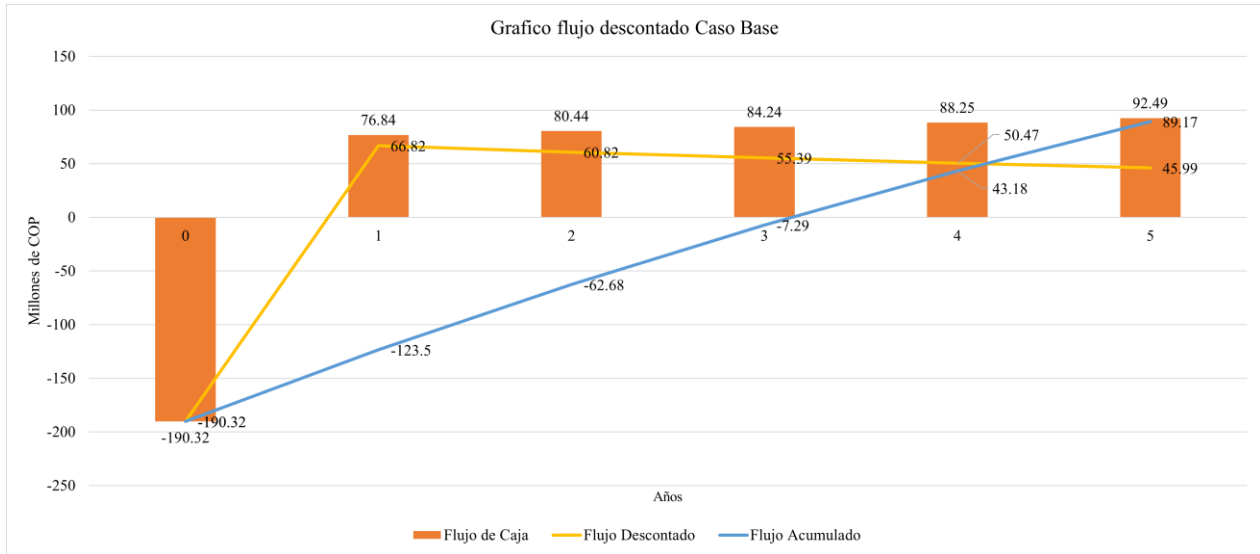
Nota: El gráfico fue elaborado por los autores a la herramienta Excel.

Para el caso base el cual corresponde el análisis de este artículo se considera un IPC de 5.6% la misma tasa acumulada (15%), inversión inicial y sin gastos adicionales. el cliente decide hacer la inversión asumir los riesgos para aprovechar los ahorros proyectados.

En la Figura 9 el escenario evaluado presenta un comportamiento financiero favorable bajo una tasa de descuento del 15%. El proyecto genera un Valor Presente Neto (VPN) positivo de 89.15 MCOP y una Tasa Interna de Retorno (TIR) de 32.77%, superior a la rentabilidad mínima esperada. Asimismo, el periodo de recuperación descontado de la inversión es aproximadamente de 3.1 años, lo que evidencia una recuperación eficiente del capital invertido y confirma la viabilidad económica del proyecto en el horizonte de evaluación de cinco años.

Figura 9

Gráfico de flujo de caja descontado para caso base.



Nota: El grafico fue elaborado por los autores a la herramienta Excel.

La Tabla 7 se tiene un análisis comparativo entre el caso base (Caso 2) y el caso evaluado (Caso 1) donde se evidencia que ambos escenarios presentan viabilidad financiera; sin embargo, el caso evaluado muestra un mejor desempeño económico debido a una menor inversión inicial y una recuperación más rápida del capital invertido. Aunque el caso base obtiene un VPN más alto, el caso evaluado presenta una TIR y un ROI superiores, indicando una mayor eficiencia en la utilización de los recursos financieros. Además, el periodo de recuperación de la inversión del caso evaluado es ligeramente menor, lo que demuestra una capacidad más rápida para generar beneficios económicos. En conjunto, los resultados indican que el caso evaluado ofrece mejores condiciones de rentabilidad y sostenibilidad financiera en relación con la inversión realizada

Tabla 7.

