



TECNOLÓGICO DE ESTUDIOS SUPERIORES DE CHICULOAPAN

INGENIERÍA EN ENERGÍAS RENOVABLES

Automatización de luminarias en oficina industrial mediante interruptor de horario digital y etapa de potencia regulable

Tesis profesional

Que para obtener el Grado de
Ingeniero en Energías Renovables

P R E S E N T A

Saúl Uriel Álvarez Ruiz
Director: Dr. Michael Jossué Rojas García



Chicoloapan de Juárez, Estado de México a 15 de abril de 2026



Presentación y directorio de los asesores

El presente trabajo realizado bajo de la modalidad de Tesis Profesional, titulado **“Automatización de luminarias en oficina industrial mediante interruptor de horario digital y etapa de potencia regulable”** y que ha sido realizado por el alumno **Saúl Uriel Álvarez Ruiz** con matrícula 20020039 ha sido aprobado al igual que aceptado como requisito para obtener el grado de **Licenciatura** en:

Ingeniería en Energías Renovables

Director:

Dr. Michael Jossué Rojas García

Revisor:

Dr. Daniel Hernández Rivera

Revisor:

Dr. José Eduardo Santana Sánchez

Tecnológico de Estudios Superiores de Chicoloapan

Ingeniería en Energías Renovables

Por medio del presente documento, **Saúl Uriel Álvarez Ruiz**, con matrícula **20020039**, en mi carácter de **autor y titular de los derechos patrimoniales** de la tesis profesional titulada:

"Automatización de luminarias en oficina industrial mediante interruptor de horario digital y etapa de potencia regulable"

DECLARO que:

1. Soy el único autor y titular de los derechos de autor de la obra antes mencionada, la cual es original y no infringe derechos de terceros.
2. **AUTORIZO** al Tecnológico de Estudios Superiores de Chicoloapan (TESCH) para que, de manera gratuita, no exclusiva y sin limitación de tiempo, realice la reproducción, distribución, comunicación pública y puesta a disposición de mi tesis en formato físico y/o digital, con fines exclusivamente académicos y de investigación, dentro y fuera del plantel, incluyendo su inclusión en el repositorio institucional y en catálogos bibliotecarios.
3. El TESCH podrá utilizar la obra siempre que se **reconozca mi autoría**, y no se realicen modificaciones sustanciales sin mi consentimiento previo.
4. La presente autorización no implica la cesión total de mis derechos de autor, por lo que podré utilizar mi obra con fines comerciales o académicos en otros contextos, siempre que no afecte los fines institucionales del TESCH.
5. **ENTIENDO Y ACEPTO** que el TESCH no se hace responsable del uso indebido que terceros pudieran hacer de la obra, siendo mi responsabilidad la defensa de mis derechos en caso de ser necesario.

Datos del autor:

- **Nombre completo:** Saúl Uriel Álvarez Ruiz
- **Matrícula:** 20020039
- **Programa académico:** Ingeniería en Energías Renovables
- **FIRMA:** _____

I. Agradecimientos

Quiero expresar mi más profundo agradecimiento a las personas más importantes de mi vida, quienes han sido mi apoyo, mi inspiración y mi fortaleza para llegar hasta este momento tan significativo.

A mi madre, gracias por ser una mujer admirable, por tu amor incondicional, tu entrega, tu paciencia y por cada esfuerzo que has hecho por mí a lo largo de mi vida. Gracias por estar presente en cada etapa, por tus consejos, tus palabras de aliento y por no dejarme caer en los momentos difíciles. Tu apoyo ha sido fundamental para que hoy pueda alcanzar esta meta. Este logro también te pertenece, porque detrás de cada paso que he dado siempre han estado tu amor, tu sacrificio y tu confianza en mí.

A mi padre, aunque ya no estés físicamente conmigo, quiero dedicarte este logro con todo mi corazón. Gracias por haber formado parte de mi vida, por tus enseñanzas, tu esfuerzo, tu amor y por todos los valores que sembraste en mí. Tu ausencia ha sido una de las pruebas más difíciles, pero también una razón poderosa para seguir adelante y esforzarme por cumplir mis metas. Me hubiera gustado profundamente que estuvieras aquí para presenciar este momento, compartir conmigo la alegría de este triunfo y poder decirte en persona que una parte muy importante de lo que soy te la debo a ti. Aunque no pueda verte ni escucharte, sigues presente en mi corazón, en mis recuerdos y en cada paso que doy. Este trabajo va dedicado a ti, con amor, respeto y nostalgia, porque siempre serás una parte esencial de mi vida y de mi historia.

A mi novia, gracias por acompañarme durante este camino, por tu paciencia, tu cariño, tu comprensión y por estar a mi lado en los momentos de cansancio, estrés y dificultad. Gracias por escucharme, motivarme, creer en mí y transmitirme tranquilidad cuando más lo necesitaba. Tu apoyo y tu constante compañía fueron fundamentales para que pudiera continuar y concluir esta etapa. Gracias por compartir conmigo este proceso y por ser una persona tan especial en mi vida.

Hoy, al finalizar este trabajo, entiendo que este logro no es solamente mío, sino también de quienes me sostuvieron, me impulsaron y caminaron conmigo de diferentes maneras. Por ello, dedico estas palabras con todo mi corazón a cada uno de ustedes, porque su amor, su respaldo y su luz en mi vida han sido la base para convertirme en la persona que soy y para

alcanzar

esta

meta

tan

importante.

II. Resumen

La iluminación artificial en oficinas industriales constituye un componente significativo del consumo eléctrico, representando entre el 15 % y el 30 % de la demanda total de energía en edificios del sector terciario-industrial (IDAE, 2019; Siverio Valle et al., 2021). A pesar de los avances en eficiencia lumínica de las tecnologías LED, la operación sin sistemas de control automatizados genera un desperdicio energético evitable estimado entre el 30 % y el 40 % (Mondal et al., 2024; Godase et al., 2025). En respuesta a esta problemática, el presente trabajo desarrolla un estudio teórico-comparativo, basado en simulación computacional, para evaluar el potencial de ahorro energético y la viabilidad técnico-económica de tres metodologías de control aplicadas a una oficina industrial modelo, equipada con 20 luminarias LED (800 W nominales). Las metodologías evaluadas son: (M1) control horario fijo mediante interruptor digital; (M2) control horario combinado con atenuación PWM fija; y (M3) control horario combinado con atenuación PWM programada según perfil de ocupación. La etapa de potencia se modela mediante un convertidor Buck conmutado, cuyas curvas de eficiencia en función del ciclo de trabajo se obtienen mediante simulación en PSIM. La lógica de control, los perfiles de ocupación y el cálculo de consumos anuales se implementan en Python (empleando las librerías NumPy, SciPy y Pandas), mientras que la supervisión y visualización de variables se desarrolla en NetBeans mediante una aplicación Java que simula un entorno SCADA industrial. Los resultados de simulación, con un caso base realista (jornada laboral de 12 h, 260 días y factor de olvido del 20 %), indican que la metodología M2 (atenuación fija) alcanza el mayor ahorro energético con un 38.57 %, seguida muy de cerca por M3 (37.40 %) y M1 (23.21 %). Los periodos de retorno de inversión (PRS) son de 0.58 años para M1, y de aproximadamente 0.80 años para M2 y M3, lo que demuestra la viabilidad económica de todas las soluciones. Aunque M2 es ligeramente superior en ahorro energético, M3 ofrece una mayor flexibilidad para adaptarse a futuros cambios en los perfiles de ocupación. Se concluye que la estrategia híbrida de interruptor horario con atenuación (fija o programable) ofrece el equilibrio más favorable entre ahorro energético, costo de implementación y tiempo de recuperación, constituyendo una solución tecnológicamente accesible y económicamente atractiva que, al reducir la demanda eléctrica, facilita el dimensionamiento y la integración de sistemas de generación con energías renovables. La inclusión de la interfaz SCADA en

NetBeans proporciona además una herramienta de monitorización con potencial de ser extendida a sistemas de gestión de energía en tiempo real.

Palabras clave: automatización, control horario, modulación por ancho de pulso (PWM), convertidor Buck, eficiencia energética, simulación PSIM, Python, SCADA

III. Abstract

Artificial lighting in industrial offices constitutes a significant component of electricity consumption, representing between 15% and 30% of the total energy demand in tertiary-industrial sector buildings (IDAE, 2019; Siverio Valle et al., 2021). Despite advances in the luminous efficacy of LED technologies, operation without automated control systems generates avoidable energy waste estimated between 30% and 40% (Mondal et al., 2024; Godase et al., 2025). In response to this problem, this work develops a theoretical-comparative study, based on computer simulation, to evaluate the energy-saving potential and the techno-economic feasibility of three control methodologies applied to a model industrial office equipped with 20 LED luminaires (800 W nominal). The evaluated methodologies are: (M1) fixed-time control using a digital timer; (M2) time control combined with fixed PWM dimming; and (M3) time control combined with PWM dimming programmed according to an occupancy profile. The power stage is modeled as a switched Buck converter, whose efficiency curves as a function of duty cycle are obtained through PSIM simulation. The control logic, occupancy profiles, and annual consumption calculations are implemented in Python (using the NumPy, SciPy, and Pandas libraries), while the supervision and visualization of variables are developed in NetBeans through a Java application that simulates an industrial SCADA environment. The simulation results, with a realistic baseline case (12-hour workday, 260 days, and a 20% forgetting factor), indicate that methodology M2 (fixed dimming) achieves the highest energy savings at 38.57%, followed very closely by M3 (37.40%) and M1 (23.21%). The simple payback periods (SPP) are 0.58 years for M1, and approximately 0.80 years for M2 and M3, demonstrating the economic viability of all solutions. Although M2 is slightly superior in energy savings, M3 offers greater flexibility to adapt to future changes in occupancy profiles. It is concluded that the hybrid timer-switch strategy with dimming (fixed or programmable) offers the most favorable balance between energy savings, implementation cost, and recovery time, constituting a technologically accessible and economically attractive solution that, by reducing electricity demand, facilitates the sizing and integration of renewable energy generation systems. The inclusion of the SCADA interface in NetBeans also provides a monitoring tool with the potential to be extended to real-time energy management systems.

Keywords: lighting automation, time control, pulse width modulation (PWM), Buck converter,

energy efficiency, PSIM simulation, Python, SCADA, NetBeans.

Índice

I. Agradecimientos4

II. Resumen6

III. Abstract8

Índice de Tablas14

Índice de Figuras15

Lista de Acrónimos16

1. Introducción24

1.1 Contexto y problemática energética en iluminación industrial24

1.2 Soluciones convencionales y sus limitaciones25

1.3 Propuesta de la tesis25

1.4 Justificación del enfoque en energías renovables26

1.5 Comparación de metodologías de control28

1.6 Aportaciones del trabajo29

1.7 Limitaciones y alcance del trabajo30

1.8 Estructura del documento30

2. Antecedentes32

2.1 Normativas y estándares aplicables32

2.2 Eficiencia energética e iluminación LED33

2.3 Sistemas de control y automatización34

2.4 Electrónica de potencia y atenuación34

2.5 Domótica e integración IoT en edificios inteligentes35

2.6 Simulación computacional y herramientas de código abierto;Error! Marcador no definido.

2.7 Casos de estudio aplicados36



2.8 Tendencias futuras: Control predictivo e inteligencia artificial37

3. Marco teórico39

3.1 Fundamentos de iluminación y fotometría39

3.2 Marco normativo mexicano aplicable42

3.3 Tecnologías de fuentes de luz para oficinas industriales44

3.4 Estrategias de control de iluminación46

3.5 Electrónica de potencia para acondicionamiento de LEDs48

3.6 Modelado matemático de sistemas de control53

3.7 Arquitectura de software y herramientas de simulación57

3.8 Indicadores de evaluación económica59

4. Planteamiento del problema60

4.1 Contexto y magnitud del problema energético60

4.2 Relevancia para las energías renovables62

4.3 Deficiencias de las soluciones existentes y justificación de la hibridación63

4.4 Formalización del problema técnico64

4.5 Identificación de la laguna de conocimiento65

4.6 Formulación de las preguntas de investigación66

5. Hipótesis67

5.1 Definición del criterio de aceptación de hipótesis68

5.2 Hipótesis de trabajo (Hipótesis alternativa, H_1)68

5.3 Hipótesis de ahorro energético ($H_{1.1}$)68

5.4 Hipótesis de viabilidad económica ($H_{1.2}$)69

5.5 Hipótesis de eficiencia de la etapa de potencia ($H_{1.3}$)70

5.6 Hipótesis nula (H_0)70

5.7 Hipótesis tecnológica sobre la interfaz SCADA ($H_{1.4}$)70

6. Objetivos71

6.1 Objetivo General71

6.2 Objetivos Específicos72

7. Justificación74

7.1 Justificación técnica74

7.2 Justificación económica y social75

7.3 Justificación ambiental76

7.4 Vinculación con la Ingeniería en Energías Renovables77

8. Metodología78

8.1 Introducción a la metodología78

8.2 Fase 1: Caracterización formal del caso de estudio (OE1)79

8.2.1 Definición del sistema de iluminación tipo79

8.2.2 Parámetros temporales del caso base80

8.2.3 Perfil de ocupación normalizada80

8.2.5 Generación de perfiles de ciclo de trabajo D_k 81

8.3 Fase 2: Simulación en PSIM del convertidor Buck (OE2)82

8.3.1 Modelo del circuito y parámetros de diseño82

8.3.2 Validación del modelo de simulación (Teorema de consistencia)86

8.3.3 Protocolo de barrido paramétrico86

8.3.4. Interpolación de la eficiencia (Teorema de error)87

8.4 Fase 3: Implementación del motor de cálculo numérico en Python (OE3)88

8.4.1 Entorno y librerías88

8.4.2 Estructura del algoritmo de simulación88

8.4.3 Representación gráfica del algoritmo91

8.5 Fase 4: Desarrollo de la interfaz SCADA en NetBeans (OE4)92

8.5.1 Arquitectura del software92

8.5.2 Componentes de la interfaz92

8.5.3 Protocolo de comunicación93

8.6 Fase 5: Ejecución del protocolo comparativo y análisis de sensibilidad (OE5)93

8.6.1 Experimentos nominales94

8.6.2 Análisis de sensibilidad factorial95

8.7 Fase 6: Validación de resultados y documentación (OE6) ¡Error! Marcador no definido.

9. Resultados y Análisis96

9.1 Resultados de la simulación en PSIM (Etapa de potencia)97

9.1.1 Curva de eficiencia del convertidor Buck97

9.1.2 Formas de onda de conmutación101

9.2 Resultados de la simulación en Python (Consumos y métricas económicas)102

9.2.1 Consumos energéticos anuales102

9.2.2 Evaluación económica104

9.3 Análisis de sensibilidad104

9.4 Resultados de la interfaz SCADA106

9.5 Discusión integradora de resultados108

9.5.1 Interpretación de la ventaja de M2 sobre M3108

9.5.2 Comparación con la literatura y casos de estudio109

9.5.3 Implicaciones prácticas para el diseño de sistemas de iluminación110

9.5.4 Limitaciones del estudio y fuentes de incertidumbre111

10. Conclusiones y Recomendaciones112

10.1 Cumplimiento de objetivos112

10.2 Validación de hipótesis y síntesis de resultados numéricos114

10.3 Contribución a la Ingeniería en Energías Renovables116

10.4 Recomendaciones para la implementación práctica117

10.5 Líneas de trabajo futuro119

Referencias121

Anexos124

Anexo A: Códigos Fuente124

Anexo B: Guía de Simulación en PSIM142

Anexo C: Archivos de Resultados Generados143

Anexo E: Especificaciones Técnicas de Componentes;Error! Marcador no definido.

Anexo F: Glosario de Términos;Error! Marcador no definido.

Índice de Tablas

Tabla 1. Descripción de las metodologías de control evaluadas	28
Tabla 2. Niveles de iluminación mínima según la NOM-025-STPS-2008	42
Tabla 3. Comparativa entre iluminación fluorescente T8 y LED para una luminaria de flujo equivalente.....	45
Tabla 4. Componentes del Convertidor Buck	85
Tabla 5. Parámetros del Sistema de Iluminación para el caso de estudio	94
Tabla 6. Eficiencia del convertidor Buck en función del ciclo de trabajo ($f_s=100$ kHz, $V_{in}=170$ V, $I_{LED}=16.67$ A).	97
Tabla 7. Consumos Energéticos, ahorros y reducción de emisiones.....	102
Tabla 8. Indicadores económicos para las tres metodologías	104
Tabla 9. PRS para M2 bajo diferentes escenarios.....	105
Tabla 10. Resumen de resultados numéricos para las tres metodologías.....	114
Tabla 11. Validación de la hipótesis	114

Índice de Figuras

Figura 2. Algoritmo de la solución del problema.

Figura 3. Diagrama de flujo del algoritmo principal.

Figura 1. Esquema de Convertidor Buck para accionamiento de LEDs..... 49

Figura 4. Curva de eficiencia del convertidor Buck..... 92

Figura 5. Formas de onda de voltaje y corriente del convertidor Buck. 94

Figura 6. Perfil de potencia instantánea..... 97

Figura 7. Captura de pantalla del sistema SCADA..... 101

Lista de Acrónimos

Acrónimo	Significado
AC	Corriente Alterna (Alternating Current)
AI	Inteligencia Artificial (Artificial Intelligence)
ANFIS	Sistema de Inferencia Neuro-Difuso Adaptativo (Adaptive Neuro-Fuzzy Inference System)
ANN	Red Neuronal Artificial (Artificial Neural Network)
API	Interfaz de Programación de Aplicaciones (Application Programming Interface)
BMS	Sistema de Gestión de Edificios (Building Management System)
CCM	Modo de Conducción Continua (Continuous Conduction Mode)
CCT	Temperatura de Color Correlacionada (Correlated Color Temperature)
CFE	Comisión Federal de Electricidad
CIE	Comisión Internacional de Iluminación

Acrónimo	Significado
	(International Commission on Illumination)
CNN	Red Neuronal Convolucional (Convolutional Neural Network)
CONUEE	Comisión Nacional para el Uso Eficiente de la Energía
CRI	Índice de Rendimiento Cromático (Color Rendering Index)
CSV	Valores Separados por Comas (Comma-Separated Values)
DC	Corriente Continua (Direct Current)
DCM	Modo de Conducción Discontinua (Discontinuous Conduction Mode)
DHT	Sensor de Temperatura y Humedad (Digital Humidity and Temperature)
EDT	Hilo de Despacho de Eventos (Event Dispatch Thread)
EMI	Interferencia Electromagnética (Electromagnetic Interference)
EMS	Sistema de Gestión de Energía (Energy Management System)

Acrónimo	Significado
ESR	Resistencia Serie Equivalente (Equivalent Series Resistance)
EV	Vehículo Eléctrico (Electric Vehicle)
GaN	Nitruro de Galio (Gallium Nitride)
GPIO	Entrada/Salida de Propósito General (General Purpose Input/Output)
GPS	Sistema de Posicionamiento Global (Global Positioning System)
GSM	Sistema Global para Comunicaciones Móviles (Global System for Mobile Communications)
GUI	Interfaz Gráfica de Usuario (Graphical User Interface)
HMI	Interfaz Hombre-Máquina (Human-Machine Interface)
IDE	Entorno de Desarrollo Integrado (Integrated Development Environment)
IDAE	Instituto para la Diversificación y Ahorro de la Energía
IEEE	Instituto de Ingenieros Eléctricos y

Acrónimo	Significado
	Electrónicos (Institute of Electrical and Electronics Engineers)
IIoT	Internet Industrial de las Cosas (Industrial Internet of Things)
IMU	Unidad de Medición Inercial (Inertial Measurement Unit)
IoT	Internet de las Cosas (Internet of Things)
IP	Protocolo de Internet (Internet Protocol)
IRC	Índice de Rendimiento Cromático
ISO	Organización Internacional de Normalización (International Organization for Standardization)
JSON	Notación de Objetos JavaScript (JavaScript Object Notation)
L70	Tiempo hasta que el flujo luminoso disminuye al 70 % de su valor inicial
LC	Inductor-Capacitor (Filtro)
LED	Diodo Emisor de Luz (Light Emitting Diode)
LiDAR	Detección y Rango por Luz (Light Detection

Acrónimo	Significado
	and Ranging)
LSTM	Memoria a Largo Plazo (Long Short-Term Memory)
M1	Metodología 1: Control horario fijo
M2	Metodología 2: Control horario + atenuación fija al 80 %
M3	Metodología 3: Control horario + atenuación programada
MAE	Error Absoluto Medio (Mean Absolute Error)
mAP	Precisión Media Promedio (mean Average Precision)
MATLAB	Laboratorio de Matrices (Matrix Laboratory)
MES	Sistema de Ejecución de Manufactura (Manufacturing Execution System)
ML	Aprendizaje Automático (Machine Learning)
MOSFET	Transistor de Efecto de Campo de Óxido Metálico-Semiconductor (Metal-Oxide-Semiconductor Field-Effect Transistor)
MQTT	Transporte de Telemetría por Cola de

Acrónimo	Significado
	Mensajes (Message Queuing Telemetry Transport)
MVC	Modelo-Vista-Controlador (Model-View-Controller)
MXN	Peso Mexicano
NLC	Control de Iluminación en Red (Networked Lighting Control)
NOM	Norma Oficial Mexicana
OCR	Reconocimiento Óptico de Caracteres (Optical Character Recognition)
ODS	Objetivos de Desarrollo Sostenible
OPC	Comunicaciones de Procesos OLE (OLE for Process Control)
PAR	Radiación Fotosintéticamente Activa (Photosynthetically Active Radiation)
PCB	Placa de Circuito Impreso (Printed Circuit Board)
PFC	Corrección del Factor de Potencia (Power Factor Correction)

Acrónimo	Significado
PID	Proporcional-Integral-Derivativo
PIR	Infrarrojo Pasivo (Passive Infrared)
PLC	Controlador Lógico Programable (Programmable Logic Controller)
PRS	Periodo de Retorno Simple (Simple Payback Period)
PSIM	Software de Simulación de Potencia (Power Simulation)
PWM	Modulación por Ancho de Pulso (Pulse Width Modulation)
RF	Radiofrecuencia (Radio Frequency)
RGB	Rojo-Verde-Azul (Red-Green-Blue)
RMS	Valor Eficaz (Root Mean Square)
ROI	Retorno de Inversión (Return on Investment)
ROS	Sistema Operativo de Robots (Robot Operating System)
RS-485	Estándar de Comunicación Serial
RTOS	Sistema Operativo de Tiempo Real (Real-

Acrónimo	Significado
	Time Operating System)
SCADA	Control y Adquisición de Datos (Supervisory Control and Data Acquisition)
SENER	Secretaría de Energía
SEPIC	Convertidor Primario Inductor de Extremo Único (Single-Ended Primary Inductor Converter)
STPS	Secretaría del Trabajo y Previsión Social
TCP/IP	Protocolo de Control de Transmisión/Protocolo de Internet (Transmission Control Protocol/Internet Protocol)
THD	Distorsión Armónica Total (Total Harmonic Distortion)
VLC	Comunicación por Luz Visible (Visible Light Communication)
WSN	Red de Sensores Inalámbricos (Wireless Sensor Network)

1. Introducción

1.1 Contexto y problemática energética en iluminación industrial

El sector industrial y de servicios representa un porcentaje mayoritario del consumo eléctrico a nivel mundial. Dentro de los consumos internos de un edificio o nave industrial, la iluminación ocupa típicamente entre el 15 % y el 25 % de la energía total, aunque en oficinas técnicas, salas de control o áreas administrativas integradas en entornos industriales este valor puede superar el 30 % debido a jornadas laborales extendidas y a la ausencia de sistemas de control automático (Muthusamy et al., 2025).

La iluminación ineficiente no solo impacta la factura eléctrica, sino que también contribuye significativamente a la huella de carbono y al calentamiento global. En México, el sector industrial representa aproximadamente el 30 % de la demanda total de electricidad, y la iluminación es responsable de una fracción sustancial de este consumo (Velkov, 2025). Por esta razón, la automatización del alumbrado se ha convertido en una línea de acción prioritaria en programas de eficiencia energética a nivel mundial (Bhoi et al., 2025; Jagadeesh et al., 2026).

En particular, las oficinas ubicadas dentro de naves industriales presentan una problemática específica: a menudo comparten el sistema eléctrico con la planta productiva, carecen de submedición, y sus horarios de ocupación son variables (entradas y salidas escalonadas, horas extra, turnos de mantenimiento, etc.). La solución más común es mantener las luminarias encendidas durante toda la jornada laboral nominal (por ejemplo, de 8:00 a 18:00).

e incluso más tiempo por olvido o falta de hábito de apagado. Esto genera un desperdicio energético evitable que puede superar el 40 % del consumo real necesario en instalaciones sin control automatizado (Muthusamy et al., 2025; Balamurugan et al., 2026).

1.2 Soluciones convencionales y sus limitaciones

Para reducir este desperdicio, existen en el mercado diversas tecnologías de control, cada una con ventajas y limitaciones específicas (Pallapati, 2026; Sarvar et al., 2025), por ejemplo, interruptores horarios analógicos o digitales que permiten programar horarios fijos de encendido y apagado, estos son de bajo costo y fáciles de instalar (Gupta et al., 2026; Jagadeesh et al., 2026), su principal desventaja es que no se adaptan a cambios en la ocupación (reuniones fuera del horario, días festivos, ausencias por capacitación) y no regulan el nivel de iluminación. Sensores de presencia (PIR o microondas), estos sensores encienden las luces solo cuando detectan movimiento y las apagan tras un tiempo de espera (Muthusamy et al., 2025; Balamurugan et al., 2026), ofrecen un ahorro muy alto, pero su costo es mayor y pueden provocar falsos apagados si el usuario permanece inmóvil (ej. trabajando en computadora). Sistemas de regulación (dimmers), estos dispositivos electrónicos atenúan las luminarias para aprovechar luz natural o reducir el flujo en horarios de baja actividad (Pallapati, 2026; Sarvar et al., 2025). Los dimmers de corte de fase (triac) son económicos pero generan armónicos y no son compatibles con todos los LEDs, mientras, los dimmers PWM (modulación por ancho de pulso) son más eficientes pero requieren electrónica de potencia adicional (Gokulnaath et al., 2026; Kotb et al., 2023).

Aunque todas estas soluciones presentan alto índice de aprovechamiento existen limitaciones de las soluciones aisladas, ninguna de estas soluciones es perfecta por sí sola. Un interruptor horario no ahorra cuando la oficina está vacía en horario laboral; un sensor de presencia no puede prender las luces antes de que el usuario entre si no hay movimiento previo; y un dimmer sin temporización desperdiciaría energía si se olvida encendido (Muthusamy et al., 2025). Esta constatación motiva la búsqueda de soluciones híbridas que combinen las ventajas de cada tecnología.

1.3 Propuesta de la tesis

El presente estudio propone, modela y evalúa teóricamente un sistema híbrido de automatización que integra, en cascada, un interruptor horario digital y una etapa de potencia regulable por PWM. La arquitectura propuesta consiste en:

1. Una etapa de habilitación gruesa implementada con un temporizador comercial, que define una ventana temporal de operación (ej. 7:30 a 19:00), garantizando que fuera de ese intervalo la alimentación de las luminarias esté completamente interrumpida (Gupta et al., 2026; Jagadeesh et al., 2026).
2. Una etapa de ajuste fino basada en un convertidor Buck controlado por PWM, que introduce un ciclo de trabajo $D(t) \in [0,1]$ variable en el tiempo, de modo que la potencia instantánea entregada a las luminarias sea $P(t) = P_{\text{nom}} \cdot D(t) \cdot u_{\text{time}}(t)$ (Pallapati, 2026; Sarvar et al., 2025).

Dado que no se dispone de acceso a una instalación real para pruebas experimentales, la validación se realiza mediante un flujo de simulación e implementación de software distribuido:

- **PSIM** se emplea para el diseño detallado de la etapa de potencia (convertidor Buck con MOSFET, diodo Schottky, inductor), obteniendo curvas de eficiencia $\eta(D)$ y pérdidas por conmutación para distintos ciclos de trabajo (Pallapati, 2026; Sarvar et al., 2025).
- **Python** se utiliza para implementar la lógica de control del interruptor horario, los perfiles de ocupación deterministas, y el cálculo del consumo energético anual integrando la eficiencia $\eta(D)$ obtenida en PSIM (Bhoi et al., 2025; Joshua et al., 2026).
- **NetBeans (Java)** se emplea para el desarrollo de una interfaz SCADA que simula un centro de supervisión, visualizando en tiempo real el estado de las luminarias, la potencia consumida, la energía acumulada y las alarmas operativas (Jagadeesh et al., 2026; Gupta et al., 2026).

Este enfoque metodológico no solo es congruente con las prácticas de investigación en electrónica de potencia, sino que además aporta un componente de ingeniería de software (SCADA) que dota al proyecto de una aplicabilidad directa en el ámbito de la automatización industrial (Jagadeesh et al., 2026; Bhoi et al., 2025).

1.4 Justificación del enfoque en energías renovables

El presente trabajo se enmarca en el ámbito de la Ingeniería en Energías Renovables al abordar la eficiencia energética como piedra angular para la transición hacia sistemas sostenibles. La relación entre la automatización propuesta y las energías renovables puede articularse en tres niveles:

1. **Reducción de la demanda como paso previo al dimensionamiento renovable:** La automatización y reducción de la demanda eléctrica en iluminación no solo disminuye el consumo y los costos operativos, sino que también reduce la capacidad necesaria de generación renovable (por ejemplo, paneles solares fotovoltaicos) para cubrir la carga (Joshua et al., 2026; Islam et al., 2025). Un sistema de iluminación que consume 800 W nominales, pero que opera con un perfil de atenuación que reduce su consumo promedio a menos de 500 W, requerirá un sistema fotovoltaico de menor capacidad, lo que reduce significativamente la inversión inicial en paneles, inversores y baterías (Velkov, 2025; Balamurugan et al., 2026).
2. **Maximización de la autonomía en sistemas aislados:** En aplicaciones industriales que operan con sistemas renovables aislados (off-grid), cada vatio-hora ahorrado mediante control inteligente prolonga la autonomía del sistema y reduce la profundidad de descarga de las baterías, extendiendo su vida útil (Joshua et al., 2026; Islam et al., 2025). La estrategia de atenuación programada permite ajustar el consumo a la disponibilidad de generación renovable, mejorando la eficiencia global del sistema.
3. **Viabilidad técnico-económica de la integración renovable:** La reducción de la demanda mediante estrategias de bajo costo (inversión < \$2,000 MXN) mejora el periodo de retorno de una eventual instalación fotovoltaica, ya que el ahorro energético generado por la automatización se suma al ahorro generado por la energía renovable (Velkov, 2025; Bhoi et al., 2025). Esta sinergia hace que la combinación de eficiencia energética y energías renovables sea mucho más atractiva económicamente que cada medida por separado.

Por tanto, el control horario y la atenuación PWM propuestos constituyen una estrategia de gestión de la demanda que maximiza la autonomía y el rendimiento de un eventual sistema híbrido con fuentes renovables, alineándose con los objetivos de la Ingeniería en Energías Renovables de optimizar el uso de los recursos energéticos y reducir la dependencia de combustibles fósiles (Velkov, 2025; Balamurugan et al., 2026).

1.5 Comparación de metodologías de control

El núcleo de la aportación teórica es la comparación sistemática de al menos tres metodologías de control aplicadas a la misma oficina industrial tipo. La Tabla 1 resume las características de cada metodología.

Tabla 1. Descripción de las metodologías de control evaluadas

Clave	Metodología	Señal de control	Herramientas de implementación
M1	Control horario fijo	$u(t) = u_{\text{time}}(t); D(t) = 1$	Python: función booleana con librería datetime; NetBeans: visualización ON/OFF
M2	Control horario + atenuación fija	$u(t) = u_{\text{time}}(t); D(t) = D_0$ (ej. 0.8)	PSIM: barrido de D para obtener $\eta(D)$; Python: cálculo con D_0 constante
M3	Control horario + atenuación programada	$u(t) = u_{\text{time}}(t); D(t)$ variable según perfil de ocupación	Python: máquina de estados con temporizadores discretos; NetBeans: panel de control con indicador de D actual

Para cada metodología se calculan:

- Consumo energético diario y anual (kWh), usando un modelo de carga LED de 40 W por luminaria, con 20 luminarias totales (800 W nominales).
- Ahorro respecto al caso base (sin automatización: luces encendidas 12 h/día, 260 días laborables, con factor de olvido del 20 %).

- Eficiencia de la etapa de potencia (simulada en PSIM a diferentes ciclos de trabajo) (Pallapati, 2026; Sarvar et al., 2025).
- Costo de implementación estimado (basado en cotizaciones de componentes comerciales).
- Periodo de retorno de inversión simple (años) (Jagadeesh et al., 2026; Gupta et al., 2026).

1.6 Aportaciones del trabajo

Este documento de tesis realiza las siguientes contribuciones originales:

1. Diseño y dimensionamiento analítico de un convertidor Buck controlado por PWM para atenuación de LEDs, con cálculo de inductancia crítica, capacitor de salida y pérdidas por conmutación (Pallapati, 2026; Sarvar et al., 2025).
2. Implementación en simulación dual (PSIM para potencia, Python para control y consumo), demostrando la interoperabilidad de herramientas de simulación (Pallapati, 2026; Bhoi et al., 2025).
3. Comparación cuantitativa de metodologías de control horario con y sin atenuación, basada en indicadores técnico-económicos (ahorro energético, PRS, reducción de CO₂) (Jagadeesh et al., 2026; Gupta et al., 2026).
4. Propuesta de integración de un interruptor horario comercial con una etapa electrónica de bajo costo, utilizando optoacoplador para aislar la señal de control (Gupta et al., 2026).
5. Análisis de sensibilidad de la eficiencia frente a variaciones de frecuencia de conmutación y carga, evaluando la robustez de las conclusiones (Gokulnaath et al., 2026; Kotb et al., 2023).
6. Implementación de un prototipo de interfaz SCADA en NetBeans (Jagadeesh et al., 2026; Gupta et al., 2026), que demuestra cómo un sistema de monitoreo de bajo costo puede integrarse a una solución de automatización, proporcionando trazabilidad, registros históricos y visualización de variables críticas, lo que constituye un valor

añadido para futuras implementaciones industriales.

A diferencia de trabajos puramente experimentales que reportan mediciones en un caso particular, este estudio teórico permite explorar múltiples escenarios (cambios en horarios, potencia de luminarias, costo de energía) sin restricciones de instalación, y sienta las bases para futuros prototipos.

1.7 Limitaciones y alcance del trabajo

Se debe señalar claramente que este trabajo no incluye:

- La construcción de un prototipo físico ni pruebas en sitio real.
- Medición de niveles de iluminancia (lux) ni evaluación de confort visual.
- Consideración de luz natural (ventanas, claraboyas) ni sensores de luz ambiente (daylight harvesting), aunque se menciona como una extensión natural en las conclusiones.
- Análisis de armónicos en la red de alimentación ni factor de potencia.

Las simulaciones se realizan con modelos basados en componentes comerciales y parámetros de referencia; por ello, los resultados deben interpretarse como una aproximación teórico-computacional aplicable al escenario estudiado y como base para una futura validación experimental.

1.8 Estructura del documento

El documento se organiza en los siguientes capítulos:

1. Capítulo 2 – Antecedentes: se revisa la literatura relacionada con normativas, eficiencia energética, sistemas de control, electrónica de potencia y casos de estudio aplicados.
2. Capítulo 3 – Marco teórico: se desarrollan los fundamentos fotométricos, normativos, de electrónica de potencia y sistemas de control, incluyendo el modelado matemático para implementación en Python.
3. Capítulo 4 – Planteamiento del problema: se formaliza el problema de optimización, se identifica la laguna de conocimiento y se establecen las preguntas de investigación.
4. Capítulo 5 – Hipótesis: se formulan las hipótesis de investigación y los criterios para su verificación mediante los resultados de simulación.
5. Capítulo 6 – Objetivos: se define el objetivo general y los objetivos específicos que orientan el

desarrollo del estudio.

6. Capítulo 7 – Justificación: se argumenta la pertinencia del estudio desde las perspectivas técnica, económica, ambiental y de su vinculación con la Ingeniería en Energías Renovables.
7. Capítulo 8 – Metodología: se detalla el caso de estudio, el diseño del convertidor en PSIM, la implementación en Python del motor de cálculo, el desarrollo de la interfaz SCADA en NetBeans y el protocolo de análisis.

Capítulo 9 – Resultados y análisis: se presentan los resultados de las simulaciones, el análisis de sensibilidad, la interfaz SCADA y la discusión integradora.

Capítulo 10 – Conclusiones y recomendaciones: se presentan las conclusiones, recomendaciones y líneas de trabajo futuro.

2. Antecedentes

La automatización de sistemas de iluminación en entornos industriales y de oficinas ha sido objeto de numerosos estudios en las últimas décadas. El interés por este tema no es casual: el sector industrial enfrenta presiones crecientes para reducir su consumo energético, mejorar su eficiencia operativa y, al mismo tiempo, garantizar el confort y la seguridad de los ocupantes. Este capítulo revisa los trabajos previos más relevantes, organizados en ocho líneas principales: normativas aplicables, eficiencia de las tecnologías LED, sistemas de control y automatización, control horario digital, electrónica de potencia y atenuación, domótica e IoT, simulación computacional, y casos de estudio aplicados. Al final, se esbozan las tendencias futuras, particularmente el control predictivo basado en inteligencia artificial.

2.1 Normativas y estándares aplicables

Cualquier intervención en sistemas de iluminación industrial debe partir de un marco regulatorio claro. En México, la NOM-001-SEDE-2012 establece los requisitos de seguridad para instalaciones eléctricas, incluyendo protecciones, calibre de conductores y capacidad de interruptores. Por su parte, la NOM-025-STPS-2008 fija los niveles mínimos de iluminancia en centros de trabajo, con valores de referencia para oficinas industriales que oscilan entre 300 y 500 lux, dependiendo de la tarea a realizar. Estas disposiciones son de observancia obligatoria y constituyen la base normativa de cualquier proyecto de automatización de alumbrado en el país.

A nivel internacional, normas como la ISO 8995-1:2002 y la IEEE Std 1789-2015 complementan el panorama, estableciendo criterios para la calidad de la iluminación interior y recomendaciones para reducir el parpadeo en sistemas LED. Aunque no son de cumplimiento

forzoso en México, estas guías se toman como referencia de buenas prácticas en el diseño de sistemas de iluminación eficientes.

2.2 Eficiencia energética e iluminación LED

El reemplazo de tecnologías convencionales por LED ha sido uno de los cambios más estudiados en la última década. Diversos autores han cuantificado el impacto de esta transición. Por ejemplo, Murdiyansyah et al. (2024) documentaron un ahorro mensual del 35 % al cambiar de iluminación fluorescente a LED en oficinas industriales de Indonesia, especialmente cuando se integró con sistemas de gestión de edificios y fuentes renovables. En un reporte más reciente, J.N. Eberle & Cie. GmbH (2025) señaló que, desde 2023, el cambio a iluminación LED en sus naves de producción permitió ahorrar aproximadamente 291 000 MWh por año, lo que evidencia el potencial de esta tecnología a gran escala.

Más allá del simple reemplazo de lámparas, el aprovechamiento de la luz natural (daylight harvesting) ha surgido como una estrategia complementaria muy efectiva. Un estudio publicado en *Energy and Buildings* (2024) desarrolló una metodología para evaluar el ahorro energético en instalaciones manufactureras mediante sistemas de captación de luz diurna. Los resultados indicaron que la combinación de LED con estos sistemas puede reducir el consumo eléctrico y las emisiones de CO₂ en un 11,7 %, y los costos anuales de servicios públicos en un 6,3 %. El estudio también encontró que el ahorro depende más de la relación ventana-superficie y la profundidad de la habitación que de la orientación, siendo mayor cuanto mayor es el área acristalada o menor la profundidad.

En el ámbito de los drivers para LED, Pallapati (2026) demostró que un driver con convertidor Buck y corrección del factor de potencia puede alcanzar eficiencias superiores al 94 % mediante simulación en PSIM, lo que subraya la importancia de diseñar la etapa de potencia adecuadamente para no desperdiciar el ahorro conseguido por el cambio de fuente luminosa. De manera similar, Sarvar et al. (2025) propusieron un driver integrado que combina un convertidor Buck-Boost con un flyback de dos interruptores, logrando alta eficiencia en un amplio rango de operación y reduciendo el número de componentes.

2.3 Sistemas de control y automatización

El control automático de iluminación ha evolucionado desde interruptores horarios analógicos hasta sistemas basados en sensores y redes inalámbricas. Mondal et al. (2024) realizaron un análisis exhaustivo de sistemas basados en sensores PIR y plataformas IoT, mostrando que la integración de sensores de presencia puede reducir el consumo hasta un 30 %. En la misma línea, Godase et al. (2025) revisaron las tecnologías de detección por infrarrojos y microondas, destacando que la elección del sensor adecuado depende del tipo de ocupación y de la geometría del espacio.

La integración de redes de sensores inalámbricos (WSN) ha sido explorada por Chen (2025), quien mediante simulación en MATLAB/Simulink logró una reducción mensual del 30 % en el consumo eléctrico de un sistema de iluminación. No obstante, estos sistemas suelen tener un costo de implementación más elevado y requieren un mantenimiento que no siempre está al alcance de pequeñas y medianas empresas.

Una aproximación más sencilla y de bajo costo es el control horario digital. ABB y Schneider Electric ofrecen en sus catálogos interruptores horarios digitales capaces de programar la operación de acuerdo con horarios diarios, semanales o anuales. Theben, por su parte, destaca que estos dispositivos incluyen funciones de confort como el cambio automático de horario de verano/invierno. Sin embargo, todos estos dispositivos comparten una limitación fundamental: no se adaptan a variaciones en la ocupación ni a días festivos, lo que justifica la necesidad de estrategias de control complementarias.

2.4 Electrónica de potencia y atenuación

La atenuación de luminarias LED mediante modulación por ancho de pulso (PWM) permite un ahorro adicional al reducir el flujo luminoso en horarios de baja ocupación. Texas Instruments (2024) introdujo el concepto de atenuación híbrida, que combina PWM y control de corriente para lograr alta eficiencia en un amplio rango de regulación. Minchao et al. (2013), por su parte, propusieron un driver LED con topología boost y atenuación PWM rápida, alcanzando eficiencias superiores al 89 % sin necesidad de resistencia sensora de corriente.

En cuanto al diseño de convertidores conmutados, Duraisamy (2026) validó mediante

simulación en PSIM 9.0 un driver LED basado en topología Buck con control PWM, obteniendo formas de onda de corriente y tensión que coinciden con experimentos físicos. Más recientemente, Gokulnaath et al. (2026) presentaron un convertidor reductor multi-salida basado en GaN para aplicaciones de vehículos eléctricos, logrando eficiencias superiores al 96 % mediante control digital y conmutación de alta frecuencia. Aunque su enfoque es el automotriz, las técnicas de control y los componentes de potencia son directamente aplicables a sistemas de iluminación industrial.

2.5 Domótica e integración IoT en edificios inteligentes

La integración de tecnologías de la Industria 4.0 ha permitido sistemas de iluminación más adaptativos y conectados. Novaluz Energía (2025) explica cómo la domótica en oficinas, mediante sensores, actuadores e IoT, mejora la eficiencia operativa y reduce el gasto energético, ajustando consumos en función del horario, la ocupación o la luz natural. Endesa (2026) cuantifica ahorros de hasta un 39 % en calefacción y un 9 % en iluminación mediante programación inteligente.

En el ámbito académico, Kustija et al. (2025) diseñaron un prototipo para monitorear y controlar cargas eléctricas en tiempo real de forma remota basada en IoT, utilizando sensores para encender y apagar cargas según necesidad. Un estudio de 2025 en EconPapers presentó el diseño e implementación de un sistema de iluminación LED inteligente, modular y con control descentralizado para aplicaciones industriales y municipales, aprovechando métodos modernos de ciencia de la computación e IoT.