Tabla comparativa de escenarios.

Indicador	Caso 1: Crédito 45% con interés 28%	Caso 2: Escenario rentable
Inversión inicial (MCOP)	104.67	190.32
Horizonte de evaluación	5 años	5 años
Tasa de descuento	0.15	15%
VPN (MCOP)	65.47	89.15
TIR	37.31%	32.77%

	INFORME FINAL TRABAJO DE GRADO ESPECIALIZACIÓN TIPO ARTÍCULO DEPARTAMENTO DE MECATRÓNICA Y ELECTROMECAÁNICA	Código	FDE 283
		Versión	01
		Fecha	14-10-2025

Periodo de recuperación	≈ 2.9 años	≈ 3.1 años
Comportamiento financiero	Positivo y rentable	Positivo
Nivel de riesgo	bajo	Moderado
Viabilidad financiera	Viable	Viable
Principal causa del resultado	Mejor retorno inversión	Mayores flujos positivos y mejor rentabilidad

Nota: La tabla fue elaborada por los autores con herramienta Excel.

El análisis técnico, energético y financiero desarrollado para el sistema de iluminación inteligente basado en sensores de ocupación y control KNX/DALI evidencia que la propuesta presenta viabilidad operativa, económica y tecnológica para su implementación en estacionamientos interiores de uso continuo. La integración de luminarias LED regulables, controladores DALI y sensores de ocupación permite optimizar dinámicamente los niveles de iluminación según las condiciones reales de utilización del parqueadero, reduciendo significativamente el consumo energético y mejorando la eficiencia operativa del sistema.

Desde el punto de vista financiero, los resultados obtenidos mediante el flujo de caja descontado para caso base demuestran que el proyecto presenta indicadores favorables de rentabilidad. El Valor Presente Neto positivo y la Tasa Interna de Retorno superior a la tasa de descuento utilizada evidencian que los ahorros energéticos generados compensan adecuadamente la inversión inicial y los costos de operación y mantenimiento del sistema. Asimismo, el período de recuperación de la inversión cercano a 3.1 años confirma la capacidad del proyecto para generar beneficios económicos sostenidos durante su vida útil.

En términos de sostenibilidad, la automatización del sistema de iluminación contribuye directamente a la disminución del consumo energético del estacionamiento mediante la reducción automática de los niveles lumínicos en zonas con baja ocupación. La incorporación de luminarias LED de alta eficacia luminosa y estrategias de regulación inteligente permite disminuir la demanda eléctrica y, consecuentemente, reducir el impacto ambiental asociado al consumo energético del edificio. Adicionalmente, la larga vida útil de las luminarias y la reducción de tiempos de operación a máxima potencia disminuyen las necesidades de mantenimiento y reposición de equipos.

Desde la perspectiva operativa, el sistema propuesto mejora la gestión y supervisión de la infraestructura de iluminación mediante monitoreo centralizado, control por zonas y capacidad de programación automática. La utilización de sensores de ocupación y controladores KNX/DALI permite adaptar continuamente el funcionamiento del sistema a las condiciones reales del estacionamiento, garantizando niveles adecuados de seguridad visual y confort para los usuarios. La arquitectura distribuida KNX también facilita labores de diagnóstico, mantenimiento y expansión futura del sistema.

En el ámbito normativo, la propuesta cumple con los lineamientos establecidos por ASHRAE para estacionamientos interiores, particularmente en lo relacionado con el uso de controles automáticos de

	INFORME FINAL TRABAJO DE GRADO ESPECIALIZACIÓN TIPO ARTÍCULO DEPARTAMENTO DE MECATRÓNICA Y ELECTROMECAÁNICA	Código	FDE 283
		Versión	01
		Fecha	14-10-2025

iluminación, reducción de potencia en zonas desocupadas y estrategias de eficiencia energética. Asimismo, la implementación de control DALI y automatización KNX se encuentra alineada con tendencias internacionales de edificios inteligentes y gestión eficiente de energía en infraestructura comercial.