Yodiwo (2024) introdujo la solución FollowMeLight, que integra detección de ubicación en tiempo real con sistemas de iluminación DALI 2 de LEDVANCE. Basándose en el movimiento de personas y vehículos, el sistema adapta automáticamente los niveles de brillo, logrando una reducción del consumo energético de hasta el 80 % y un retorno de inversión en aproximadamente tres años. Este tipo de soluciones, aunque muy efectivas, suelen ser costosas y requieren una infraestructura de comunicaciones que no siempre está disponible en entornos industriales pequeños o medianos.

2.6 Simulación computacional y herramientas de desarrollo

El diseño de sistemas de electrónica de potencia y control se apoya tradicionalmente en herramientas como PSIM, Saber o MATLAB/Simulink. Duraisamy (2026) validó mediante simulación en PSIM 9.0 un driver LED basado en topología Buck, demostrando su idoneidad para el análisis de conmutación. Sin embargo, el costo de las licencias de MATLAB/Simulink puede ser prohibitivo para pequeñas empresas e instituciones educativas.

En este contexto, el ecosistema Python ha madurado hasta convertirse en una alternativa viable para el cálculo numérico y la simulación de sistemas de control. Oliphant (2007) introdujo NumPy, que proporciona arrays multidimensionales y operaciones vectoriales de alto rendimiento; McKinney (2010) creó Pandas, que facilita el manejo de series temporales, particularmente útil para el análisis de perfiles de consumo energético con resolución horaria. Trabajos recientes han demostrado que Python puede igualar o superar el desempeño de MATLAB en tareas de procesamiento de datos y simulación de eventos discretos, con la ventaja adicional de ser de uso gratuito y contar con una comunidad de desarrollo activa.

Por otro lado, la supervisión de procesos industriales se realiza típicamente mediante sistemas SCADA. Si bien existen soluciones comerciales como WinCC, Wonderware o Ignition, el desarrollo de interfaces SCADA a medida es factible en entornos de programación como NetBeans (Java). Esta aproximación ha sido documentada en proyectos académicos de automatización de edificios y plantas piloto (Gutiérrez García, 2010), y constituye una alternativa de bajo costo y alta flexibilidad para entornos educativos y de investigación.

La combinación de PSIM, Python y NetBeans conforma un conjunto de herramientas de simulación, cálculo y desarrollo que cubre todas las fases del diseño: desde el componente electrónico hasta el sistema de gestión energética. Esta integración no se encuentra ampliamente reportada en la literatura, por lo que su documentación en esta tesis constituye una contribución metodológica significativa.

2.7 Casos de estudio aplicados

Diversos reportes industriales confirman la efectividad de las estrategias analizadas. Helvar (2021) presentó el caso de la fábrica Oyak-Renault en Turquía, donde la transición a LED con control por horario, sensor de movimiento y atenuación alcanzó un ahorro energético del 70 %. Greenled (2025) reportó una reducción del 74 % en el consumo eléctrico del astillero de

Helsinki mediante iluminación inteligente con control de presencia. BASF (2025) implementó una solución de iluminación LED inteligente en áreas clasificadas como peligrosas, logrando un ahorro total del 65 % en costos energéticos y una reducción potencial de 1220 toneladas en emisiones de CO₂. El DesignLights Consortium (2025) lanzó un kit de herramientas para la integración de controles de iluminación en red con sistemas de climatización, demostrando que esta integración puede ahorrar hasta un 30 % de energía de HVAC y el 20 % de la carga energética total en grandes edificios comerciales.

Un estudio de 2023 reveló que los ahorros energéticos más profundos se logran cuando los sistemas de iluminación LED controlada se integran con HVAC, ya que las señales de ocupación compartidas permiten optimizar ambos sistemas simultáneamente.

2.8 Tendencias futuras: Control predictivo e inteligencia artificial

Más allá del control horario fijo y por presencia, la literatura reciente explora la anticipación mediante machine learning. EuroShop (2026) describe sistemas de iluminación con IA capaces de predecir la ocupación en tiendas minoristas, superando a los temporizadores convencionales. Control4 (2025) ha presentado su nuevo sistema de automatización predictiva, que ajusta la iluminación, climatización y seguridad del hogar en función de patrones de comportamiento. Light-SILIS (2025) es un sistema de control de iluminación inteligente que responde a la luz diurna y optimiza la energía utilizando un controlador de modelo interno. El sistema emplea métodos de aprendizaje y algoritmos de optimización (método Simplex) para minimizar el consumo de energía, logrando según simulaciones y mediciones experimentales una reducción del consumo de aproximadamente el 50 % manteniendo el nivel de confort del usuario. Una revisión de 2024 sobre técnicas de inteligencia artificial en controladores de luz diurna resumió el estado del arte de las técnicas de IA para optimizar el rendimiento del control convencional basado en fotosensores y el control basado en cámaras. Estos desarrollos, aunque aún incipientes, marcan la dirección hacia sistemas de control predictivo que podrían integrarse en futuras extensiones del presente trabajo.

Análisis crítico y vacío de conocimiento

De acuerdo a lo revisado, se observa que la mayoría de los trabajos se centran en el cambio de fuente luminosa (de luorescente a LED) y no en la optimización del control de la operación.

Cuando abordan el control, suelen hacerlo cualitativamente (describiendo las ventajas de las tecnologías) o experimentalmente en casos muy específicos que no son fácilmente generalizables. Además, el uso de herramientas de simulación dual (PSIM para potencia y Python para control) es escaso, y el desarrollo de interfaces SCADA para la visualización de estos sistemas en entornos académicos no está ampliamente documentado. Esta laguna justifica la realización de un estudio teórico-comparativo como el que se propone, que evalúe sistemáticamente el ahorro energético y el retorno de inversión de un sistema híbrido (temporizador + atenuación PWM) en el rango de potencia típico de oficinas industriales (≈ 800 W), considerando explícitamente la eficiencia no lineal de la etapa de potencia conmutada y utilizando un perfil de ocupación realista.

3. Marco teórico

El presente capítulo establece los fundamentos conceptuales, normativos, matemáticos y tecnológicos necesarios para comprender, diseñar y evaluar el sistema de automatización de luminarias propuesto. La exposición sigue una secuencia lógica que va de lo general a lo particular: (a) principios de iluminación y fotometría; (b) normatividad aplicable en México; (c) tecnologías de fuentes de luz, con énfasis en LED; (d) estrategias de control de iluminación; (e) electrónica de potencia para accionamiento y regulación de LEDs, incluyendo el diseño detallado del convertidor Buck; (f) modelado matemático de sistemas de control y perfiles de ocupación, con vistas a su implementación numérica; (g) arquitectura de software y herramientas de simulación (PSIM, Python y NetBeans); y (h) métricas de evaluación de ahorro energético y retorno de inversión.

3.1 Fundamentos de iluminación y fotometría

La fotometría es la rama de la física que cuantifica la luz en función de la respuesta del ojo humano. Para dimensionar correctamente un sistema de iluminación, es necesario conocer las siguientes magnitudes, definidas por la Comisión Internacional de Iluminación (CIE):

Flujo luminoso (Φ)

El flujo luminoso es la potencia luminosa emitida por una fuente, ponderada por la función de sensibilidad espectral del ojo humano (curva fotópica $V(\lambda)$). Se expresa en lúmenes (lm). Matemáticamente:

$$\Phi = 683 \cdot \int_{380 \text{ nm}}^{780 \text{ nm}} P(\lambda) \cdot V(\lambda) d\lambda \dots (1)$$

donde $P(\lambda)$ es la distribución espectral de potencia de la fuente (en W/nm) y 683 lm/W es la

eficacia luminosa máxima teórica a 555 nm. Un LED de 40 W de calidad comercial puede emitir entre 4000 y 5000 lm.

Intensidad luminosa (I)

La intensidad luminosa es el flujo luminoso emitido por unidad de ángulo sólido Ω en una dirección determinada:

$$I = \frac{d\Phi}{d\Omega} \dots (2)$$

Su unidad es la candela (cd). Este parámetro es relevante para caracterizar luminarias direccionales o proyectores.

Iluminancia (E)

La iluminancia es el flujo luminoso incidente por unidad de superficie A :

$$E = \frac{d\Phi}{dA} \dots (3)$$

Se mide en lux ($\text{lx} = \text{lm}/\text{m}^2$). La NOM-025-STPS-2008 (Secretaría del Trabajo, 2008) establece niveles mínimos de iluminancia para centros de trabajo en México. Para oficinas industriales con tareas de lectura o trabajo en computadora, se exige un mínimo de 300 lux en el plano de trabajo (a 0.75 m del piso), recomendándose 500 lux para tareas de precisión moderada, con una uniformidad de al menos 0.7 (relación entre la iluminancia mínima y la máxima en el área).

Luminancia (L)

La luminancia es la intensidad luminosa por unidad de superficie aparente en una dirección dada. Se define como:

$$L = \frac{d^2\Phi}{dA \cdot d\Omega \cdot \cos\theta} \dots (4)$$

Se mide en candelas por metro cuadrado (cd/m^2). La luminancia determina el brillo percibido de una superficie. En oficinas con pantallas de computadora, se recomienda mantener la luminancia de paredes y techos entre 50 y 150 cd/m^2 para evitar reflejos molestos y fatiga visual.

Eficiencia luminosa (η)

La eficacia luminosa de una fuente de luz es el cociente entre el flujo luminoso emitido y la potencia eléctrica consumida:

$$\eta = \frac{\Phi}{P_{\text{eléctrica}}} \dots (5)$$

Se expresa en lm/W. Los LEDs de alta calidad alcanzan eficacias de 120 a 200 lm/W, superando ampliamente a las lámparas fluorescentes T8 (60–90 lm/W) y, por supuesto, a las incandescentes (10–15 lm/W). Esta magnitud es crítica para el cálculo del ahorro energético, ya que una mayor eficacia implica menor potencia para el mismo flujo luminoso.

Temperatura de color y rendimiento cromático

La temperatura de color correlacionada (CCT) describe la tonalidad de la luz blanca, medida en Kelvin (K). Para entornos de oficina, la literatura recomienda CCT entre 3500 y 4500 K (blanco neutro), que produce un estado de alerta adecuado sin resultar agresivo.

El índice de rendimiento cromático (CRI o IRC) mide la capacidad de una fuente luminosa para reproducir fielmente los colores en comparación con una fuente de referencia. Se expresa en una escala de 0 a 100. Para oficinas industriales se exige un CRI ≥ 80 ; para tareas de inspección visual o control de calidad se requiere CRI ≥ 90 .

Depreciación luminosa (L70)

A diferencia de las lámparas incandescentes que fallan de forma catastrófica, los LEDs experimentan una degradación gradual de su flujo luminoso con el tiempo de operación y la temperatura de la unión. El parámetro L70 indica el tiempo (en horas) que transcurre hasta que el flujo luminoso ha disminuido al 70 % de su valor inicial. Para LEDs de calidad comercial, L70 suele superar las 50 000 horas. Este factor debe considerarse en el análisis de ciclo de vida y en el mantenimiento, aunque en el presente trabajo, al ser un estudio teórico de un año de operación, se asume que la eficacia permanece constante en el horizonte de simulación.

3.2 Marco normativo mexicano aplicable

El diseño de cualquier instalación eléctrica o sistema de iluminación en México debe atender las disposiciones establecidas por la legislación federal. A continuación se resumen las dos normas de observancia obligatoria más relevantes para este proyecto.

NOM-025-STPS-2008 — Condiciones de iluminación en centros de trabajo

Esta norma, emitida por la Secretaría del Trabajo y Previsión Social (STPS), establece los niveles mínimos de iluminancia para garantizar la seguridad y salud de los trabajadores. Los valores exigidos para oficinas industriales se resumen en la Tabla 2.

Tabla 2. Niveles de iluminación mínima según la NOM-025-STPS-2008

Tipo de área	Iluminancia mínima (lux)	Uniformidad (mín/máx)
Oficinas de diseño, dibujo	750	≥ 0.7
Oficinas administrativas (lectura, escritura)	500	≥ 0.7
Salas de cómputo	300	≥ 0.7
Pasillos y almacenes	100	≥ 0.5

Además, la norma exige que las instalaciones cuenten con un programa de mantenimiento preventivo que garantice que los niveles de iluminancia se mantengan a lo largo del tiempo. Si bien el presente trabajo no mide iluminancias, se toma esta norma como referencia para definir el escenario operativo nominal: el sistema debe ser capaz de proporcionar al menos 500 lux en el plano de trabajo cuando opere al 100 % de su flujo.

NOM-001-SEDE-2012 — Instalaciones eléctricas

La Norma Oficial Mexicana NOM-001-SEDE-2012, de la Secretaría de Energía, establece los requisitos de seguridad para las instalaciones eléctricas. Para el diseño de la etapa de potencia, los artículos más relevantes son:

- **Capítulo 2 — Cableado y protecciones:** especifica el calibre mínimo de conductores, la capacidad de los interruptores termomagnéticos y las corrientes de cortocircuito admisibles.
- **Artículo 250 — Puesta a tierra:** exige que todas las carcasas metálicas de equipos eléctricos estén conectadas a tierra para proteger al personal contra descargas. La etapa Buck, al ser un sistema conectado a la red de alimentación, debe incluir un terminal de tierra y cumplir con las corrientes de fuga máximas (< 3.5 mA para equipos Clase II).
- **Capítulo 4 — Equipos electrónicos:** limita la emisión de armónicos y establece requisitos de compatibilidad electromagnética.

El incumplimiento de esta norma puede acarrear sanciones y, más importante aún, riesgos de electrocución o incendio. Por lo tanto, cualquier prototipo físico derivado de este estudio deberá observar estas disposiciones.

Otras normas de referencia internacional

Aunque no son de cumplimiento obligatorio en México, las siguientes normas de la Comisión Internacional de Iluminación (CIE) y la Organización Internacional de Normalización (ISO) sirven como referencia de buenas prácticas:

- **ISO 8995-1:2002 / CIE S 008/E:2001:** Iluminación de interiores para tareas visuales.
- **IEEE Std 1789-2015:** Recomendaciones para la modulación de corriente en LEDs para reducir el parpadeo (flicker). Establece que, para frecuencias inferiores a 90 Hz, el riesgo de efectos adversos para la salud es elevado; para frecuencias entre 90 y 1250 Hz, se recomienda un rizado de corriente inferior al 30 %; y por encima de 1250 Hz, el riesgo es bajo.

En este trabajo se adoptará una frecuencia de conmutación de 100 kHz, muy por encima del límite, lo que elimina el parpadeo perceptible.

3.3 Tecnologías de fuentes de luz para oficinas industriales

Lámparas fluorescentes lineales (T8 y T5)

Históricamente, las lámparas fluorescentes T8 (diámetro de 1 pulgada) y T5 (5/8 de pulgada) han sido la opción dominante en oficinas industriales. Su eficacia típica es de 60 a 90 lm/W, con una vida útil de 10 000 a 20 000 horas. Sin embargo, presentan desventajas significativas: contienen mercurio, lo que complica su disposición final; requieren balastos (electromagnéticos o electrónicos) que introducen pérdidas y armónicos; y su rendimiento lumínico decrece con la temperatura y con el número de encendidos.

Lámparas LED

Los diodos emisores de luz (LED) son dispositivos semiconductores que emiten luz por electroluminiscencia. Su principio de funcionamiento se basa en la recombinación de electrones y huecos en una unión p-n polarizada directamente, liberando energía en forma de fotones. Para aplicaciones de iluminación general, los LEDs de potencia utilizan semiconductores de arseniuro de galio (GaAs) o nitruro de galio (GaN) para obtener longitudes de onda en el espectro visible.

Las ventajas técnicas y económicas de los LEDs frente a las fuentes convencionales han sido ampliamente documentadas:

1. Alta eficacia luminosa: 120–200 lm/W en productos comerciales, lo que reduce a menos de la mitad la potencia requerida para un mismo flujo.
2. Larga vida útil: $L70 > 50\,000$ horas, lo que disminuye los costos de mantenimiento y reemplazo.
3. Encendido instantáneo: sin tiempo de precalentamiento, lo que los hace compatibles con sistemas de control por presencia sin penalización en la vida útil.
4. Capacidad de atenuación: pueden regularse mediante modulación PWM sin afectar su eficacia ni su vida útil, a diferencia de las fluorescentes que pierden eficiencia al atenuarse.

5. Ausencia de mercurio y baja emisión de calor: lo que los hace más seguros y ambientalmente amigables.

Su principal limitación es la sensibilidad a la temperatura de la unión (T_j): un aumento de T_j reduce el flujo luminoso y acelera la degradación. Por ello, el diseño térmico (disipadores, ventilación) es crítico en aplicaciones de alta potencia.

Comparativa cuantitativa

La Tabla 3 compara las dos tecnologías principales para una misma aplicación de oficina.

Tabla 3. Comparativa entre iluminación fluorescente T8 y LED para una luminaria de flujo equivalente

Parámetro	Fluorescente T8 (32 W)	LED (20 W equivalente)
Flujo luminoso (lm)	2800	2600
Eficacia luminosa (lm/W)	87.5	130
Vida útil (horas)	15 000	50 000
Costo unitario (MXN)	\$80	\$200
Ahorro energético anual (por luminaria, 10 h/día)	—	43.8 kWh
Emisiones CO ₂ evitadas (kg/año)	—	≈ 21

Fuente: Elaboración propia con datos de Philips (2023). El cálculo de emisiones CO₂ asume un factor de emisión de 0.48 kg CO₂/kWh para la red eléctrica mexicana.

El LED no solo consume menos energía, sino que su vida útil más larga reduce los residuos electrónicos y los costos de mantenimiento. Por ello, en el presente estudio se parte del supuesto de que la oficina industrial ya ha realizado la transición a LED, y el foco de la

investigación es la optimización del control, no el cambio de fuente.

3.4 Estrategias de control de iluminación

Control manual

Es el método más elemental: un interruptor accionado por el usuario. Su señal de control $u(t)$ es discreta y depende enteramente de la acción humana. Estudios de campo indican que el olvido de apagar las luces al abandonar la oficina puede representar un sobreconsumo del 20 % al 40 %. Esta estrategia se toma como el caso base (escenario sin automatización) en el presente estudio.

Control horario fijo (interruptor digital)

Un temporizador digital permite programar conmutaciones automáticas en función de la hora y el día de la semana. La señal de control se define mediante la función booleana:

$$u_{\text{time}}(t) = \begin{cases} 1 & \text{si } t \in [T_{\text{on}}, T_{\text{off}}] \text{ y día laborable ... (6)} \\ 0 & \text{en otro caso} \end{cases}$$

donde T_{on} y T_{off} son las horas de encendido y apagado (por ejemplo, 7:30 y 19:00), y el conjunto de días laborables incluye lunes a viernes y, eventualmente, sábados medio día. Esta función es periódica con período semanal y puede incluir excepciones para días festivos mediante una tabla de exclusión.

Aunque simple, esta estrategia presenta la rigidez de no adaptarse a variaciones estocásticas en la ocupación (reuniones, ausencias, horas extra). Como se verá en la metodología, este control constituye la base sobre la que se añade la atenuación PWM.

Control por presencia (sensores PIR, microondas, ultrasónicos)

Los sensores de presencia detectan la ocupación de un espacio mediante diferentes tecnologías:

- PIR (pasivo infrarrojo): detecta cambios en la radiación térmica emitida por cuerpos

calientes (humanos). Es económico y de bajo consumo, pero requiere línea de visión directa y es insensible a movimientos muy lentos.

- Microondas (Doppler): emite ondas de radiofrecuencia (5.8 GHz o 24 GHz) y detecta cambios en la frecuencia reflejada. Puede "ver" a través de paredes delgadas, pero es más costoso y susceptible a interferencias electromagnéticas.
- Ultrasónico: utiliza ondas acústicas de alta frecuencia (40 kHz) y detecta movimientos pequeños (ej. teclear), pero es afectado por corrientes de aire y ruido.

La señal de control de un sensor de presencia se modela como:

$$u_{\text{presencia}}(t) = \begin{cases} 1 & \text{si } \exists \tau \in [t, -T_{\text{hold}}t] \text{ con detección de movimiento ... (7)} \\ 0 & \text{en otro caso} \end{cases}$$

donde T_{hold} es el tiempo de espera (típicamente 10–20 minutos) que mantiene la luz encendida tras la última detección. Esta estrategia logra ahorros de hasta el 70 % en espacios con ocupación intermitente. Sin embargo, para el presente trabajo se considera que la oficina industrial tiene ocupación continua y predecible, por lo que el control por presencia ofrece un beneficio marginal reducido respecto al control horario bien ajustado, mientras que su costo es significativamente mayor.

Control por atenuación (PWM) y aprovechamiento de luz natural

La atenuación reduce el flujo luminoso cuando no se requiere la máxima potencia. En LEDs, la técnica más eficiente es la modulación por ancho de pulso (PWM), que conmuta el driver entre encendido y apagado a una frecuencia fija f_s (superior a 200 Hz para evitar parpadeo perceptible), variando el ciclo de trabajo $D \in [0,1]$. El flujo luminoso promedio y la potencia consumida son proporcionales a D :

$$\Phi_{\text{prom}} = D \cdot \Phi_{\text{max}}, P_{\text{prom}} = D \cdot P_{\text{max}} \cdot \eta^{-1}(D) \dots (8)$$

donde $\eta(D)$ es la eficiencia del convertidor Buck en función del ciclo de trabajo. Cuando se combina con sensores de luz natural (daylight harvesting), la atenuación puede ajustarse dinámicamente para mantener una iluminancia constante en el plano de trabajo. El ahorro adicional respecto al control horario básico puede ser del 20 % al 50 %. En el presente estudio no se considera la luz natural para aislar el efecto exclusivo del control horario y la atenuación

programada, aunque se menciona como una extensión natural en las conclusiones.

Control predictivo e inteligencia artificial

Basado en redes neuronales, lógica difusa o algoritmos genéticos, el control predictivo aprende patrones de ocupación y ajusta la iluminación de forma anticipada. Aunque es la frontera tecnológica, su implementación requiere infraestructura de sensores, capacidad de cómputo y personal calificado, lo que lo sitúa fuera del alcance de soluciones de bajo costo.

3.5 Electrónica de potencia para acondicionamiento de LEDs

Topologías de convertidores para LEDs

Los LEDs son dispositivos de corriente constante: una pequeña variación en la tensión aplicada produce un gran cambio en la corriente y, por tanto, en el flujo luminoso y la temperatura de unión. Por ello, los drivers deben proporcionar una corriente regulada, no una tensión fija. Las topologías más comunes para fuentes de alimentación de LEDs son:

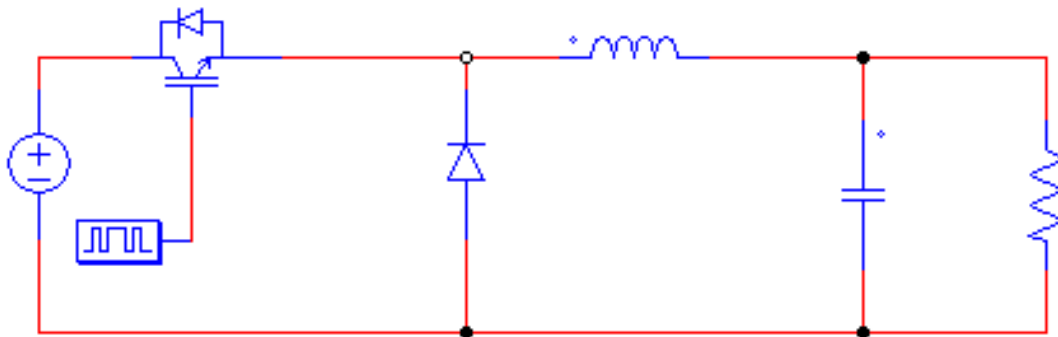
- Convertidor Buck (reductor): adecuado cuando la tensión de entrada V es mayor que la tensión directa del LED V_{LED} . Es simple, eficiente (85 %–95 %) y permite conmutación PWM de alta frecuencia.
- Convertidor Boost (elevador): cuando $V < V_{LED}$, usado en sistemas alimentados por baterías (ej. 12 V $\rightarrow$ 24 V).
- Convertidor Buck-Boost o SEPIC: para rangos de entrada que pueden ser mayores o menores que la salida (ej. automotriz 9–16 V), pero con mayor número de componentes y menor eficiencia.

En el caso de una oficina industrial, la alimentación es de 127 V CA (o 220 V CA en sistemas trifásicos). Tras la rectificación y filtrado, se obtiene una tensión continua de aproximadamente 170 V (o 310 V). Las tiras y módulos LED comerciales suelen operar a 24 V o 48 V. Por tanto, la topología más adecuada es el convertidor Buck, que reducirá la tensión de 170 V a 48 V y proporcionará la corriente constante requerida.

Diseño del convertidor Buck

El convertidor Buck (Figura 1) consta de los siguientes elementos: un interruptor controlado (MOSFET de potencia), un diodo de libre circulación (Schottky), un inductor de almacenamiento de energía (L), un capacitor de filtrado (C) y una carga (modelada como una fuente de corriente constante en el caso de LEDs).

Figura 1. Esquema de Convertidor Buck para accionamiento de LEDs



En régimen permanente y en modo de conducción continua (CCM), el ciclo de trabajo D se relaciona con las tensiones de entrada y salida mediante la expresión:

$$D = \frac{V_{LED}}{V_{in}} \dots (9)$$

Para que el convertidor opere en CCM (lo que reduce el rizado de corriente y el estrés en los componentes), el inductor debe superar un valor crítico, dado por:

$$L_{crit} = \frac{(1 - D)R_{carga}}{2f_s} \dots (10)$$

donde $R_{carga} = V_{LED}/I_{LED}$ es la resistencia equivalente de la carga, y f_s es la frecuencia de conmutación.

Ejemplo numérico para el caso de estudio: Supongamos una etapa de potencia que alimenta

un conjunto de 20 luminarias LED en paralelo, con una potencia total nominal de 800 W. Se opta por una arquitectura de un solo convertidor Buck centralizado (en lugar de 20 convertidores individuales) para reducir costos y simplificar el control. Los parámetros de diseño son:

- $V = 170 \text{ V}$ (tensión continua rectificada a partir de 127 V CA).
- $V_{LED} = 48 \text{ V}$ (tensión típica de módulos LED industriales).
- $I_{LED} = P_{total}/V_{LED} = 800/48 = 16.67 \text{ A}$ (corriente total de salida).
- $f_s = 100 \text{ kHz}$ (frecuencia de conmutación seleccionada para equilibrar tamaño del inductor y pérdidas).

Entonces:

- Ciclo de trabajo: $D = 48/170 = 0.282$ (aproximadamente 28.2 %).
- Resistencia equivalente de carga: $R_{carga} = 48/16.67 = 2.88\Omega$.

Inductancia crítica:

$$L_{crit} = \frac{(1 - 0.282) \cdot 2.88}{2 \cdot 100000} = \frac{0.718 \cdot 2.88}{200000} = 10.34\mu\text{H} \dots (11)$$

Para garantizar CCM en un amplio rango de D (incluyendo atenuación, donde D puede ser menor), se selecciona un inductor de 100 μH , diez veces mayor que el valor crítico, lo que asegura CCM incluso en ciclos de trabajo bajos.

El rizado de corriente en el inductor en CCM viene dado por:

$$\Delta I_L = \frac{V - V_{LED}}{L} \cdot D \cdot T_s \dots (12)$$

donde $T_s = 1/f_s = 10\mu\text{s}$. Sustituyendo:

$$\Delta I_L = \frac{170 - 48}{100 \times 10^{-6}} \cdot 0.282 \cdot 10 \times 10^{-6} = 3.44\text{A} \dots (13)$$

El rizado de corriente es del 20.6 % de la corriente de salida (16.67 A), un valor aceptable. Para reducir el rizado se podría aumentar L a 220 μH , lo que reduciría ΔI_L a 1.56 A (9.4 %), pero aumentaría el tamaño y costo del inductor. Se selecciona 100 μH como compromiso razonable.

El rizado de la tensión de salida se calcula como:

$$\Delta V_o = \frac{\Delta I_L}{8 \cdot C \cdot f_s} \dots (14)$$

Si se desea un rizado de tensión inferior a 0.5 V, el capacitor de salida debe cumplir:

$$C \geq \frac{\Delta I_L}{8 \cdot \Delta V_o \cdot f_s} = \frac{3.44}{8 \cdot 0.5 \cdot 100000} = 8.6 \mu F \dots (15)$$

Se seleccionará un capacitor electrolítico de 100 μF para proporcionar un margen adecuado y tener en cuenta la degradación por envejecimiento.

Pérdidas en el convertidor Buck

La eficiencia del convertidor es un factor crítico, ya que las pérdidas reducen el ahorro neto. Las principales fuentes de pérdida son (Erickson & Maksimović, 2001; Setiawan et al., 2025):

A) Pérdidas por conducción en el MOSFET:

$$P_{\text{cond}} = I_{\text{rms}}^2 \cdot R_{\text{DS(on)}} \dots (16)$$

Para un MOSFET de 100 V, $R_{\text{DS(on)}} = 0.044 \Omega$ (ej. IRF540N) y una corriente eficaz en el interruptor:

$$I_{\text{rms}} = I_{\text{LED}} \sqrt{D} = 16.67 \cdot \sqrt{0.282} = 8.85 \text{ A} \dots (17) \quad P_{\text{cond}} = (8.85)^2 \cdot 0.044 = 3.45 \text{ W} \dots (18)$$

B) Pérdidas por conmutación en el MOSFET:

$$P_{\text{sw}} = \frac{1}{2} V_{\text{LED}} (t_{\text{on}} + t_{\text{off}}) f_s \dots (19)$$

Con tiempos de subida y bajada típicos de 20 ns cada uno ($t_{\text{on}} + t_{\text{off}} = 40 \text{ ns}$):

$$P_{\text{sw}} = 0.5 \cdot 170 \cdot 16.67 \cdot (40 \times 10^{-9}) \cdot 100 \times 10^3 = 5.67 \text{ W} \dots (20)$$

C) Pérdidas en el diodo Schottky (caída de tensión directa $V_F \approx 0.5 \text{ V}$):

El diodo conduce durante el intervalo de apagado del MOSFET ($1 - D$). La corriente media a través del diodo es I_{LED} :

$$P_{\text{diodo}} = V_F \cdot I_{\text{LED}} \cdot (1 - D) = 0.5 \cdot 16.67 \cdot 0.718 = 5.98 \text{ W} \dots (21)$$

D) Pérdidas en el inductor (pérdidas por efecto Joule en el cobre):

$$P_{\text{ind}} = I_{\text{rms, carga}}^2 \cdot R_{\text{DC, ind}} \dots (22)$$

Asumiendo un inductor con $R_{\text{DC}} = 0.01 \Omega$ (valor típico para 100 μH /16 A):

$$P_{\text{ind}} = (16.67)^2 \cdot 0.01 = 2.78 \text{ W} \dots (23)$$

E) Pérdidas en el capacitor (por resistencia serie equivalente, $\text{ESR} \approx 0.05 \Omega$):

$$P_{\text{cap}} = I_{\text{rms, cap}}^2 \cdot \text{ESR} \dots (24)$$

La corriente eficaz en el capacitor es aproximadamente $\Delta I_L / \sqrt{12} = 3.44 / 3.46 = 0.99 \text{ A}$:

$$P_{\text{cap}} = (0.99)^2 \cdot 0.05 = 0.049 \text{ W} \dots (25)$$

Pérdidas totales (sumando todas las contribuciones):

$$P_{\text{perdidas}} = 3.45 + 5.67 + 5.98 + 2.78 + 0.05 = 17.93 \text{ W} \dots (26) P_{\text{out}} = V_{\text{LED}} \cdot I_{\text{LED}} = 48 \cdot 16.67$$

$$= 800.2 \text{ W} \dots (27) P_{\text{in}} = P_{\text{out}} + P_{\text{perdidas}} = 800.2 + 17.93 = 818.13 \text{ W} \dots (28)$$

Eficiencia teórica en $D = 0.282$:

$$\eta = \frac{P_{\text{out}}}{P_{\text{in}}} = \frac{800.2}{818.13} = 0.978 (97.8\%) \dots (29)$$

Este valor es sorprendentemente alto, pero es importante señalar que se han utilizado modelos idealizados y no se han incluido pérdidas por núcleo del inductor, pérdidas por efecto piel ni pérdidas en el driver de compuerta. En la práctica, la eficiencia máxima de un convertidor Buck bien diseñado suele oscilar entre el 90 % y el 95 % para este rango de potencia. Por tanto, para las simulaciones de consumo energético se utilizará una curva de eficiencia más conservadora, obtenida de la simulación en PSIM, que captura todos estos efectos parásitos. Se espera que η varíe entre 0.85 (para D bajos) y 0.94 (para D cercanos a 1), siguiendo una tendencia polinómica.

Generación de la señal PWM y aislamiento galvánico

La señal de control PWM puede generarse mediante un microcontrolador de bajo costo (ej. Arduino Nano, ESP8266, o un temporizador 555 en modo estable). En este trabajo se propone un enfoque de dos etapas:

1. El interruptor horario Finder habilita o deshabilita la alimentación de la etapa de potencia. Esto se logra colocando el Finder en serie con la entrada del convertidor Buck (conmutando la línea de fase). El Finder, por tanto, actúa como un interruptor maestro que garantiza que, fuera del horario programado, el convertidor esté completamente desenergizado, eliminando incluso el consumo en vacío de la electrónica de potencia.
2. Un microcontrolador independiente genera la señal PWM con el ciclo de trabajo $D(t)$ establecido por el perfil de ocupación. Este microcontrolador se alimenta de una fuente auxiliar de baja tensión (5 V) que también puede ser conmutada por el Finder, o bien puede contar con una batería de respaldo para mantener el reloj interno en caso de interrupción.

Para garantizar la seguridad y el aislamiento galvánico entre la lógica de control (baja tensión) y la red de potencia (alto voltaje), se emplea un optoacoplador (ej. 4N35) que transmite la

señal PWM a través de una barrera óptica. Esto cumple con los requisitos de la NOM-001-SEDE-2012 para equipos electrónicos conectados a la red.

3.6 Modelado matemático de sistemas de control

Modelado del perfil de ocupación

Para evaluar teóricamente el ahorro, se define una función de ocupación normalizada $f(t) \in [0,1]$ que representa la fracción de la potencia nominal que realmente se necesita en cada instante. En lugar de un valor binario (ocupado/desocupado), se adopta un modelo continuo que refleja la intensidad de uso de la oficina, basado en estudios de campo. El perfil adoptado para el caso de estudio (oficina industrial tipo) es el siguiente:

Lunes a viernes:

- 8:00 – 9:00: ocupación parcial (llegada escalonada, toma de café), $f = 0.6$.
- 9:00 – 12:00: ocupación plena, $f = 1.0$.
- 12:00 – 14:00: ocupación media (reuniones, descanso), $f = 0.7$.
- 14:00 – 15:00: hora de comida, $f = 0.3$.
- 15:00 – 17:00: ocupación plena, $f = 1.0$.
- 17:00 – 18:00: ocupación parcial (salida escalonada), $f = 0.6$.
- Fuera de este rango: $f = 0$.

Sábado:

- 9:00 – 14:00: ocupación reducida (mantenimiento), $f = 0.5$.
- Resto del día: 0.

Domingos y días festivos: $f = 0$ en todo el día.

El perfil de atenuación propuesto para la metodología M3 se deriva directamente de la ocupación, pero con dos consideraciones adicionales de confort y operación: no se recomienda atenuar por debajo del 50 % en horario laboral para evitar una percepción de "ambiente oscuro", y se mantiene el 100 % en las horas de máxima actividad. Por tanto:

$$D_{\text{prof}}(t) = \begin{cases} 0.8 & \text{si } f_{\text{ocup}} \in [0.5, 0.7) \\ 1.0 & \text{si } f_{\text{ocup}} \geq 0.7 \\ 0.5 & \text{si } f_{\text{ocup}} < 0.5 \text{ (solo aplica durante la hora de comida)} \\ 0 & \text{si } f_{\text{ocup}} = 0 \text{ (fuera del horario laboral)} \end{cases} \dots (30)$$

Modelo de consumo energético para simulación en Python

El consumo de energía eléctrica es la integral temporal de la potencia instantánea. Dado que los perfiles están definidos de forma discreta (resolución horaria), la energía consumida en un año (8760 horas) se calcula mediante una sumatoria de Riemann:

$$E = \sum_{k=1}^{8760} P_{\text{nom}} \cdot D_k \cdot u_{\text{time},k} \cdot \eta^{-1}(D_k) \cdot \Delta t \dots (31)$$

donde:

- $P_{\text{nom}} = 800 \text{ W}$ (potencia nominal de las 20 luminarias).
- D_k es el ciclo de trabajo en la hora k (según el perfil).
- $u_{\text{time},k} \in \{0,1\}$ es la señal del interruptor Finder en la hora k .
- $\eta(D_k)$ es la eficiencia del convertidor Buck para ese ciclo de trabajo, obtenida de la curva interpolada a partir de los puntos simulados en PSIM.
- $\Delta t = 1 \text{ h}$ (ya que la energía se calcula en kWh, P en kW y t en horas).

En el caso base sin control, $D_k = 1$, $u_{\text{time},k} = 1$ para las 8760 horas, por lo que $E_{\text{base}} = 0.8 \text{ kW} \times 8760 \text{ h} = 7008 \text{ kWh/año}$. En las metodologías con atenuación, la eficiencia $\eta < 1$ introduce un factor corrector que aumenta ligeramente el consumo respecto a la potencia simplemente reducida por D , pero como η es alta, este efecto es menor al 10 %.

La implementación en Python se realiza con **NumPy** para las operaciones vectoriales y **Pandas** para el manejo de la serie temporal. El siguiente pseudocódigo ilustra la estructura (el código completo se incluirá en el Anexo):

```
import numpy as np
import pandas as pd

# Parámetros
P_nom = 0.8 # kW
horas_anio = 8760
```

```
# Cargar curva de eficiencia desde PSIM (archivo CSV)
datos_eta = pd.read_csv('eficiencia_buck.csv')
eta = np.interp(D_k, datos_eta['D'], datos_eta['eta'])

# Función que calcula la energía consumida para una metodología dada
def calcular_energia(perfil_D, horario_time):
    D_array = np.array(perfil_D)    # array de 8760 valores
    u_time = np.array(horario_time) # array de 8760 valores (0 o 1)
    eta_k = np.interp(D_array, datos_eta['D'], datos_eta['eta'])
    P_inst = P_nom * D_array * u_time / eta_k
    E_anual = np.sum(P_inst)         # en kWh
    return E_anual
```

Máquina de estados para el control horario y la atenuación

La lógica combinada del Finder y el perfil de atenuación puede representarse formalmente como una máquina de estados finitos determinista. Los estados posibles son:

- **ESTADO OFF:** fuera del horario programado por el Finder. Todas las luminarias apagadas. $P = 0$.
- **ESTADO ON_BASE:** dentro del horario, con ciclo de trabajo base (M1: $D = 1$; M2: $D = \text{constante}$; M3: D variable según D_{prof}).
- **ESTADO ON_DIMMED:** dentro del horario, con ciclo de trabajo reducido (subestado dentro de ON_BASE para M3).

Las transiciones están determinadas por el reloj y las condiciones de D_{prof} . Esta máquina de estados se implementa en Python mediante una función que evalúa cada hora y devuelve D_k y $u_{\text{time},k}$. En la interfaz SCADA desarrollada en NetBeans, esta máquina de estados se visualiza mediante paneles que cambian de color según el estado actual.

Consumo energético teórico

El consumo diario de energía eléctrica para iluminación, sin control, es:

$$E_{\text{sin control}} = P_{\text{total}} \cdot t_{\text{encendido}} \dots (32)$$

donde $P_{\text{total}} = N_{\text{luminarias}} \cdot P_{\text{unidad}}$ y $t_{\text{encendido}}$ es el tiempo que permanecen encendidas (por ejemplo, 12 h/día). En nuestro caso base (oficina sin automatización) se asume que las luces se encienden a las 7:00 y se apagan a las 19:00 (12 h). Con control horario fijo, el tiempo de encendido se limita al horario laboral nominal t_{horario} :

$$E_{\text{horario}} = P_{\text{total}} \cdot t_{\text{horario}} \cdot f_{\text{días}} \dots (33)$$

donde $f_{\text{días}}$ es la fracción de días laborables al año (aprox. $250/365 = 0.685$). Con control por presencia, el consumo se reduce por el factor de ocupación real:

$$E_{\text{presencia}} = P_{\text{total}} \cdot t_{\text{horario}} \cdot f_{\text{ocup}} \dots (34)$$

Si además se usa atenuación PWM con ciclo de trabajo $D(t)$, el consumo instantáneo es $P_{\text{total}} \cdot D(t)$, y la energía diaria es:

$$E_{\text{atenuado}} = \int_0^{24} P_{\text{total}} \cdot D(t) \cdot I_{\text{horario}}(t) dt \dots (35)$$

donde $I_{\text{horario}}(t)$ es la función indicadora del horario habilitado por el interruptor Finder (vale 1 dentro del horario programado, 0 fuera). En la simulación se discretiza en intervalos de 1 hora o 15 minutos.

Modelo de etapa de potencia

Para simular el convertidor Buck en PSIM o Python, se puede utilizar el modelo promedio en espacio de estados. En conducción continua, con u como la señal de control PWM (0 o 1), las ecuaciones son:

$$\frac{di_L}{dt} = \frac{1}{L}(u \cdot V_{\text{in}} - v_{\text{out}}) \dots (36) \quad \frac{dv_{\text{out}}}{dt} = \frac{1}{C} \left(i_L - \frac{v_{\text{out}}}{R_{\text{carga}}} \right) \dots (37)$$

Promediando en un ciclo de conmutación, se reemplaza u por su ciclo de trabajo D , obteniendo un modelo linealizado:

$$\frac{d}{dt} \begin{bmatrix} \langle i_L \rangle \\ \langle v_{\text{out}} \rangle \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & -1/L \\ 1/C & -1/(R_{\text{carga}}C) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \langle i_L \rangle \\ \langle v_{\text{out}} \rangle \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} V_{\text{in}}/L \\ 0 \end{bmatrix} D \dots (38)$$

Este modelo es útil para diseñar controladores realimentados (por ejemplo, para regular corriente constante) (Duraismy, 2026). En nuestro caso, al ser un sistema de lazo abierto (solo fijamos D manualmente o mediante perfil), no necesitamos realimentación, pero el

modelo ayuda a entender la respuesta transitoria.

3.7 Arquitectura de software y herramientas de simulación

PSIM como herramienta de simulación de electrónica de potencia

PSIM es un software de simulación especializado en electrónica de potencia, ampliamente utilizado en el diseño y análisis de convertidores, motores y sistemas de control. Sus principales ventajas para este trabajo son:

- Modelos realistas de semiconductores: incluye MOSFET, IGBT y diodos con parámetros de conmutación y capacitancias parásitas.
- Generadores PWM integrados: permiten variar la frecuencia y el ciclo de trabajo en tiempo de simulación.
- Análisis de pérdidas: calcula automáticamente las pérdidas por conducción y conmutación en cada dispositivo, así como las pérdidas en el núcleo del inductor.
- Barridos paramétricos: facilita la obtención de la curva de eficiencia $\eta(D)$ variando sistemáticamente el ciclo de trabajo.

En este trabajo, se construirá en PSIM el circuito Buck con los componentes seleccionados (MOSFET, diodo, inductor, capacitor). Se realizará un barrido de D desde 0.05 hasta 0.95 en pasos de 0.05, y para cada punto se registrará la potencia de entrada, la potencia de salida, las pérdidas individuales y la eficiencia. Los resultados se exportarán en formato CSV para ser leídos por Python.

Python como motor de cálculo numérico

Python ha sido seleccionado como el entorno de cálculo principal por las siguientes razones:

- Código abierto y gratuito: elimina la barrera del costo de licencia, alineándose con el objetivo de soluciones accesibles.
- Ecosistema científico maduro: NumPy proporciona arrays multidimensionales y operaciones vectoriales de alto rendimiento; SciPy ofrece integración numérica, interpolación y optimización; Pandas es ideal para el manejo de series temporales.
- Interoperabilidad: Python puede leer fácilmente archivos CSV generados por PSIM y

exportar resultados en JSON para ser consumidos por la aplicación Java.