Finalmente, el sistema presenta una alta capacidad de escalabilidad debido a la flexibilidad de la red KNX y la arquitectura direccionable DALI. La solución puede ampliarse fácilmente mediante la incorporación de nuevas luminarias, sensores, zonas de control y sistemas complementarios de automatización sin requerir modificaciones significativas en la infraestructura principal. Esta característica permite adaptar el sistema a futuras expansiones del estacionamiento o a nuevas estrategias de gestión energética y monitoreo inteligente.

En conjunto, los resultados obtenidos demuestran que la implementación del sistema inteligente de iluminación constituye una solución técnica y económicamente viable para aplicaciones en estacionamientos interiores, proporcionando beneficios significativos en eficiencia energética, sostenibilidad, operación y gestión automatizada de la infraestructura de iluminación.

4. DISCUSIÓN

Los resultados obtenidos en la presente investigación evidencian que la automatización del sistema de iluminación mediante tecnologías KNX, DALI y sensores de ocupación constituye una estrategia efectiva para mejorar la eficiencia energética en estacionamientos interiores, manteniendo simultáneamente las condiciones de seguridad y visibilidad exigidas por la normativa RETILAP. El sistema actual operaba de manera continua al 100 % de intensidad lumínica durante las 24 horas del día, generando un consumo anual estimado de 429,666.048 kWh, situación que confirmaba un uso ineficiente de la energía en zonas con ocupación variable.

La propuesta desarrollada permitió proyectar una reducción energética cercana al 31.1 % mediante estrategias de regulación automática basadas en ocupación, resultado que presenta coherencia con investigaciones previas reportadas en el estado del arte. Estudios como los de Chaudhari et al. (2024) y Wagiman et al. (2020) reportan reducciones entre el 25 % y el 45 % mediante sensores de ocupación, mientras que Cheng et al. (2020) obtuvieron ahorros aproximados del 36 % en aplicaciones reales utilizando sistemas inteligentes de iluminación. En este sentido, los resultados alcanzados en el presente estudio se encuentran dentro de los rangos esperados reportados en la literatura, validando la viabilidad técnica de la estrategia implementada.

Desde el punto de vista operativo, la investigación permitió evidenciar que la integración de tecnologías KNX y DALI proporciona ventajas significativas relacionadas con supervisión centralizada, escalabilidad y flexibilidad de operación. La regulación dinámica de luminarias según ocupación permitió adaptar los niveles lumínicos a las condiciones reales de uso del estacionamiento, optimizando el consumo energético sin afectar el confort visual ni la percepción de seguridad de los usuarios. Asimismo, la posibilidad de monitoreo en tiempo real facilita la detección de fallas, la programación de escenarios y la gestión eficiente del mantenimiento del sistema.

En el aspecto financiero, el análisis demostró que la implementación del sistema automatizado presenta indicadores favorables de rentabilidad, con un período de recuperación inferior a tres años y un Valor Presente Neto positivo, evidenciando que la reducción de costos energéticos compensa adecuadamente la inversión requerida. Estos resultados coinciden con otros estudios de modernización energética basados en iluminación LED y automatización, donde los periodos de retorno suelen encontrarse entre dos y cinco años dependiendo del nivel de automatización y las tarifas energéticas aplicadas.

	INFORME FINAL TRABAJO DE GRADO ESPECIALIZACIÓN TIPO ARTÍCULO DEPARTAMENTO DE MECATRÓNICA Y ELECTROMECAÁNICA	Código	FDE 283
		Versión	01
		Fecha	14-10-2025

Adicionalmente, el proyecto genera impactos positivos desde el punto de vista ambiental y social. La disminución del consumo energético implica una reducción indirecta de emisiones de CO₂ asociadas a la generación eléctrica, contribuyendo a estrategias de sostenibilidad y eficiencia energética en infraestructura comercial. De igual manera, la mejora de las condiciones de iluminación y supervisión incrementa la seguridad y confort de usuarios y operadores del estacionamiento, favoreciendo la experiencia de uso y la confiabilidad operativa del sistema. Finalmente, la implementación de este tipo de soluciones tecnológicas promueve la transición hacia edificios inteligentes y modelos de gestión energética más sostenibles dentro del sector comercial e industrial. (Lawrence et al., 2018)

5. CONCLUSIONES

El desarrollo del presente estudio permitió demostrar que la automatización del sistema de iluminación en los parqueaderos del centro comercial constituye una alternativa técnica y económicamente viable para mejorar la eficiencia energética y optimizar la operación del sistema. El diagnóstico realizado evidenció que el sistema existente operaba bajo condiciones de funcionamiento continuo al 100 % de intensidad lumínica, generando elevados consumos energéticos y limitando la posibilidad de implementar estrategias de ahorro y control inteligente.

A partir del análisis técnico desarrollado, se diseñó una propuesta de automatización basada en tecnologías KNX y DALI integrando sensores de ocupación, controladores de regulación y supervisión centralizada. La arquitectura planteada permitió establecer estrategias de control dinámico de iluminación adaptadas a las condiciones reales de ocupación y circulación vehicular del estacionamiento, garantizando simultáneamente el cumplimiento de los niveles mínimos de iluminación exigidos por el RETILAP para condiciones de seguridad y confort visual.

Los resultados energéticos obtenidos mostraron una reducción proyectada del 31.1 % en el consumo eléctrico asociado al sistema de iluminación, evidenciando el alto potencial de ahorro energético de las estrategias de regulación automática por ocupación en aplicaciones de estacionamientos interiores. Asimismo, se identificó que los mayores beneficios energéticos se concentran en los niveles subterráneos, debido a su mayor área operativa y cantidad de luminarias instaladas.

Desde el punto de vista financiero, el análisis de flujo de caja descontado para caso base evidenció que el proyecto presenta indicadores favorables de rentabilidad, obteniendo un Valor Presente Neto positivo, una Tasa Interna de Retorno superior a la tasa de descuento utilizada y un período de recuperación de la inversión cercano a 3.1 años. Estos resultados demuestran que los beneficios económicos generados por la reducción del consumo energético compensan adecuadamente los costos de implementación, operación y mantenimiento del sistema automatizado.

Finalmente, la investigación permitió concluir que la implementación de sistemas inteligentes de iluminación basados en tecnologías KNX/DALI representa una estrategia eficiente para la modernización energética de estacionamientos interiores, aportando beneficios significativos en eficiencia energética, sostenibilidad, supervisión operativa y optimización del mantenimiento. Asimismo, el estudio proporciona una metodología técnica y financiera replicable para futuras aplicaciones de automatización y gestión energética en infraestructura comercial e industrial.

CONTRIBUCIÓN DE AUTORÍA

	INFORME FINAL TRABAJO DE GRADO ESPECIALIZACIÓN TIPO ARTÍCULO DEPARTAMENTO DE MECATRÓNICA Y ELECTROMECAÁNICA		Código	FDE 283
			Versión	01
			Fecha	14-10-2025

Edinson Chaverra Villarreal: conceptualización de la investigación, recopilación y análisis de datos, diagnóstico técnico del sistema de iluminación, desarrollo del diseño de automatización, análisis energético y financiero, elaboración de figuras y redacción del manuscrito.

Daniel Hincapié Baena: apoyo en el diseño metodológico, validación de resultados y revisión crítica del contenido académico.