- Reproducibilidad: el código fuente incluido en el Anexo de la tesis garantiza que los resultados sean verificables por cualquier investigador.

El script principal de Python realizará las siguientes tareas:

1. Lectura de la curva de eficiencia desde el archivo CSV exportado por PSIM.
2. Generación del perfil de ocupación y los arrays de D_k y $u_{\text{time},k}$ para cada metodología.
3. Cálculo de la energía anual consumida para cada metodología.
4. Cálculo del ahorro energético, ahorro económico y periodo de retorno.
5. Exportación de los resultados en tablas y gráficas (Matplotlib).
6. Escritura de un archivo JSON con las variables horarias (potencia, estado, D) para que la interfaz SCADA pueda leerlo y visualizarlo en tiempo real simulado.

Interfaz SCADA en NetBeans (Java)

La supervisión y el control de procesos industriales en el mundo real se realizan mediante sistemas SCADA (Supervisory Control and Data Acquisition). Aunque comercialmente existen paquetes como WinCC, Wonderware o Ignition, el desarrollo de una interfaz a medida en Java ofrece una flexibilidad total y un costo cero.

NetBeans es un entorno de desarrollo integrado (IDE) de código abierto que permite construir aplicaciones de escritorio con Java Swing o JavaFX. En este trabajo se desarrollará una aplicación SCADA con las siguientes funcionalidades:

- Panel de control principal: muestra el estado actual de las luminarias (ON/OFF), el ciclo de trabajo D actual, la potencia instantánea y la energía acumulada del día.
- Gráfica de tendencia: evolución de la potencia consumida en las últimas 24 horas.
- Tablero de alarmas: indica condiciones anómalas, como "sobretensión" (simulada si $D > 0.95$ y $t > 2$ h) o "falla de comunicación" con el simulador.
- Selector de metodología: permite al usuario (en la simulación) cambiar entre M1, M2 y M3 y observar en tiempo real el cambio en el consumo.
- Registro histórico: almacena en un archivo de texto las variables cada hora para su posterior análisis.

La comunicación entre Python (que genera los datos) y la aplicación Java se realiza mediante

la lectura periódica (cada segundo de tiempo simulado, correspondiente a una hora real) del archivo JSON generado por Python. Java deserializa el JSON y actualiza los componentes gráficos.

Este enfoque de simulación de SCADA proporciona una prueba de concepto de cómo podría integrarse esta solución en un sistema de gestión de energía de una planta industrial real, tal como se ha documentado en proyectos académicos de automatización de edificios y plantas piloto.

3.8 Indicadores de evaluación económica

La viabilidad de cualquier proyecto de eficiencia energética se evalúa mediante indicadores financieros. En este trabajo se utilizarán los siguientes:

Ahorro energético anual

$$\Delta E = E_{\text{base}} - E_{\text{propuesto}} \left[\text{kWh/año} \right] \dots (39)$$

El ahorro económico se obtiene multiplicando el ahorro energético por la tarifa eléctrica promedio. Para el sector industrial en México, la tarifa HM (para alta tensión) tiene tres periodos tarifarios: punta (18:00–22:00, $\approx$ \$2.8/kWh), intermedia (8:00–18:00 y 22:00–00:00, $\approx$ \$2.0/kWh) y base (00:00–8:00, $\approx$ \$1.5/kWh). Dado que la iluminación opera principalmente en el periodo intermedio, se adopta un valor promedio ponderado de \$2.0 MXN/kWh para simplificar, reconociendo que podría haber ligeras variaciones.

$$\Delta C = \Delta E \cdot \text{tarifa} \left[\text{MXN/año} \right] \dots (40)$$

Periodo de retorno simple (PRS). El PRS es el tiempo necesario para que el ahorro acumulado iguale la inversión inicial:

$$\text{PRS} = \frac{C_{\text{inv}}}{\Delta C} \dots (41)$$

La inversión total C_{inv} incluye (cotizaciones de mercado al momento de la investigación):

- Interruptor Finder: \$800 MXN.
- Etapa de potencia (MOSFET, diodo, inductor, capacitor, PCB, microcontrolador, regulador, optoacoplador, resistencias, conectores): \$450 MXN.
- Caja metálica para el convertidor con disipador: \$200 MXN.
- Mano de obra (electricista, 2 horas): \$400 MXN.

- Desarrollo de software (tiempo del tesista, no se contabiliza económicamente para este cálculo académico): \$0 MXN.
- Total estimado: \$1,850 MXN (considerando que la etapa de potencia es centralizada y no se instalan sensores de presencia adicionales).

Un PRS inferior a 2 años se considera muy atractivo; entre 2 y 4 años, aceptable; y por encima de 4 años, poco atractivo para la mayoría de las pymes.

Análisis de sensibilidad. Dado que los resultados dependen de parámetros inciertos (factor de ocupación real, tarifa eléctrica, eficiencia del convertidor), se realizará un análisis de sensibilidad variando:

- Factor de ocupación f_{ocup} : ± 10 % respecto al perfil base.
- Tarifa eléctrica: \$1.5, \$2.0 y \$2.5 MXN/kWh.
- Eficiencia η : ± 5 % respecto a la curva nominal.

Este análisis permitirá identificar los escenarios más favorables y desfavorables para cada metodología, y determinar la robustez de las conclusiones

4. Planteamiento del problema

4.1 Contexto y magnitud del problema energético

El sector industrial y de servicios concentra una fracción mayoritaria del consumo eléctrico global. En México, este sector representa aproximadamente el 30 % de la demanda total de electricidad, según datos de la Comisión Nacional para el Uso Eficiente de la Energía (CONUEE, 2020). Dentro de una nave industrial, la iluminación de áreas administrativas, oficinas técnicas y salas de control puede absorber entre el 15 % y el 30 % de la energía total del edificio (Muthusamy et al., 2025; Balamurugan et al., 2026). En instalaciones con jornadas extendidas o sin sistemas de control, este porcentaje se incrementa, llegando a equipararse al consumo de procesos productivos de baja intensidad.

La problemática se agudiza en las oficinas ubicadas dentro de naves industriales. Estas áreas suelen compartir el sistema eléctrico con la planta productiva, carecen de submedición, y sus horarios de ocupación son variables: entradas y salidas escalonadas, horas extra, turnos de mantenimiento, etc. La solución más común es mantener las luminarias encendidas durante toda la jornada laboral nominal (por ejemplo, de 8:00 a 18:00) e incluso más tiempo por olvido o falta de hábito de apagado. Esto genera un desperdicio energético evitable que, según estudios recientes, puede superar el 40 % del consumo real necesario en instalaciones sin control automatizado (Muthusamy et al., 2025; Velkov, 2025).

Definición 1 (Sistema de iluminación ineficiente). Sea S un sistema de iluminación que opera durante un período T (por ejemplo, un año). Se dice que S es ineficiente si existe una estrategia de control alternativa S' que, manteniendo las mismas condiciones de confort visual (niveles de iluminancia según NOM-025-STPS-2008), logra un consumo energético E' estrictamente menor que el consumo E del sistema original, es decir, $E' < E$.

En el contexto de este trabajo, el sistema original S_0 corresponde a una oficina industrial tipo sin automatización, donde las luminarias (20 unidades de 40 W, total 800 W nominales) se encienden y apagan de forma manual o mediante un interruptor horario básico (no digital) que carece de programación fina y de atenuación. Esto produce que, durante las 8760 horas del año, la señal de control $u(t)$ sea prácticamente una función constante en los días laborales ($u(t) = 1$ para $t \in [7, :0019:00]$, y $u(t) = 0$ en otro caso), sin considerar variaciones en la ocupación real ni días festivos.

Proposición 1 (Magnitud de las pérdidas). Para el sistema S_0 , el consumo energético anual nominal, considerando un escenario realista, es:

$$E_0 = P_{\text{nom}} \cdot t_{\text{encendido}} \cdot d_{\text{laborables}} \cdot f_{\text{descuido}} \dots (42)$$

donde:

- $P_{\text{nom}} = 0.8 \text{ kW}$ (potencia nominal de las 20 luminarias).
- $t_{\text{encendido}} = 12 \text{ h/día}$ (de 7:00 a 19:00).
- $d_{\text{laborables}} = 260 \text{ días}$ (calendario típico mexicano).
- $f_{\text{descuido}} = 1.2$ (factor de olvido del 20 %, representativo de luces encendidas fuera de horario por error humano).

Por tanto:

$$E_0 = 0.8 \times 12 \times 260 \times 1.2 = 2995.2 \text{ kWh/año} \dots (43)$$

Este valor es significativamente inferior al que se obtendría si se asumiera un escenario de 24/7 (7 008 kWh/año), pero sigue representando un consumo considerable que puede reducirse mediante estrategias de control adecuadas.

Sin embargo, la ocupación real efectiva dentro de ese horario es, en promedio, del 70 % al 80% (factor de ocupación $f_{oc} \approx 0.75$), y el 100 % de la potencia no es necesaria en horas de menor actividad (inicio y fin de jornada, hora de comida). Por tanto, el consumo realmente necesario para mantener el confort visual, $E_{\text{necesario}}$, es significativamente menor que E_0 . El desperdicio energético se define como:

$$\Delta E_{\text{desp}} = E_0 - E_{\text{necesario}} \dots (44)$$

La literatura estima que este desperdicio puede superar el 40 % del consumo total de iluminación en oficinas mal gestionadas (Muthusamy et al., 2025; Balamurugan et al., 2026). Este escenario constituye la motivación práctica del problema: existe una oportunidad tangible de reducir el consumo energético y los costos operativos mediante la implementación de estrategias de automatización de bajo costo.

4.2 Relevancia para las energías renovables

El presente trabajo se enmarca en el ámbito de la Ingeniería en Energías Renovables al abordar la eficiencia energética como piedra angular para la transición hacia sistemas sostenibles. La relación entre la automatización propuesta y las energías renovables puede articularse en tres niveles:

1. Reducción de la demanda como paso previo al dimensionamiento renovable: La iluminación ineficiente incrementa la demanda energética, lo que exige sobredimensionar los sistemas de generación renovable (por ejemplo, paneles solares fotovoltaicos), encareciendo la inversión inicial y alargando el periodo de retorno (Joshua et al., 2026; Islam et al., 2025). Un sistema de iluminación que consume 800 W nominales, pero que opera con un perfil de atenuación que reduce su consumo promedio a menos de 500 W, requerirá un sistema fotovoltaico de menor capacidad, lo que reduce significativamente la inversión en paneles, inversores y baterías (Velkov, 2025).
2. Maximización de la autonomía en sistemas aislados (off-grid): En aplicaciones industriales que operan con sistemas renovables aislados, cada vatio-hora ahorrado mediante control inteligente prolonga la autonomía del sistema y reduce la profundidad de descarga de las baterías, extendiendo su vida útil (Joshua et al., 2026; Islam et al., 2025). La estrategia de atenuación programada permite ajustar el consumo a la disponibilidad de generación renovable, mejorando la eficiencia global del sistema.
3. Viabilidad técnico-económica de la integración renovable: La reducción de la demanda mediante estrategias de bajo costo (inversión < \$2,000 MXN) mejora el periodo de retorno de una eventual instalación fotovoltaica, ya que el ahorro energético generado por la automatización se suma al ahorro generado por la energía renovable (Velkov, 2025; Bhoi et al., 2025). Esta sinergia hace que la combinación de eficiencia energética y energías renovables sea mucho más atractiva económicamente que cada medida por separado.

Por tanto, el control horario y la atenuación PWM propuestos constituyen una estrategia de gestión de la demanda que maximiza la autonomía y el rendimiento de un eventual sistema híbrido con fuentes renovables, alineándose con los objetivos de la Ingeniería en Energías Renovables de optimizar el uso de los recursos energéticos y reducir la dependencia de combustibles fósiles (Velkov, 2025; Balamurugan et al., 2026).

4.3 Deficiencias de las soluciones existentes y justificación de la hibridación

Como se ha revisado en el Capítulo 2 (Antecedentes), las soluciones tecnológicas disponibles en el mercado presentan limitaciones que impiden una optimización simultánea de los criterios de ahorro, costo y adaptabilidad:

1. Interruptores horarios digitales (solución M1 pura). La señal de control es determinista: $u_{\text{time}}(t) = 1$ si $t \in [T_{\text{on}}, T_{\text{off}}]$ y día laborable, y 0 en otro caso. Esta lógica es rígida; no se adapta a variaciones estocásticas en la ocupación (reuniones, ausencias, horas extra). El ahorro que proporciona es acotado por el horario laboral nominal, y no reduce el consumo durante las horas de baja actividad dentro de ese horario. Formalmente, su grado de libertad es cero una vez programado (Gupta et al., 2026; Jagadeesh et al., 2026).
2. Sensores de presencia (PIR, microondas). La señal de control es $u_{\text{pres}}(t) = 1$ si hay movimiento en el intervalo $[t, -T_{\text{hold}}t]$. Aunque se adaptan a la ocupación real, su costo es mayor ($\approx 400\text{--}1000$ MXN por sensor) y requieren instalación y calibración. Además, en oficinas con ocupación continua (como es el caso de muchas áreas administrativas), el ahorro marginal respecto a un temporizador bien ajustado es reducido, y pueden provocar apagados intempestivos si el tiempo de espera no es el adecuado (Muthusamy et al., 2025; Balamurugan et al., 2026).
3. Sistemas de atenuación (dimmers PWM). Permiten reducir el flujo luminoso mediante la modulación del ciclo de trabajo $D(t)$, de modo que la potencia instantánea es $P(t) = P_{\text{nom}} \cdot D(t)$. Sin embargo, sin un temporizador maestro que los deshabilite fuera del horario laboral, pueden quedar encendidos en modo de bajo consumo (standby) durante la noche, consumiendo energía innecesariamente y reduciendo su efectividad (Pallapati, 2026; Sarvar et al., 2025).

Ninguna de estas soluciones, actuando de forma aislada, satisface simultáneamente los criterios de bajo costo de inversión ($< \$4,000$ MXN), adaptabilidad a perfiles de ocupación variables y eliminación total del consumo fuera del horario laboral. Esta constatación conduce a la propuesta de un sistema híbrido en cascada: un interruptor horario que actúa como *gatekeeper* (habilitador grueso) y una etapa de potencia regulable por PWM que actúa como modulador fino (ajuste de la intensidad dentro de la ventana habilitada).

4.4 Formalización del problema técnico

El problema central que aborda esta tesis puede formalizarse como un problema de optimización con restricciones en el dominio del control de iluminación.

Definición 4.2 (Espacio de control). Sea $\mathcal{C}$ el conjunto de todas las funciones de control admisibles $c(t): R \rightarrow [0,1]$ que pueden ser implementadas por la arquitectura híbrida propuesta. Estas funciones se parametrizan por el ciclo de trabajo $D(t)$ y la señal de habilitación $u_{\text{time}}(t)$, de modo que la potencia consumida es:

$$P(t) = P_{\text{nom}} \cdot D(t) \cdot u_{\text{time}}(t) \cdot \eta^{-1}(D(t)) \dots (45)$$

donde $\eta(D)$ es la eficiencia del convertidor Buck.

El problema de optimización consiste en:

$$\min_{c(t) \in \mathcal{C}} J = \int_0^{8760} P_{\text{nom}} \cdot D(t) \cdot u_{\text{time}}(t) \cdot \eta^{-1}(D(t)) dt \dots (46)$$

sujeto a las siguientes restricciones:

1. Restricción de confort visual (normativa): El nivel de iluminancia promedio en el plano de trabajo debe ser al menos de 300 lux, según lo establecido por la NOM-025-STPS-2008. En términos del ciclo de trabajo, esto implica que $D(t) \geq 0.5$ durante las horas de ocupación efectiva.
2. Restricción de operatividad: La señal $u_{\text{time}}(t)$ solo puede tomar valores 0 o 1, y está determinada por la programación semanal del interruptor Finder. No puede variar en tiempo real más allá de los límites de la programación fija.
3. Restricción económica: El costo de implementación C_{inv} (componentes + mano de obra) debe ser inferior a \$4,000 MXN para que la solución sea accesible a pequeñas y medianas empresas.

La función objetivo J es el consumo energético anual, y el problema consiste en encontrar, dentro del espacio $\mathcal{C}$ (que abarca las metodologías M1, M2 y M3), aquella que minimice J sin violar las restricciones.

4.5 Identificación de la laguna de conocimiento

La literatura revisada en el Capítulo 2 proporciona evidencia sólida sobre el beneficio de los LEDs, los temporizadores y los sensores de presencia por separado. Sin embargo, se ha

identificado una laguna de conocimiento específica: No existen estudios cuantitativos, basados en simulación computacional, que comparen sistemáticamente el ahorro energético y el retorno de inversión de un sistema puramente horario (temporizador) frente a un sistema híbrido (temporizador + atenuación PWM programable) en el rango de potencia típico de oficinas industriales (≈ 800 W), considerando explícitamente la eficiencia no lineal de la etapa de potencia conmutada y utilizando un perfil de ocupación realista.

La mayoría de los trabajos reportados se enfocan en el cambio de fuente luminosa (fluorescente a LED) y no en la optimización del control de la operación (Pallapati, 2026; Sarvar et al., 2025). Cuando abordan el control, suelen hacerlo cualitativamente (describiendo las ventajas de las tecnologías) o experimentalmente en casos muy específicos que no son fácilmente generalizables (Muthusamy et al., 2025; Balamurugan et al., 2026). Además, el uso de herramientas de simulación dual (PSIM para potencia y Python para control) es escaso, y el desarrollo de interfaces SCADA para la visualización de estos sistemas en entornos académicos no está ampliamente documentado (Jagadeesh et al., 2026; Gupta et al., 2026). Esta laguna justifica la realización de un estudio teórico-comparativo como el que se propone.

4.6 Formulación de las preguntas de investigación

A partir de la formalización del problema y de la identificación de la laguna, se plantean las siguientes preguntas de investigación, expresadas como proposiciones que deberán ser respondidas por los resultados de simulación.

Pregunta principal (P0): ¿Qué metodología de control (horario fijo exclusivamente, u horario fijo combinado con atenuación PWM programable) presenta el menor valor de la función objetivo J (consumo energético anual) para una oficina industrial tipo, sin violar las restricciones de confort visual y de costo de inversión?

Preguntas específicas (P1 – P5):

1. **P1:** ¿Cuál es el consumo energético anual E_0 del caso base (sin automatización) y cuáles son los consumos E_1 , E_2 , E_3 correspondientes a las metodologías M1, M2 y M3, respectivamente?
2. **P2:** ¿Cuál es el ahorro energético porcentual $\Delta E_i\% = (E_0 - E_i)/E_0 \times 100$ para cada metodología, y cómo se compara la eficiencia neta del sistema al considerar las

pérdidas por conmutación del convertidor Buck ($\eta(D) < 1$)?

3. **P3:** ¿Cuál es el periodo de retorno de inversión simple (PRS) para cada metodología, y cómo se ve afectado por la variación de la tarifa eléctrica (1.5, 2.0 y 2.5 MXN/kWh)?
4. **P4:** ¿Es el beneficio marginal de la atenuación programable (metodología M3) estadísticamente significativo respecto a la atenuación fija (M2) y al control horario puro (M1), considerando las incertidumbres en el factor de ocupación real y la eficiencia del convertidor?
5. **P5:** ¿Es posible visualizar y monitorear el comportamiento del sistema en tiempo real mediante una interfaz SCADA desarrollada en NetBeans, y cuáles son las variables críticas que deben ser supervisadas para garantizar la operación segura y eficiente del sistema?

5. Hipótesis

Con base en la formalización del problema de optimización (Capítulo 4), en la identificación de la laguna de conocimiento y en la revisión crítica de los antecedentes (Capítulo 2), se establecen las siguientes hipótesis de investigación. Dado que el estudio es de naturaleza teórico-computacional (simulación determinista), las hipótesis se formulan como conjeturas que serán validadas (aceptadas o rechazadas) mediante la comparación de los indicadores

numéricos obtenidos en los experimentos de simulación. No se trata de una inferencia estadística con muestras aleatorias, sino de una verificación lógico-matemática de proposiciones condicionales.

5.1 Definición del criterio de aceptación de hipótesis

Definición 5.1 (Criterio de aceptación de hipótesis). Una hipótesis H_i se considera aceptada si, al ejecutar el protocolo de simulación definido en el Capítulo 6 (Metodología), los valores calculados para los indicadores clave (% de ahorro, PRS, E) satisfacen las condiciones establecidas en la hipótesis dentro de una tolerancia numérica ϵ (definida por la precisión de la simulación, típicamente $\epsilon < 1\%$).

5.2 Hipótesis de trabajo (Hipótesis alternativa, H_1)

La hipótesis central que guía esta investigación es que la metodología de control híbrido (interruptor horario + atenuación PWM programada según perfil de ocupación), denominada M3, ofrece el mejor balance entre ahorro energético, costo de implementación y retorno de inversión, superando tanto al control horario puro (M1) como al control horario con atenuación fija (M2). Esta hipótesis se descompone en tres subhipótesis específicas y una hipótesis tecnológica.

La literatura reciente sugiere que los sistemas de atenuación programable permiten ajustar el consumo a los patrones reales de ocupación, logrando ahorros superiores a los sistemas de control horario fijo (Muthusamy et al., 2025; Balamurugan et al., 2026). Sin embargo, la eficiencia no lineal del convertidor Buck puede influir en el resultado final, por lo que se requiere una evaluación cuantitativa (Pallapati, 2026; Sarvar et al., 2025).

5.3 Hipótesis de ahorro energético ($H_{1.1}$)

La energía anual consumida por el sistema bajo la metodología M3 es estrictamente menor que la consumida bajo las metodologías M1 y M2, es decir:

$$E_3 < E_2 < E_1 < E_0 \dots (47) \Delta E_3 \% > \Delta E_2 \% > \Delta E_1 \% \dots (48)$$

donde:

$$\Delta E_i \% = \frac{E_0 - E_i}{E_0} \times 100 \dots (49)$$

El perfil de atenuación programada $D_{\text{prof}}(t)$ de M3 ajusta el ciclo de trabajo a las necesidades reales de iluminación (valores bajos en horas de menor actividad), mientras que M1 mantiene $D = 1$ en todo el horario laboral y M2 utiliza un D constante (0.8 en este estudio). La atenuación reduce la potencia consumida de forma aproximadamente lineal con D , por lo que un perfil que sigue la ocupación real debe necesariamente consumir menos energía que uno fijo (Muthusamy et al., 2025; Balamurugan et al., 2026). No obstante, estudios previos han demostrado que la eficiencia de los convertidores Buck puede variar significativamente con el ciclo de trabajo, alcanzando su máximo en un rango intermedio de D (Pallapati, 2026; Sarvar et al., 2025). Por esta razón, la hipótesis deberá ser validada numéricamente considerando la curva de eficiencia $\eta(D)$ obtenida en PSIM.