María Vilma García Buitrago: dirección y supervisión de la investigación, orientación metodológica, revisión académica del documento y validación final de los resultados y conclusiones del estudio.

CONFLICTOS DE INTERÉS

Los autores declaran que no existe ningún conflicto de intereses de tipo personal, académico, laboral, financiero o comercial que pueda influir en los resultados, análisis o conclusiones presentadas en esta investigación. Asimismo, se manifiesta que el desarrollo del estudio se realizó de manera objetiva e independiente, garantizando la transparencia y el rigor académico durante todas las etapas del proyecto.

DECLARACIÓN DE IA (Opcional)

Durante la realización de esta investigación, los autores utilizaron herramientas de inteligencia artificial como ChatGPT (OpenAI) para apoyo en la organización de información, mejora de redacción técnica, generación de figuras conceptuales y estructuración de contenido académico. Luego de emplear esta herramienta, los autores revisaron y editaron cuidadosamente el contenido según fue necesario y asumen total responsabilidad por el contenido de la publicación.

DISPONIBILIDAD DE DATOS

Los datos utilizados y analizados durante el desarrollo de esta investigación fueron obtenidos mediante visitas técnicas, levantamiento de información en campo, planos suministrados por el propietario del centro comercial y fichas técnicas de los equipos evaluados.

La información generada y utilizada en el estudio se encuentra disponible por parte de los autores previa solicitud razonable y únicamente con fines académicos o de investigación, respetando las restricciones de confidencialidad relacionadas con la infraestructura y operación del complejo comercial analizado.

6. REFERENCIAS

- Al-Ghaili, A. M., Kasim, H., Al-Hada, N. M., Othman, M., & Saleh, M. A. (2020). A Review: Buildings Energy Savings - Lighting Systems Performance. *IEEE Access*, 8, 76108–76119. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2020.2989237>
- ASHRAE Standard Project Committee 90.1. (2022). *Energy Standard for Sites and Buildings Except Low-Rise Residential Buildings (I-P Edition)*. www.ashrae.org/technology.
- Baharudin, N. H., Mansur, T. M. N. T., Ali, R., & Sobri, N. F. A. (2021). Smart lighting system control strategies for commercial buildings: A review. In *International Journal of Advanced Technology and Engineering Exploration* (Vol. 8, Number 74, pp. 45–53). Accent Social and Welfare Society. <https://doi.org/10.19101/IJATEE.2020.S2762173>
- Chaudhari, P., Xiao, Y., Cheng, M. M. C., & Li, T. (2024). Fundamentals, Algorithms, and Technologies of Occupancy Detection for Smart Buildings Using IoT Sensors. In *Sensors* (Vol. 24, Number 7). Multidisciplinary Digital Publishing Institute (MDPI). <https://doi.org/10.3390/s24072123>

	INFORME FINAL TRABAJO DE GRADO ESPECIALIZACIÓN TIPO ARTÍCULO DEPARTAMENTO DE MECATRÓNICA Y ELECTROMECAÁNICA		Código	FDE 283
			Versión	01
			Fecha	14-10-2025