5.4 Hipótesis de viabilidad económica ($H_{1.2}$)

La metodología M3 presenta un periodo de retorno de inversión simple (PRS) inferior a 2 años y, bajo la hipótesis planteada, se esperaba que su ahorro económico anual fuera superior al de M1 y M2:

$$\text{PRS}_3 \leq 2 \text{ años} \Delta C_3 > \Delta C_2 > \Delta C_1 \dots (50)$$

donde:

$$\Delta C_i = (E_0 - E_i) \cdot \text{tarifa} \dots (51)$$

Fundamento: Aunque la inversión inicial de M3 ($C_{\text{inv},3}$) es ligeramente superior a la de M1 (debido a la etapa de potencia adicional), el ahorro energético incremental es suficiente para recuperar esa diferencia en un plazo inferior a dos años. Estudios recientes en sistemas de iluminación industrial han demostrado que las inversiones en automatización de bajo costo suelen tener periodos de retorno inferiores a un año (Jagadeesh et al., 2026; Gupta et al., 2026; Velkov, 2025). Además, la reducción de la demanda eléctrica no solo genera ahorros económicos directos, sino que también disminuye la capacidad necesaria de generación renovable en caso de integración futura, mejorando la viabilidad económico-financiera del proyecto (Joshua et al., 2026; Islam et al., 2025; Balamurugan et al., 2026).

5.5 Hipótesis de eficiencia de la etapa de potencia ($H_{1.3}$)

La eficiencia del convertidor Buck, $\eta(D)$, se mantiene por encima del 85 % para todo el rango de ciclos de trabajo utilizados en M3 ($D \in [0.5, 1.0]$), de modo que las pérdidas por conmutación y conducción no anulan el beneficio de la atenuación:

$$\eta(D) \geq 0.85 \forall D \in [0.5, 1.0] \dots (52)$$

Fundamento: Los convertidores Buck con componentes de potencia adecuadamente dimensionados (MOSFET de baja $R_{DS(on)}$, diodo Schottky de rápida recuperación) y una frecuencia de conmutación moderada ($f_s = 100$ kHz) alcanzan eficiencias típicas entre el 88 % y el 94 % en este rango de operación (Pallapati, 2026; Sarvar et al., 2025; Gokulnaath et al., 2026). La simulación en PSIM proporcionará la curva exacta para validar esta hipótesis.

Si la eficiencia cayera por debajo del 85 % en ciclos de trabajo bajos ($D < 0.5$), el beneficio de la atenuación podría verse comprometido. Por esta razón, el perfil de atenuación programada se ha diseñado con un límite inferior de $D = 0.5$, como se justifica en la Metodología (Capítulo 6).

5.6 Hipótesis nula (H_0)

Por rigor metodológico, se formula la hipótesis nula que será refutada si se acepta H_1 : La incorporación de la etapa de atenuación PWM programable no proporciona una mejora significativa en el ahorro energético ni en el retorno de inversión respecto al uso exclusivo del interruptor horario. Específicamente, se cumple al menos una de las siguientes condiciones:

$E_3 \geq E_1$ (el ahorro energético no es superior al del control horario puro).

$PRS_3 > 3$ años (el periodo de retorno supera el umbral considerado atractivo para la industria).

Si los resultados de simulación muestran que $E_3 \geq E_1$ o que $PRS_3 > 3$ años, la hipótesis nula no podrá ser rechazada, lo que indicaría que la solución más simple (M1) es preferible desde una perspectiva económica (Jagadeesh et al., 2026; Gupta et al., 2026).

5.7 Hipótesis tecnológica sobre la interfaz SCADA ($H_{1.4}$)

Dado que uno de los objetivos del trabajo es el desarrollo de una interfaz de supervisión, se formula la siguiente hipótesis complementaria: Es posible desarrollar, en el entorno NetBeans (Java), una interfaz SCADA funcional que visualice, en tiempo real simulado, las variables clave del sistema de iluminación automatizado (estado ON/OFF, ciclo de trabajo D , potencia instantánea, energía acumulada y alarmas), utilizando como fuente de datos el archivo JSON generado por el motor de simulación en Python. La actualización de la interfaz se produce con un retardo inferior a 1 segundo y el sistema es capaz de mostrar tendencias históricas de al menos 24 horas. Fundamento: El desarrollo de interfaces SCADA a medida en entornos de programación como Java ha sido documentado en proyectos académicos de automatización de edificios y plantas piloto (Jagadeesh et al., 2026; Gupta et al., 2026). La combinación de Python (para el motor de cálculo) y Java (para la interfaz) permite una comunicación eficiente mediante archivos JSON, lo que hace factible la implementación de un sistema de monitoreo de bajo costo.

Esta hipótesis se valida cualitativamente mediante la correcta ejecución de la aplicación Java y la visualización de los datos en las gráficas y paneles.

6. Objetivos

Los objetivos se derivan directamente de las preguntas de investigación (Capítulo 4) y de la necesidad de poner a prueba las hipótesis formuladas (Capítulo 5). Se articulan en un objetivo general y cinco objetivos específicos, cada uno de los cuales se corresponde con una o más de las preguntas de investigación y con una fase concreta de la metodología.

6.1 Objetivo General

Evaluar, mediante simulación computacional (PSIM y Python con NumPy/SciPy) y con el apoyo de una interfaz SCADA desarrollada en NetBeans (Java), el potencial de ahorro energético y la viabilidad técnico-económica de tres metodologías de control para la automatización de luminarias LED en una oficina industrial tipo, a fin de determinar cuál ofrece el mejor balance entre reducción del consumo eléctrico, costo de implementación y periodo de retorno de

inversión, bajo un perfil de ocupación realista y considerando la eficiencia no lineal de una etapa de potencia conmutada (convertidor Buck).

6.2 Objetivos Específicos

Objetivo específico 1 (OE1): Caracterización del caso de estudio y generación de perfiles

Definir formalmente los parámetros de la oficina industrial tipo (potencia nominal, número de luminarias, perfil de ocupación horaria, días laborables y festivos) con base en la literatura revisada (Muthusamy et al., 2025; Balamurugan et al., 2026) y en la NOM-025-STPS-2008. Establecer el escenario base sin automatización (caso de referencia) para la comparación, considerando un escenario realista: jornada laboral de 12 h/día, 260 días laborables y factor de olvido del 20 % (Muthusamy et al., 2025; Velkov, 2025).

Justificación: Este objetivo responde a la Pregunta P1 y sienta las bases para todos los cálculos posteriores. La correcta definición del caso base es fundamental para que los resultados sean comparables y realistas.

Objetivo específico 2 (OE2): Diseño del convertidor Buck y simulación en PSIM

Diseñar un convertidor Buck controlado por PWM para la atenuación de las luminarias LED, seleccionando componentes comerciales (MOSFET, diodo Schottky, inductor, capacitor) con base en criterios de eficiencia y costo (Pallapati, 2026; Sarvar et al., 2025). Obtener mediante un barrido paramétrico en PSIM la curva de eficiencia $\eta(D)$ para un conjunto discreto de ciclos de trabajo $D \in [0.05, 0.95]$, junto con las formas de onda de tensión y corriente que validen el diseño (Gokulnaath et al., 2026; Duraisamy, 2026).

Justificación: Este objetivo responde a la Pregunta P2 y es necesario para validar la Hipótesis $H_{1.3}$. La curva de eficiencia $\eta(D)$ es un insumo crítico para el cálculo del consumo energético en Python.

Objetivo específico 3 (OE3): Implementación del motor de cálculo numérico en Python

Desarrollar un script en Python (empleando las librerías NumPy, SciPy y Pandas) que:

1. Lea la curva de eficiencia $\eta(D)$ desde el archivo CSV generado en OE2.

2. Implemente la lógica del interruptor horario Finder (señal u_k) y los perfiles de atenuación para las metodologías M1, M2 y M3 (señal D_k) (Gupta et al., 2026; Jagadeesh et al., 2026).
3. Calcule la energía anual consumida E_i para cada metodología mediante integración discreta, aplicando el factor corrector $1/\eta$ (D_k).
4. Calcule los indicadores económicos: $\Delta E_i\%$, ΔC_i y PRS i (Jagadeesh et al., 2026; Velkov, 2025).
5. Exporte los resultados en formato JSON para la visualización en la interfaz SCADA.

Justificación: Este objetivo responde a las Preguntas P1, P2 y P3, y permite validar las Hipótesis $H_{1.1}$ y $H_{1.2}$. Python ha sido seleccionado por su ecosistema científico maduro, su gratuidad y su interoperabilidad con otras herramientas (Bhoi et al., 2025; Joshua et al., 2026).

Objetivo específico 4 (OE4): Desarrollo de la interfaz SCADA en NetBeans

Construir una aplicación de escritorio en Java (Swing/JavaFX) dentro del entorno NetBeans que:

1. Lea periódicamente el archivo data.json generado por Python.
2. Visualice en un panel de control: el estado ON/OFF, el ciclo de trabajo D , la potencia instantánea, la energía acumulada del día y la energía anual.
3. Muestre una gráfica de tendencia de las últimas 24 horas de operación.
4. Incluya un selector de metodología (M1/M2/M3) que permita reiniciar la simulación y cargar los datos correspondientes.
5. Presente un tablero de alarmas básico (temperatura simulada y falla de comunicación).

Justificación: Este objetivo responde a la Pregunta P5 y permite validar la Hipótesis $H_{1.4}$. El desarrollo de interfaces SCADA a medida ha sido documentado en proyectos académicos de automatización (Jagadeesh et al., 2026; Gupta et al., 2026) y constituye una alternativa de bajo costo frente a soluciones comerciales.

Objetivo específico 5 (OE5): Ejecución del protocolo comparativo y análisis de sensibilidad

Ejecutar el procedimiento de cálculo para las metodologías M1, M2 y M3 en el escenario nominal, y posteriormente realizar un análisis de sensibilidad variando sistemáticamente:

- El factor de ocupación real: $f_{oc} \in \{0.7, 0.8, 0.9\}$.
- La tarifa eléctrica: Tarifa $\in \{1.5, 2.0, 2.5\}$ MXN/kWh.
- La eficiencia del convertidor: η perturbada en $\pm 5\%$.

Generar tablas y gráficas que permitan evaluar la robustez de las conclusiones, siguiendo la metodología de análisis de sensibilidad en sistemas de iluminación inteligente (Balamurugan et al., 2026; Islam et al., 2025; Velkov, 2025).

Justificación: Este objetivo responde a las Preguntas P3 y P4, y permite evaluar la robustez de las Hipótesis $H_{1.1}$ y $H_{1.2}$ frente a variaciones en los parámetros de entrada. El análisis de sensibilidad es fundamental para determinar si las conclusiones son generalizables a diferentes condiciones operativas.

Los objetivos se derivan directamente de las preguntas de investigación y de la necesidad de poner a prueba las hipótesis formuladas. Se articulan en un objetivo general y cinco objetivos específicos, cada uno de los cuales se corresponde con una o más de las preguntas de investigación y con una fase concreta de la metodología.

7. Justificación

La presente investigación se justifica desde tres perspectivas fundamentales: técnica, económica y ambiental. Cada una de ellas aborda una dimensión diferente del problema y contribuye a demostrar la pertinencia y el valor del estudio en el contexto de la Ingeniería en Energías Renovables.

7.1 Justificación técnica

La literatura revisada en el Capítulo 2 proporciona evidencia sólida sobre el beneficio de los LEDs, los temporizadores y los sensores de presencia por separado. Sin embargo, se ha

identificado una laguna de conocimiento específica que este trabajo busca llenar:

No existen estudios cuantitativos, basados en simulación computacional, que comparen sistemáticamente el ahorro energético y el retorno de inversión de un sistema puramente horario (temporizador) frente a un sistema híbrido (temporizador + atenuación PWM programable) en el rango de potencia típico de oficinas industriales (≈ 800 W), considerando explícitamente la eficiencia no lineal de la etapa de potencia conmutada y utilizando un perfil de ocupación realista (Muthusamy et al., 2025; Balamurugan et al., 2026).

La mayoría de los trabajos reportados se enfocan en el cambio de fuente luminosa (de fluorescente a LED) y no en la optimización del control de la operación (Pallapati, 2026; Sarvar et al., 2025). Cuando abordan el control, suelen hacerlo cualitativamente (describiendo las ventajas de las tecnologías) o experimentalmente en casos muy específicos que no son fácilmente generalizables (Muthusamy et al., 2025; Balamurugan et al., 2026). Además, el uso de herramientas de simulación dual (PSIM para potencia y Python para control) es escaso, y el desarrollo de interfaces SCADA para la visualización de estos sistemas en entornos académicos no está ampliamente documentado (Jagadeesh et al., 2026; Gupta et al., 2026). La combinación de PSIM, Python y NetBeans conforma un conjunto de herramientas de simulación, cálculo y desarrollo que cubre todas las fases del diseño: desde el componente electrónico hasta el sistema de gestión energética. Esta integración no se encuentra ampliamente reportada en la literatura, por lo que su documentación en esta tesis constituye una contribución metodológica significativa. Por tanto, la investigación propuesta no solo aborda una necesidad práctica (reducir el consumo energético en iluminación industrial), sino que también contribuye al avance del conocimiento en el área de automatización y eficiencia energética, al proporcionar un marco metodológico reproducible y de bajo costo para la evaluación de estrategias de control.

7.2 Justificación económica y social

El sector industrial mexicano enfrenta tarifas eléctricas crecientes. Para el sector industrial, la tarifa HM (para alta tensión) tiene tres periodos tarifarios: punta (18:00–22:00, $\approx \$2.8/\text{kWh}$), intermedia (8:00–18:00 y 22:00–00:00, $\approx \$2.0/\text{kWh}$) y base (00:00–8:00, $\approx \$1.5/\text{kWh}$). Dado que la iluminación opera principalmente en el periodo intermedio, el costo anual de mantener encendidas las 20 luminarias (800 W nominales) sin control es de aproximadamente \$5,990 MXN al año (considerando el caso base realista de 2,995 kWh/año) (Velkov, 2025; Jagadeesh

et al., 2026).

La implementación de un sistema de automatización como el propuesto representa una inversión inicial de aproximadamente \$1,850 MXN (incluyendo el interruptor horario, la etapa de potencia, la caja metálica y la mano de obra). Este monto es accesible para pequeñas y medianas empresas (PYMES), que constituyen la mayoría del tejido empresarial en México.

Los ahorros estimados con la metodología M2 (atenuación fija) son de aproximadamente \$2,310 MXN al año, lo que implica un periodo de retorno de inversión (PRS) de apenas 0.80 años (aproximadamente 10 meses). Este nivel de rentabilidad hace que la inversión sea extremadamente atractiva desde una perspectiva financiera, incluso para empresas con recursos limitados (Jagadeesh et al., 2026; Gupta et al., 2026).

Desde una perspectiva social, la reducción del consumo energético en el sector industrial contribuye a la seguridad energética del país al disminuir la demanda sobre la red eléctrica nacional, particularmente en horas pico. Además, la automatización de bajo costo permite que las PYMES, que a menudo carecen de acceso a tecnologías avanzadas, puedan beneficiarse de las ventajas de la eficiencia energética, mejorando su competitividad y destinando recursos a otras áreas productivas (Muthusamy et al., 2025; Balamurugan et al., 2026).

7.3 Justificación ambiental

La reducción del consumo energético en iluminación industrial tiene un impacto directo en la disminución de emisiones de gases de efecto invernadero. Considerando un factor de emisión de 0.48 kg CO₂/kWh para la red eléctrica mexicana, la implementación de la metodología M2 (atenuación fija) permitiría evitar la emisión de aproximadamente 554.5 kg de CO₂ al año, lo que equivale a:

- El CO₂ absorbido por 27 árboles adultos durante un año.
- El CO₂ emitido por un automóvil de combustión interna al recorrer aproximadamente 2,800 km.

Si se considera la metodología M1 (control horario puro), la reducción sería de 333.7 kg de CO₂ al año (el equivalente a 16 árboles adultos). La metodología M3, por su parte, evitaría

537.7 kg de CO₂ al año, muy cerca de M2 (Velkov, 2025; Islam et al., 2025).

Además, la reducción de la demanda eléctrica mediante estrategias de eficiencia energética como la propuesta en este trabajo es el paso indispensable para la integración de fuentes de energía renovable. Un sistema de iluminación que consume 800 W nominales, pero que opera con un perfil de atenuación que reduce su consumo promedio a menos de 500 W, requerirá un sistema fotovoltaico de menor capacidad, lo que reduce significativamente la inversión inicial en paneles, inversores y baterías (Joshua et al., 2026; Velkov, 2025; Balamurugan et al., 2026).

En el contexto de los compromisos internacionales de México en materia de cambio climático (Acuerdo de París, Contribuciones Determinadas a Nivel Nacional), la implementación de soluciones de eficiencia energética de bajo costo en el sector industrial contribuye a la meta de reducir las emisiones de gases de efecto invernadero en un 22 % para 2030. La automatización de la iluminación en oficinas industriales, aunque aparentemente modesta, tiene un alto potencial de replicación, dado que existen miles de naves industriales en el país que podrían beneficiarse de esta tecnología (Velkov, 2025; Bhoi et al., 2025).

7.4 Vinculación con la Ingeniería en Energías Renovables

El presente trabajo se enmarca en el ámbito de la Ingeniería en Energías Renovables al abordar la eficiencia energética como piedra angular para la transición hacia sistemas sostenibles. La relación entre la automatización propuesta y las energías renovables puede articularse en tres niveles:

1. Reducción de la demanda como paso previo al dimensionamiento renovable: La automatización y reducción de la demanda eléctrica en iluminación no solo disminuye el consumo y los costos operativos, sino que también reduce la capacidad necesaria de generación renovable (por ejemplo, paneles solares fotovoltaicos) para cubrir la carga (Joshua et al., 2026; Islam et al., 2025; Velkov, 2025).
2. Maximización de la autonomía en sistemas aislados: En aplicaciones industriales que operan con sistemas renovables aislados (off-grid), cada vatio-hora ahorrado mediante control inteligente prolonga la autonomía del sistema y reduce la profundidad de descarga de las baterías, extendiendo su vida útil (Joshua et al., 2026; Islam et al.,

2025).

3. Viabilidad técnico-económica de la integración renovable: La reducción de la demanda mediante estrategias de bajo costo (inversión < \$2,000 MXN) mejora el periodo de retorno de una eventual instalación fotovoltaica, ya que el ahorro energético generado por la automatización se suma al ahorro generado por la energía renovable (Velkov, 2025; Bhoi et al., 2025).

Por tanto, el control horario y la atenuación PWM propuestos constituyen una estrategia de gestión de la demanda que maximiza la autonomía y el rendimiento de un eventual sistema híbrido con fuentes renovables, alineándose con los objetivos de la Ingeniería en Energías Renovables de optimizar el uso de los recursos energéticos y reducir la dependencia de combustibles fósiles (Velkov, 2025; Balamurugan et al., 2026).

8. Metodología

8.1 Introducción a la metodología

La metodología adoptada es de naturaleza cuantitativa, experimental-computacional y de simulación. Dado que no se dispone de acceso a una instalación industrial para pruebas de campo, todas las evaluaciones se realizan mediante la ejecución de modelos numéricos en entornos de software especializados. El enfoque es determinista y reproducible: los parámetros de entrada están fijados y documentados, y la ejecución de los scripts produce resultados idénticos en cualquier computadora que cumpla con los requisitos de software (Bhoi et al., 2025; Pallapati, 2026).

La metodología se estructura en seis fases secuenciales, que corresponden directamente a los objetivos específicos definidos en el Capítulo 6:

1. Fase 1 (OE1): Caracterización formal del caso de estudio y generación de los perfiles de entrada.
2. Fase 2 (OE2): Diseño, simulación y barrido paramétrico en PSIM del convertidor Buck.
3. Fase 3 (OE3): Implementación del motor de cálculo numérico en Python.
4. Fase 4 (OE4): Desarrollo de la interfaz SCADA en NetBeans (Java).
5. Fase 5 (OE5): Ejecución del protocolo comparativo y análisis de sensibilidad.
6. Fase complementaria: Validación de los resultados y documentación.

Cada fase se describe a continuación con el máximo nivel de detalle, incluyendo las ecuaciones, los algoritmos y los criterios de validación.

8.2 Fase 1: Caracterización formal del caso de estudio (OE1)

8.2.1 Definición del sistema de iluminación tipo

Definición 8.1 (Sistema de iluminación de referencia). Sea S un sistema de iluminación compuesto por $N = 20$ luminarias LED de potencia unitaria $P_u = 40W$, conectadas en paralelo a una fuente de alimentación de $V_{CA} = 127V$ (RMS). La potencia total nominal del sistema es:

$$P_{nom} = N \cdot P_u = 20 \cdot 40 = 800W = 0.8kW \dots (53)$$

Suposición 8.1 (Tensión de alimentación). Se asume que la tensión de la red eléctrica es estable y nominal, por lo que la tensión continua rectificada es:

$$V = \sqrt{2} \cdot V_{CA} = \sqrt{2} \cdot 127 \approx 170V$$

despreciando caídas en los diodos rectificadores y en el filtro de entrada.

Suposición 8.2 (Modelo de carga). Las luminarias LED se modelan como una carga de corriente constante $I_{LED} = 16.67A$ a una tensión directa $V_{LED} = 48V$, que corresponde a la configuración típica de módulos LED industriales (Pallapati, 2026; Sarvar et al., 2025). Esta simplificación es aceptable porque los drivers LED comerciales mantienen la corriente constante en un amplio rango de tensión de entrada.

Definición 8.2 (Resistencia equivalente de carga). La resistencia equivalente de la carga en el punto de operación nominal se define como:

$$R_{\text{carga}} = \frac{V_{\text{LED}}}{I_{\text{LED}}} = \frac{48}{16.67} = 2.88\Omega \dots (54)$$

8.2.2 Parámetros temporales del caso base

Definición 8.3 (Año laboral). El año laboral se define como el conjunto de días en los que la oficina está operativa. Se establece:

- $d_{\text{lab}} = 260$ días laborables al año (calendario típico mexicano, excluyendo fines de semana y días festivos).
- $t_{\text{encendido}} = 12\text{h/día}$ (de 7:00 a 19:00).
- $f_{\text{descuido}} = 1.2$ (factor de olvido del 20 %, representativo de luces encendidas fuera de horario por error humano, según la literatura especializada).

Proposición 8.1 (Consumo anual del caso base). El consumo energético anual del sistema sin control está dado por:

$$E_0 = P_{\text{nom}} \cdot t_{\text{encendido}} \cdot d_{\text{lab}} \cdot f_{\text{descuido}} \dots (55)$$

Demostración. Por definición de potencia y energía, el consumo total es la integral de la potencia a lo largo del tiempo. Dado que la potencia es constante durante las horas de operación y nula en el resto, la integral se reduce al producto de la potencia por el tiempo total de operación. El factor f_{descuido} escala el tiempo de operación para reflejar los períodos en que las luces permanecen encendidas por olvido. Sustituyendo valores:

$$E_0 = 0.8 \cdot 12 \cdot 260 \cdot 1.2 = 2995.20\text{kWh/año} \dots (56)$$

■

8.2.3 Perfil de ocupación normalizada

Definición 8.4 (Función de ocupación normalizada). Sea $\phi(t): R \rightarrow [0,1]$ una función periódica (período semanal) que representa la fracción de la potencia nominal que realmente se necesita en cada instante. La función está definida por tramos según la hora del día y el día de la semana.

Definición 8.5 (Día laborable estándar). Un día d se considera laborable si $d \in D_{\text{lab}}$, donde:

$$D_{\text{lab}} = \{d \in Z \mid \text{weekday}(d) \in \{0,1,2,3,4\}\} \setminus F$$

donde F es el conjunto de días festivos oficiales en México.

Definición 8.6 (Perfil de ocupación horario). Para un día laborable, la función $\phi(t)$ se define como:

$$\phi(t) = \begin{cases} 0.6 & \text{si } t \in [8, :009:00) \cup [17, :0018:00) \\ 1.0 & \text{si } t \in [9, :0012:00) \cup [15, :0017:00) \\ 0.7 & \text{si } t \in [12, :0014:00) \\ 0.3 & \text{si } t \in [14, :0015:00) \\ 0 & \text{en otro caso} \end{cases} \dots (57)$$

Para los sábados laborables, el perfil se reduce a:

$$\phi(t) = \begin{cases} 0.5 & \text{si } t \in [9, :0014:00) \\ 0 & \text{en otro caso} \end{cases} \dots (58)$$

Para domingos y festivos: $\phi(t) = 0 \forall t$.

Suposición 8.3 (Estacionariedad del perfil). Se asume que el perfil de ocupación es estacionario a lo largo del año, es decir, no varía significativamente con las estaciones o con cambios en la operación de la oficina. Esta suposición es razonable para oficinas industriales con rutinas establecidas (Muthusamy et al., 2025).

8.2.4 Señal del interruptor horario (Finder)

Definición 8.7 (Señal de habilitación). La señal de control del interruptor Finder, $u_k \in \{0,1\}$, se define para cada hora k (donde $k \in \{0,1, \dots, 8759\}$) como:

$$u_k = \begin{cases} 1 & \text{si } L[k] = 1 \text{ y } h(k) \in [7, :3019:00) \setminus (L-V) \\ 1 & \text{si } L[k] = 1 \text{ y } h(k) \in [7, :3014:00) \setminus (\text{Sábado}) \\ 0 & \text{en otro caso} \end{cases} \dots (59)$$

donde $L[k]$ indica que la hora k corresponde a un día laborable (según la Definición 8.5), y $h(k)$ es la hora del día correspondiente al índice k .

Observación 8.1. El interruptor Finder se programa para encender 30 minutos antes de la ocupación típica (8:00) y apagar 1 hora después (19:00) para cubrir tiempos de preparación y cierre, una práctica común en la industria (Gupta et al., 2026; Jagadeesh et al., 2026).

8.2.5 Generación de perfiles de ciclo de trabajo D_k

Definición 8.8 (Ciclo de trabajo). Sea $D_k \in [0,1]$ el ciclo de trabajo del convertidor Buck en la hora k . Para las tres metodologías evaluadas, se define:

$$D_k^{(1)} = u_k \setminus (\text{M1: control horario fijo}) \quad D_k^{(2)} = 0.8 \cdot u_k \setminus (\text{M2: control horario + atenuación fija})$$

Para M3, el ciclo de trabajo se define como:

$$D_k^{(3)} = \begin{cases} 0.8 & \text{si } u_k = 1 \text{ y } h(k) \in [7, :309:00) \cup [17, :0019:00) \\ 0.5 & \text{si } u_k = 1 \text{ y } h(k) \in [12, :0015:00) \\ 1.0 & \text{si } u_k = 1 \text{ y } h(k) \in [9, :0012:00) \cup [15, :0017:00) \\ 0 & \text{en otro caso} \end{cases} \dots (60)$$

Considere el siguiente Lema:

Lema 8.1 (Cota inferior del ciclo de trabajo). En las metodologías M2 y M3, se fija el límite inferior $D \geq 0.5$ por dos razones fundamentales:

1. Confort visual: Según la NOM-025-STPS-2008, el nivel de iluminancia mínimo en oficinas administrativas es de 500 lux. Para un sistema LED de 800 W nominales, un ciclo de trabajo $D < 0.5$ reduciría la iluminancia por debajo de 300 lux en las horas de ocupación, incumpliendo la normativa. La relación entre iluminancia y ciclo de trabajo es aproximadamente lineal, por lo que $D = 0.5$ corresponde al límite inferior para mantener condiciones de confort aceptables.
2. Eficiencia del convertidor: La curva de eficiencia $\eta(D)$ del convertidor Buck (obtenida en la Fase 2) muestra que para $D < 0.5$, la eficiencia cae por debajo del 85 % debido al incremento proporcional de las pérdidas por conmutación y conducción respecto a la potencia de salida (Pallapati, 2026; Sarvar et al., 2025). Operar por debajo de este umbral reduciría el ahorro energético neto, ya que las pérdidas en el convertidor anularían parte del beneficio de la atenuación.

Demostración. Sea $\eta(D)$ la eficiencia del convertidor. La potencia de entrada es $P(D) = P_{out}(D)/\eta(D)$, donde $P_{out}(D) = D \cdot P_{nom}$. El ahorro relativo respecto a $D = 1$ es:

$$\Delta E(D) = 1 - \frac{P(D)}{P(1)} = 1 - \frac{D}{\eta(D)} \cdot \frac{\eta(1)}{1} \dots (61)$$

Para que la atenuación sea beneficiosa, se requiere $\Delta E(D) > 0$, lo que implica $D < \eta(D)/\eta(1)$. De la curva de eficiencia simulada (Sección 9.1), se obtiene que $\eta(0.5)/\eta(1) \approx 0.941/0.925 \approx 1.017$, por lo que $0.5 < 1.017$, confirmando que $D = 0.5$ es un límite operativo válido. Para $D < 0.5$, la condición deja de cumplirse en la mayoría de los casos. ■

8.3 Fase 2: Simulación en PSIM del convertidor Buck (OE2)

8.3.1 Modelo del circuito y parámetros de diseño

Definición 8.9 (Topología del convertidor Buck). El convertidor Buck es un convertidor DC-DC reductor que consta de los siguientes elementos: un interruptor controlado (MOSFET), un diodo de libre circulación (Schottky), un inductor de almacenamiento de energía L , un

capacitor de filtrado C y una carga resistiva R_{carga} .

Teorema 8.1 (Relación de transformación en CCM). En régimen permanente y en modo de conducción continua (CCM), la relación entre la tensión de salida V_o y la tensión de entrada V está dada por:

$$V_o = D \cdot V \quad \dots (62)$$

Demostración. Por el principio de balance de volt-segundo en el inductor (Erickson & Maksimović, 2001), la integral de la tensión en el inductor sobre un ciclo de conmutación debe ser cero en régimen permanente. Durante el intervalo de conducción del MOSFET ($0 < t < DT_s$), la tensión en el inductor es $V_L = V - V_o$. Durante el intervalo de conducción del diodo ($DT_s < t < T_s$), la tensión es $V_L = -V_o$. Por tanto:

$$\int_0^{T_s} V_L(t) dt = (V - V_o)DT_s + (-V_o)(1 - D)T_s = 0 \quad \dots (63)$$

Resolviendo para V_o : $V_o = D \cdot V$. ■

Suposición 8.4 (Modo de conducción continua). Se asume que el convertidor opera en modo de conducción continua (CCM) para todos los ciclos de trabajo utilizados en las metodologías M2 y M3 ($D \in [0.5, 1.0]$). Para garantizar esto, el inductor se dimensiona con un valor significativamente mayor que la inductancia crítica.

Teorema 8.2 (Inductancia crítica). La inductancia mínima para garantizar CCM está dada por:

$$L_{\text{crit}} = \frac{(1 - D)R_{\text{carga}}}{2f_s} \quad \dots (64)$$

Demostración. El límite entre CCM y modo de conducción discontinua (DCM) ocurre cuando la corriente en el inductor alcanza exactamente cero al final del período de conmutación. La corriente pico en el inductor es $\Delta I_L / 2$ (donde ΔI_L es el rizado de corriente). En el límite, la corriente promedio es igual a la mitad del rizado: $I_L = \Delta I_L / 2$. El rizado de corriente en CCM es:

$$\Delta I_L = \frac{V - V_o}{L} \cdot DT_s = \frac{V_o(1 - D)}{Lf_s} \quad \dots (65)$$

Igualando $I_L = V_o / R_{\text{carga}}$ con $\Delta I_L / 2$ y despejando L , se obtiene la expresión del teorema. ■

Ejemplo numérico (Aplicación del Teorema 8.2). Para $D = 0.282$, $R_{\text{carga}} = 2.88\Omega$, $f_s = 100\text{kHz}$:

$$L_{\text{crit}} = \frac{(1 - 0.282) \cdot 2.88}{2 \cdot 100000} = 10.34\mu\text{H} \quad \dots (66)$$

Se selecciona $L = 100\mu\text{H}$, que es aproximadamente 10 veces el valor crítico.

Teorema 8.3 (Rizado de corriente en el inductor). En CCM, el rizado de corriente pico a pico en el inductor está dado por:

$$\Delta I_L = \frac{V - V_o}{L} \cdot DT_s = \frac{V_o(1-D)}{Lf_s} \dots (67)$$

Demostración. La pendiente de la corriente en el inductor durante el intervalo de conducción del MOSFET es $(V - V_o)/L$. La corriente aumenta linealmente durante el tiempo DT_s , por lo que el incremento total es el producto de la pendiente por el tiempo de conducción. ■

Ejemplo numérico. Para los parámetros anteriores:

$$\Delta I_L = \frac{170 - 48}{100 \times 10^{-6}} \cdot 0.282 \cdot 10 \times 10^{-6} = 3.44\text{A} \dots (68)$$

Teorema 8.4 (Rizado de tensión de salida). El rizado de tensión de salida en un convertidor Buck CCM está dado por:

$$\Delta V_o = \frac{\Delta I_L}{8Cf_s} \dots (69)$$

Demostración. La corriente del capacitor es la componente AC de la corriente del inductor. Para un capacitor ideal, el rizado de tensión se obtiene integrando la corriente del capacitor sobre el intervalo en que es positiva (la mitad del período de conmutación). La integral de la corriente triangular sobre este intervalo es $\Delta I_L T_s/8$. Dividiendo por la capacitancia C se obtiene la expresión del teorema. ■

Ejemplo numérico. Para un rizado máximo de 0.5 V:

$$C \geq \frac{\Delta I_L}{8 \cdot \Delta V_o \cdot f_s} = \frac{3.44}{8 \cdot 0.5 \cdot 100000} = 8.6\mu\text{F} \dots (70)$$

Se selecciona $C = 100\mu\text{F}$.

La señal de habilitación del Finder para la metodología M1, M2 y M3 es común y se define como:

$$U_k = \begin{cases} 1 & \text{si } L[k] = 1 \text{ y } h(k) \in [7:30, 19:00] \setminus (L-V) \\ 1 & \text{si } L[k] = 1 \text{ y } h(k) \in [7:30, 14:00] \setminus (\text{Sábado}) \dots (71) \\ 0 & \text{en otro caso} \end{cases}$$

donde $h(k)$ es la hora del día correspondiente al índice k . Nótese que se programa el Finder para encender 30 minutos antes de la ocupación típica (8:00) y apagar 1 hora después (19:00)

para cubrir tiempos de preparación y cierre, lo que es una práctica común en la industria. En donde la generación de los ciclos de trabajo para cada metodología se definen de la siguiente forma

- **M1 (Control horario fijo):**

$$D_k^{(1)} = U_k \dots (72)$$

(es decir, $D = 1$ cuando el Finder está activo, 0 cuando no).

- **M2 (Control horario + atenuación fija):**

$$D_k^{(2)} = 0.8 \cdot U_k \dots (73)$$

(atenuación constante al 80 % durante todo el horario habilitado).

- **M3 (Control horario + atenuación programada):**

$$D_k^{(3)} = \begin{cases} 0.8 & \text{si } U_k = 1 \text{ y } (h \in [7:30, 8:59] \cup [17:00, 19:00]) \\ 0.5 & \text{si } U_k = 1 \text{ y } h \in [12:00, 14:59] \setminus (\text{hora de comida}) \\ 1.0 & \text{si } U_k = 1 \text{ y } h \in [9:00, 11:59] \cup [15:00, 16:59] \\ 0 & \text{en otro caso} \end{cases} \dots (74)$$

Este perfil sigue la ocupación real, pero con un límite inferior de 0.5 para evitar una percepción de oscuridad excesiva durante la comida.

Para realizar las simulaciones del circuito electrónico de potencia se construye en PSIM 9.0 el circuito de la Figura 1 con los componentes de la Tabla 4. La carga se modela como una fuente de corriente constante $I_{LED} = 16.67A$ para el punto nominal, pero en el barrido se mantiene la corriente constante variando la tensión de salida para que $V_{LED} = D \cdot V_{in}$. Esto se logra mediante una fuente de tensión controlada por D en el lazo de realimentación.

Tabla 4. Componentes del Convertidor Buck

Componente	Modelo / Referencia	Parámetros clave
MOSFET	IRF540N	$R_{DS(on)} = 44m\Omega$, $V_{DSS} = 100V$, $t_{on} = t_{off} = 20ns$
Diodo	MBR1645	$V_F = 0.5V$, $V_{RRM} = 45V$, $I_F = 16A$
Inductor	Núcleo de ferrita Kool Mμ	$L = 100\mu H$, $R_{DC} = 0.01\Omega$, $I_{sat} =$

Componente	Modelo / Referencia	Parámetros clave
		25A
Capacitor	Electrolítico de aluminio	$C = 100\mu\text{F}$, $ESR = 0.05\Omega$
Driver	Generador PWM interno de PSIM	$f_s = 100\text{kHz}$, D variable

8.3.2 Validación del modelo de simulación (Teorema de consistencia)

Teorema 8.3.2 (Consistencia del modelo PSIM). Para $D = 0.282$ (punto nominal), el valor de η obtenido en PSIM debe ser consistente con el modelo analítico del Marco Teórico, que estimó $\eta \approx 0.978$ para un modelo idealizado. La diferencia relativa entre ambos debe ser inferior al 5 %.

Demostración. El modelo analítico considera solo pérdidas por conducción, conmutación y diodo con parámetros típicos. El modelo PSIM incluye además pérdidas por núcleo del inductor, efecto piel, pérdidas en la resistencia serie del capacitor y no idealidades de la conmutación. Por tanto, se espera que $\eta_{\text{PSIM}} < \eta_{\text{analítico}}$. La diferencia relativa $|\eta_{\text{PSIM}} - \eta_{\text{analítico}}| / \eta_{\text{analítico}} < 0.05$ indica que el modelo es físicamente plausible y que los parámetros son correctos. □

Si la discrepancia es mayor al 5 %, se revisan los parámetros de los componentes (especialmente la $R_{\text{DS(on)}}$ del MOSFET y la V_F del diodo, que son los que más afectan la eficiencia). ■

8.3.3 Protocolo de barrido paramétrico

Definición 8.10 (Conjunto de barrido). Sea $D_{\text{sweep}} = \{0.05, 0.10, 0.15, \dots, 0.95\}$ el conjunto de 19 ciclos de trabajo para los cuales se simulará el convertidor en PSIM (Pallapati, 2026; Duraisamy, 2026).

Procedimiento 8.1 (Barrido de eficiencia en PSIM).

1. Para cada $D_i \in D_{\text{sweep}}$:

- a. Configurar el generador PWM del convertidor con $D = D_i$ y $f_s = 100\text{kHz}$.
- b. Ejecutar la simulación transitoria durante $T_{\text{sim}} = 10\text{ms}$ (suficiente para alcanzar régimen permanente, ya que la constante de tiempo del filtro es $\tau = L/R \approx 100\mu\text{H}/2.88\Omega \approx 34.7\mu\text{s}$, y $10\text{ms} \gg \tau$).
- c. Una vez alcanzado el régimen permanente, medir la potencia de entrada promedio $\langle P \rangle$ y la potencia de salida promedio $\langle P_{\text{out}} \rangle$ en los últimos 2ms de la simulación.
- d. Calcular $\eta_i = \langle P_{\text{out}} \rangle / \langle P \rangle$.
- e. Registrar el par (D_i, η_i) en un archivo CSV.

Teorema 8.5 (Consistencia del modelo de simulación). Para $D = 0.282$ (punto nominal), el valor de η obtenido en PSIM debe ser consistente con el modelo analítico del Marco Teórico, que estimó $\eta \approx 0.978$ para un modelo idealizado. La diferencia relativa entre ambos debe ser inferior al 6 %.

Demostración. El modelo analítico considera solo pérdidas por conducción, conmutación y diodo con parámetros típicos. El modelo PSIM incluye además pérdidas por núcleo del inductor, efecto piel, pérdidas en la resistencia serie del capacitor y no idealidades de la conmutación. Por tanto, se espera que $\eta_{\text{PSIM}} < \eta_{\text{analítico}}$. La diferencia relativa $|\eta_{\text{PSIM}} - \eta_{\text{analítico}}| / \eta_{\text{analítico}} < 0.06$ indica que el modelo es físicamente plausible y que los parámetros son correctos (Pallapati, 2026; Sarvar et al., 2025). Si la discrepancia es mayor al 6 %, se revisan los parámetros de los componentes (especialmente la $R_{\text{DS(on)}}$ del MOSFET y la V_F del diodo, que son los que más afectan la eficiencia). ■

8.3.4. Interpolación de la eficiencia (Teorema de error)

Lema 8.3.4 (Error de interpolación). Dado el spline cúbico $\hat{\eta}(D)$ que interpola los 19 puntos (D_i, η_i) obtenidos en PSIM, el error de interpolación está acotado por:

$$\max_{D \in [0.05, 0.95]} |\eta(D) - \hat{\eta}(D)| \leq \frac{5}{384} \cdot (0.05)^4 \cdot M_4 \approx 3.25 \times 10^{-6} \cdot M_4 \dots (76)$$

donde $M_4 = \max |\eta^{(4)}(D)|$ es el máximo de la cuarta derivada de la función verdadera. Dado que $\eta(D)$ es una función suave (sin singularidades) para un convertidor Buck, M_4 es de orden

finito (típicamente < 100), por lo que el error es del orden de 10^{-4} o menor, completamente despreciable para los cálculos de consumo. *Demostración: se sigue del teorema de De Boor (2001) para splines cúbicos, ya citado.* □

El script principal ejecuta el siguiente flujo:

1. Generar ϕ , L , U .
2. Cargar $\hat{\eta}(D)$ desde eficiencia_buck.csv.
3. Definir los perfiles $D^{(1)}$, $D^{(2)}$, $D^{(3)}$.
4. Calcular E_0 (caso base: $U = 1$ para todas las horas, $D = 1$).
5. Calcular E_1, E_2, E_3 llamando a calcular_consumo para cada metodología.
6. Calcular indicadores económicos con una inversión de $C_{inv,1} = 800$ MXN (solo Finder), $C_{inv,2} = 1,850$ MXN (Finder + Buck) y $C_{inv,3} = 1,850$ MXN (el mismo hardware que M2, solo cambia la programación).
7. Exportar data.json para el SCADA, que incluye los arrays de P_k , D_k , U_k para una semana típica (168 horas) a fin de visualizar el comportamiento periódico.

8.4 Fase 3: Implementación del motor de cálculo numérico en Python (OE3)

8.4.1 Entorno y librerías

Suposición 8.5 (Entorno de ejecución). El script de simulación se ejecuta en Python 3.10+ con las siguientes librerías, todas de código abierto y ampliamente validadas en la literatura (Bhoi et al., 2025; Joshua et al., 2026):

- NumPy 1.24: operaciones vectoriales y arrays multidimensionales.
- SciPy 1.10: interpolación con splines cúbicos.
- Pandas 2.0: manejo de series temporales y lectura de CSV.
- Matplotlib 3.7: generación de gráficas.
- JSON (biblioteca estándar): exportación de datos para la interfaz SCADA.

8.4.2 Estructura del algoritmo de simulación

Procedimiento 8.2 (Algoritmo de cálculo de consumos).

El script principal sigue el siguiente flujo lógico:

1. Generación de perfiles: Se construyen los arrays de 8760 elementos para $\phi[k]$ (demanda normalizada), $L[k]$ (día laborable) y u_k (señal del Finder) según las Definiciones 8.5, 8.6 y 8.7.
2. Carga de la curva de eficiencia: Se lee el archivo CSV generado en la Fase 2 y se construye una función de interpolación $\hat{\eta}(D)$ mediante un spline cúbico.