- Cheng, Y., Fang, C., Yuan, J., & Zhu, L. (2020). Design and application of a smart lighting system based on distributed wireless sensor networks. *Applied Sciences (Switzerland)*, 10(23), 1–21. <https://doi.org/10.3390/app10238545>
- Gala, D., Khetan, S., & Mehendale, N. (2024). Assessing opportunities for enhanced lighting energy conservation via occupancy and daylight monitoring. *Measurement: Energy*, 3, 100015. <https://doi.org/10.1016/j.meane.2024.100015>
- Haq, M. A. U., Hassan, M. Y., Abdullah, H., Rahman, H. A., Abdullah, M. P., Hussin, F., & Said, D. M. (2014). A review on lighting control technologies in commercial buildings, their performance and affecting factors. In *Renewable and Sustainable Energy Reviews* (Vol. 33, pp. 268–279). <https://doi.org/10.1016/j.rser.2014.01.090>
- Hrmo, L., Ždánsky, J., Brtiš, J., & Kovačovič, P. (2025). The Implementation of a Control System for an Administrative Building Using the KNX Standard. *Proceedings of the 2025 26th International Carpathian Control Conference, ICC 2025*. <https://doi.org/10.1109/ICCC65605.2025.11022888>
- Jin, Y., Yan, D., Zhang, X., An, J., & Han, M. (n.d.). *A data-driven model predictive control for lighting system based on historical occupancy in an office building: Methodology development*.
- Kim, J., & Choi, A. (2023). Reduction of lighting power consumption through lighting control using the KNX/digital addressable lighting interface protocol in liquefied natural gas carrier accommodation mock-up. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 182. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2023.113374>
- KNX Association. (1999). *The worldwide standard for home and building control*. <https://www.knx.org/>.
- Lawrence, Tom., Darwich, A. K. ., & Means, J. K. . (2018). *ASHRAE GreenGuide : design, construction, and operation of sustainable buildings*. ASHRAE.
- Ministerio De Minas Y Energia. (2024). Resolución_40117_de_2024_RETIE. *Documento Publico*.
- Ministerio De Minas Y Energía. (2024). Resolución_40150_de_2024_compilada_con_los_cuatro_libros_RETILAB. *Documento Publico*.
- Schneider Electric. (2024). *spaceLYnk LSS100200 – ficha técnica*. Schneider Electric. <https://www.se.com>.
- Trivedi, D., & Badarla, V. (2020). Occupancy detection systems for indoor environments: A survey of approaches and methods. In *Indoor and Built Environment* (Vol. 29, Number 8, pp. 1053–1069). SAGE Publications Ltd. <https://doi.org/10.1177/1420326X19875621>
- Wagiman, K. R., Abdullah, M. N., Hassan, M. Y., Mohammad Radzi, N. H., Abu Bakar, A. H., & Kwang, T. C. (2020). Lighting system control techniques in commercial buildings: Current trends and future directions. In *Journal of Building Engineering* (Vol. 31). Elsevier Ltd. <https://doi.org/10.1016/j.job.2020.101342>
- Wagiman, K. R., Abdullah, M. N., Hassan, M. Y., & Radzi, N. H. M. (2020). A new optimal light sensor placement method of an indoor lighting control system for improving energy performance and visual comfort. *Journal of Building Engineering*, 30. <https://doi.org/10.1016/j.job.2020.101295>
- Zúñiga, M. R., Osorio, L. C., & Prada, C. I. (2022). *ANÁLISIS DE LITERATURA ACADÉMICA SOBRE VALORACIÓN DE EMPRESAS A TRAVÉS DEL MÉTODO DE FLUJO DE CAJA DESCONTADO*.

7. PERMISOS Y AUTORIZACIONES

Los estudiantes abajo firmantes, en calidad de coautores, autorizan a los docentes participantes del artículo presentado en versión borrador, con el fin de completarlo, adaptarlo y postularlo a revistas

	INFORME FINAL TRABAJO DE GRADO ESPECIALIZACIÓN TIPO ARTÍCULO DEPARTAMENTO DE MECATRÓNICA Y ELECTROMECAÁNICA	Código	FDE 283
		Versión	01
		Fecha	14-10-2025

científicas, congresos o eventos académicos. Esta autorización no implica cesión de los derechos morales, por lo que los estudiantes deberán ser reconocidos como coautores en cualquier publicación, presentación o difusión derivada de este trabajo.

Como prueba de lo anterior los estudiantes firman el siguiente documento:

Nombre Estudiante: Edinson Chaverra Villarreal

Firma: *Edinson Chaverra Villarreal*

Cédula:1020443949

Fecha: 25 de mayo de 2026

Correo Electrónico: edinsonchaverra1127860@correo.itm.edu.co