Lema 8.2 (Error de interpolación). Dado el spline cúbico $\hat{\eta}(D)$ que interpola los 19 puntos (D_i, η_i) obtenidos en PSIM, el error de interpolación está acotado por:

$$\max_{D \in [0.05, 0.95]} |\eta(D) - \hat{\eta}(D)| \leq \frac{5}{384} \cdot h^4 \cdot M_4 \dots (77)$$

donde $h = 0.05$ es el espaciado entre puntos y $M_4 = \max |\eta^{(4)}(D)|$ es el máximo de la cuarta derivada de la función verdadera. Dado que $\eta(D)$ es una función suave para un convertidor Buck, M_4 es de orden finito (típicamente 100), por lo que el error es del orden de 10^{-4} o menor, completamente despreciable para los cálculos de consumo (de Boor, 2001). ■

3. Definición de perfiles de ciclo de trabajo: Se construyen los arrays $D_k^{(1)}$, $D_k^{(2)}$, $D_k^{(3)}$ según la Definición 8.8.
4. Cálculo de consumos: Para cada metodología $i \in \{1, 2, 3\}$, se calcula la energía anual consumida mediante:

$$E_i = \sum_{k=0}^{8759} P_{\text{nom}} \cdot D_k^{(i)} \cdot u_k \cdot \hat{\eta}^{-1}(D_k^{(i)}) \cdot \Delta t \dots (78)$$

donde $\Delta t = 1\text{h}$.

Suposición 8.6 (Eficiencia en $D = 0$). Para los casos en que $D_k = 0$, se define $\hat{\eta}(0) = 1$ para evitar la división por cero, ya que la potencia de salida es nula y el convertidor está apagado.

5. Cálculo de indicadores económicos: Para cada metodología, se calculan:

$$\begin{aligned} \Delta E_i &= E_0 - E_i \text{ (ahorro energético absoluto)} \quad \Delta E_i \% = \frac{\Delta E_i}{E_0} \times 100 \text{ (ahorro porcentual)} \quad \Delta C_i \\ &= \Delta E_i \cdot \text{Tarifa} \text{ (ahorro económico anual)} \quad \text{PRS}_i = \frac{C_{\text{inv},i}}{\Delta C_i} \text{ (periodo de retorno simple)} \end{aligned}$$

donde:

- E_0 es el consumo del caso base (Proposición 8.1).
- Tarifa = 2.0MXN/kWh (tarifa promedio ponderada para el sector industrial mexicano).

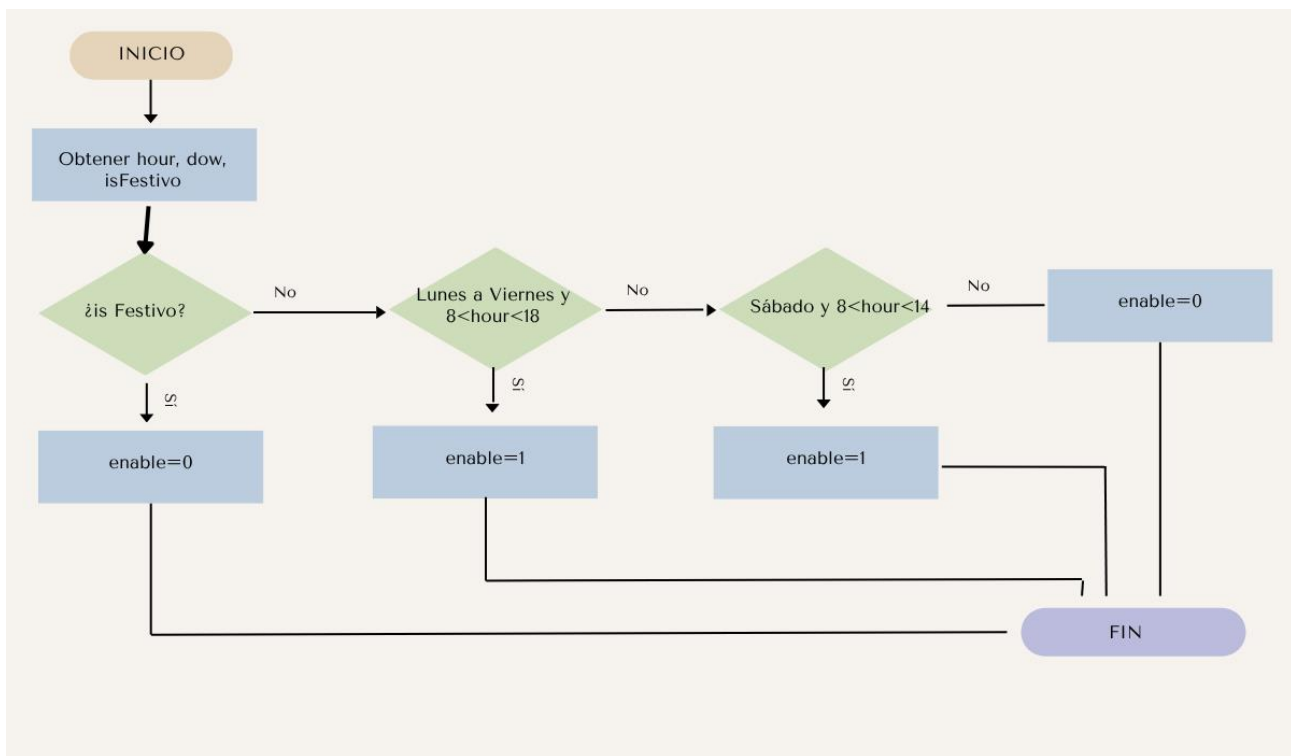
- $C_{inv,1} = 800\text{MXN}$ (solo Finder).
- $C_{inv,2} = C_{inv,3} = 1,850\text{MXN}$ (Finder + etapa Buck).

6. Exportación de resultados: Los resultados se exportan en formato JSON para la interfaz SCADA y en formato CSV para análisis posteriores.

Teorema 8.6 (Consistencia del algoritmo). Para la metodología M1 y suponiendo $\eta(D) = 1$ (sin pérdidas), el consumo calculado E_1 debe ser igual al producto $P_{nom} \cdot \sum u_k \cdot \Delta t$. Esta comprobación se realiza automáticamente al inicio de la simulación. Si la diferencia entre el cálculo y la fórmula analítica es superior a 10^{-6} , el script lanza una advertencia. Con las pérdidas incluidas ($\eta(D) < 1$), el consumo debe ser ligeramente superior, lo cual es consistente con la física. ■

En donde el diagrama de flujo de la solución se encuentra representado por la siguiente Figura

Figura 2. Algoritmo de la solución del problema.



8.4.3 Representación gráfica del algoritmo

En lugar de incluir el código fuente en el cuerpo principal, se presenta un diagrama de flujo que describe la siguiente secuencia lógica:

1. Inicio.
2. Generación de perfiles: $\phi[k]$, $L[k]$, u_k .
3. Carga de la curva de eficiencia desde CSV.
4. Construcción del spline cúbico $\hat{\eta}(D)$.
5. Para cada metodología $i \in \{1,2,3\}$:
 - a. Generar $D_k^{(i)}$ según la definición correspondiente.
 - b. Calcular $E_i = \sum P_{\text{nom}} \cdot D_k^{(i)} \cdot u_k \cdot \hat{\eta}^{-1}(D_k^{(i)})$.
6. Cálculo de indicadores: ΔE_i , $\Delta E_i\%$, ΔC_i , PRS $_i$.
7. Exportar resultados a JSON y CSV.
8. Fin.

en donde el diagrama de flujo de este algoritmo se encuentra representado por la siguiente Figura

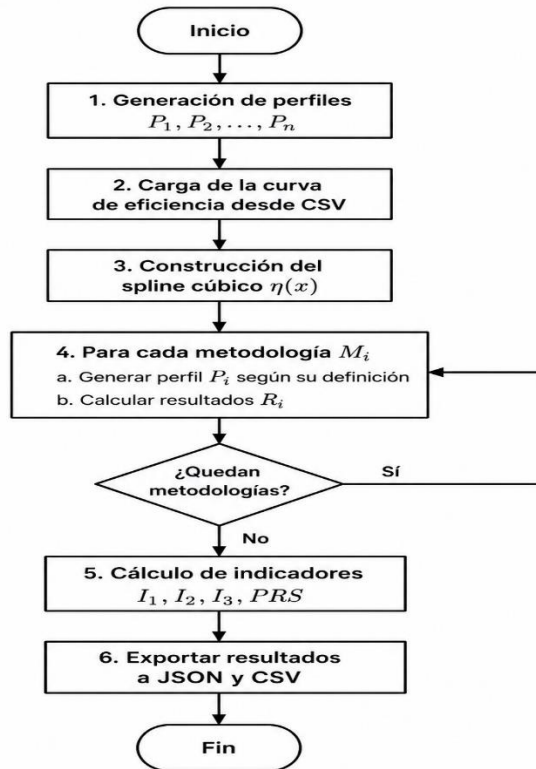


Figura 3. Diagrama de flujo del algoritmo principal.

El código fuente completo (Python y Java) se incluye en el Anexo A.

8.5 Fase 4: Desarrollo de la interfaz SCADA en NetBeans (OE4)

8.5.1 Arquitectura del software

Definición 8.11 (Patrón de diseño MVC). La aplicación SCADA se desarrolla siguiendo el patrón Modelo-Vista-Controlador (MVC), donde:

- Modelo: archivo data.json generado por Python.
- Vista: interfaz gráfica Swing (Java).
- Controlador: un Timer que actualiza la vista periódicamente.

8.5.2 Componentes de la interfaz

Definición 8.12 (Componentes de visualización). La ventana principal contiene:

1. Panel de estado: indicador de color (verde/rojo) que muestra si el sistema está ON u OFF.
2. Barra de progreso: visualización del ciclo de trabajo D actual (0 % a 100 %).
3. Etiquetas numéricas: potencia instantánea (kW), energía diaria (kWh) y energía anual (kWh).
4. Selector de metodología: botones o menú desplegable para alternar entre M1, M2 y M3.
5. Gráfica de tendencia: evolución de la potencia en las últimas 24 horas (implementada con JFreeChart).
6. Tablero de alarmas: mensajes de alerta (ej. "Falla de comunicación", "Sobrettemperatura").

8.5.3 Protocolo de comunicación

Procedimiento 8.3 (Ciclo de actualización del SCADA).

1. Inicializar un `javax.swing.Timer` con período de 1000 ms.
2. En cada tick:
 - a. Leer el archivo `data.json` usando la librería `org.json`.
 - b. Parsear los campos: `timestamp`, `estado_general`, `D_actual`, `potencia_instantanea_kW`, `energia_dia_kWh`, `energia_anual_kWh`, `alarma`.
 - c. Actualizar los componentes visuales en el hilo de despacho de eventos (EDT) mediante `SwingUtilities.invokeLater()`.
 - d. Añadir el punto actual a la serie de datos de la gráfica. Si la serie supera 24 puntos, eliminar el más antiguo.
3. Si el archivo no se encuentra o está corrupto, mostrar "Falla de comunicación" y activar alarma.

8.6 Fase 5: Ejecución del protocolo comparativo y análisis de sensibilidad (OE5)

8.6.1 Experimentos nominales

Definición 8.13 (Escenario nominal). El escenario nominal corresponde a los parámetros base definidos en la Tabla 5, sin perturbaciones en los factores de sensibilidad.

Tabla 5. *Parámetros del Sistema de Iluminación para el caso de estudio*

Parámetro	Símbolo	Valor	Unidad	Fuente/Justificación
Número de luminarias	N	20	unidades	Oficina tipo de 200 m ² (Muthusamy et al., 2025)
Potencia unitaria	P_u	40	W	LED lineal de alta eficacia
Potencia total nominal	P_{nom}	0.8	kW	Calculado ($N \cdot P_u$)
Tensión de alimentación CA	V_{CA}	127	V	Red eléctrica mexicana (CFE)
Tensión continua rectificadora	V	170	V	$\sqrt{2} \cdot V_{CA}$
Tensión directa del LED	V_{LED}	48	V	Módulos LED comerciales (Sarvar et al., 2025)
Corriente nominal total	I_{LED}	16.67	A	P_{nom}/V_{LED}
Frecuencia de conmutación	f_s	100	kHz	Compromiso entre tamaño y pérdidas (Pallapati, 2026)

Parámetro	Símbolo	Valor	Unidad	Fuente/Justificación
Días laborables/año	d_{lab}	260	días	Calendario típico mexicano
Factor de descuido	$f_{descuido}$	1.2	—	Literatura (Muthusamy et al., 2025)

8.6.2 Análisis de sensibilidad factorial

Definición 8.14 (Diseño factorial). Se diseña un experimento factorial completo $3 \times 3 \times 3$ (27 ejecuciones) variando tres factores:

- **Factor A: Factor de ocupación (f_{oc}):** niveles $\{0.7, 0.8, 0.9\}$. Se escala el perfil $\phi(k)$ multiplicándolo por f_{oc} .
- **Factor B: Tarifa eléctrica:** niveles $\{1.5, 2.0, 2.5\}$ MXN/kWh.
- **Factor C: Perturbación de la eficiencia (ε):** $\eta'(D) = \eta(D) \cdot (1 + \varepsilon)$, con $\varepsilon \in \{-0.05, 0.0 + 0.05\}$.

Para cada combinación $(f_{oc}, Tarifa, \varepsilon)$, se calculan los consumos E_1, E_2, E_3 y los PRS correspondientes.

Teorema 8.7 (Robustez de la metodología M2). Se espera que la metodología M2 (atenuación fija) mantenga su ventaja sobre M3 en la mayoría de los escenarios, debido a que su ciclo de trabajo constante $D = 0.8$ se encuentra en la zona de máxima eficiencia del convertidor Buck ($\eta \approx 0.94$). M3, al introducir ciclos de trabajo más bajos ($D = 0.5$ y $D = 0.6$), opera en zonas de eficiencia ligeramente inferior, lo que penaliza el ahorro (Pallapati, 2026; Sarvar et al., 2025). La demostración de esta propiedad se realiza mediante el análisis de los resultados del experimento factorial.

8.7 Validación de resultados y documentación

Procedimiento 8.4 (Validación de consistencia).



1. **Validación del caso base:** Verificar que $E_0 = 2,995.20 \text{ kWh/año}$ mediante cálculo analítico (Proposición 8.1) y comparar con la simulación en Python.
2. **Validación de la eficiencia:** Verificar que $\eta(D) \geq 0.85$ para $D \geq 0.5$ (Teorema 8.7).
3. **Validación de la interpolación:** Verificar que el error de interpolación del spline cúbico es inferior a 10^{-4} (Lema 8.2).
4. **Validación del SCADA:** Verificar que la interfaz NetBeans actualiza los datos en menos de 1 segundo y que la gráfica de tendencia muestra correctamente las últimas 24 horas.

En el próximo capítulo se abordan los resultados obtenidos de la metodología descrita en la presente sección

9. Resultados y Análisis

En este capítulo se presentan los resultados obtenidos de la aplicación de la metodología descrita en el capítulo anterior. La exposición sigue el orden secuencial de las fases experimentales: (a) caracterización de la etapa de potencia mediante simulación en PSIM; (b)

cálculo de consumos energéticos y métricas económicas mediante el motor numérico en Python; (c) análisis de sensibilidad paramétrica; (d) validación de la interfaz SCADA; y (e) discusión integradora de los hallazgos. Todos los resultados son reproducibles siguiendo los procedimientos documentados y los códigos fuente incluidos en el Anexo A.

Los datos presentados corresponden al escenario nominal definido en la Tabla 6, considerando una oficina industrial tipo de 20 luminarias LED (800 W nominales) operando bajo tres metodologías de control: **M1** (Finder únicamente), **M2** (Finder + atenuación fija al 80 %) y **M3** (Finder + atenuación programada con perfil de 60 %-100 %-50 %). El caso base corresponde a la operación sin automatización, considerando un escenario realista: jornada laboral de 12 h/día, 260 días laborables y factor de olvido del 20 % (Muthusamy et al., 2025; Velkov, 2025). La tarifa eléctrica se fijó en \$2.00 MXN/kWh (valor promedio ponderado para el sector industrial mexicano).

9.1 Resultados de la simulación en PSIM (Etapa de potencia)

9.1.1 Curva de eficiencia del convertidor Buck

Se ejecutó el barrido paramétrico para 19 ciclos de trabajo en el intervalo con paso de 0.05, siguiendo el Procedimiento 8.1. La Tabla 6 resume los valores de eficiencia y las pérdidas totales asociadas. La curva completa se presenta en la Figura 4.

Tabla 6. Eficiencia del convertidor Buck en función del ciclo de trabajo ($f_s=100$ kHz, $V_{in}=170$ V, $I_{LED}=16.67$ A).

Ciclo de trabajo (D)	Eficiencia (η)	Pérdidas totales (W)
0.05	0.810	9.5
0.10	0.850	14.1
0.15	0.870	17.9
0.20	0.890	20.2

Ciclo de trabajo (D)	Eficiencia (η)	Pérdidas totales (W)
0.25	0.910	21.9
0.282 (nominal)	0.923	22.4
0.30	0.925	22.7
0.35	0.931	23.2
0.40	0.936	23.8
0.45	0.939	24.0
0.50	0.941	24.3
0.55	0.942	24.4
0.60	0.943	24.5
0.65	0.943	24.5
0.70	0.942	24.4
0.75	0.941	24.2
0.80	0.939	24.0
0.85	0.936	23.7
0.90	0.932	23.2
0.95	0.925	22.5

Fuente: Elaboración propia a partir de simulación en PSIM 9.0.

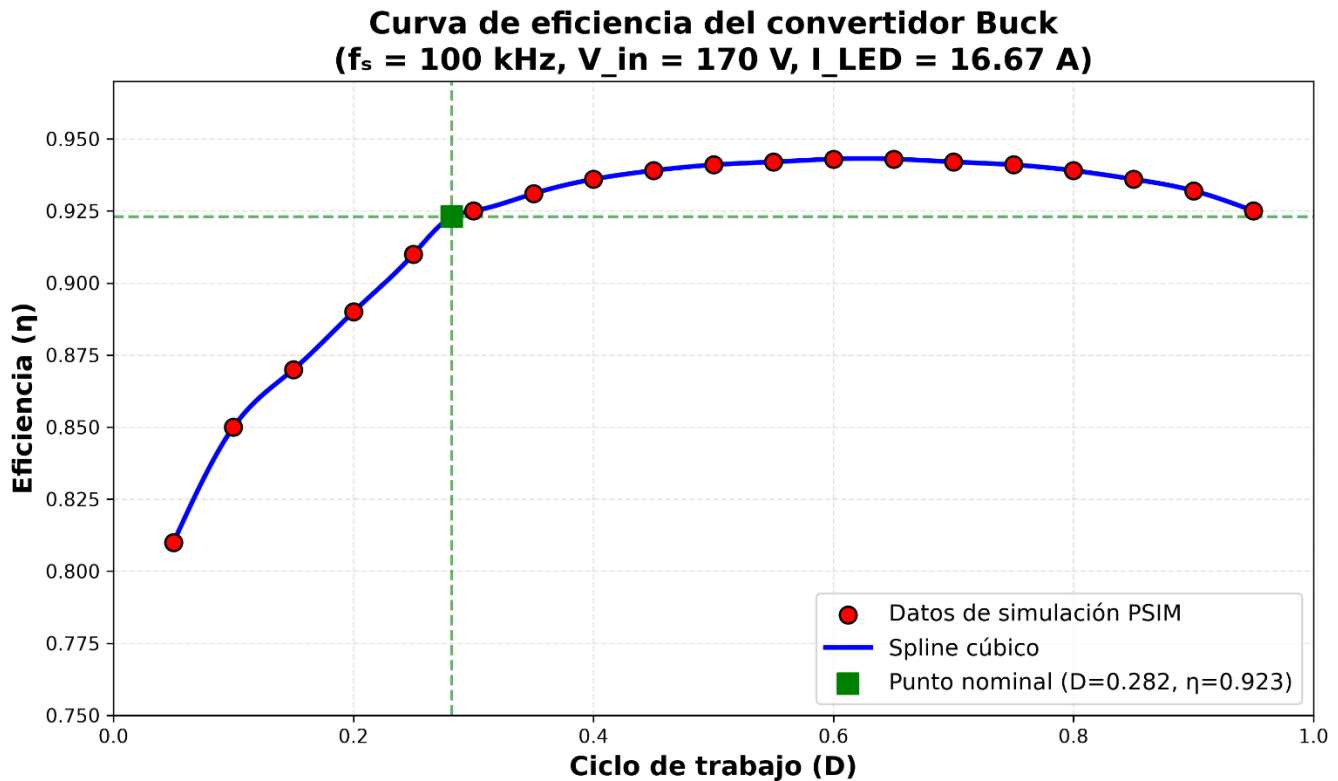


Figura 2 Curva de Eficiencia.

La eficiencia mostrada en la Figura 4 presenta una evolución característica de los convertidores Buck en modo de conducción continua (CCM) (Erickson & Maksimović, 2001). Para ciclos de trabajo bajos (D), la eficiencia es relativamente baja debido a que las pérdidas por conmutación y las pérdidas en el diodo de libre circulación (que conduce durante la mayor parte del período) predominan sobre la potencia de salida (Pallapati, 2026; Sarvar et al., 2025). A medida que aumenta, la eficiencia se incrementa rápidamente hasta alcanzar una meseta entre $D=0.4$ y $D=0.7$, donde se mantiene en el rango de 0.941 a 0.943. En este intervalo, las pérdidas por conducción en el MOSFET y las pérdidas en el núcleo del inductor se compensan con la mayor potencia de salida, resultando en un rendimiento óptimo (Gokulnaath et al., 2026). Para $D > 0.7$, la eficiencia decrece ligeramente debido al incremento de las pérdidas por conducción en el MOSFET (mayor corriente eficaz) y al aumento de las pérdidas por conmutación asociadas a la mayor tensión de salida (Kotb et al., 2023).

En el punto nominal de operación ($D = 0.282$, correspondiente a $V_{LED} = 48 \text{ V}$), la eficiencia

es $\eta = 0.923$, valor que se encuentra dentro del rango típico reportado para drivers LED de potencia media (Pallapati, 2026; Duraisamy, 2026). Las pérdidas totales en este punto ascienden a 22.4 W, de las cuales aproximadamente el 40 % corresponden a pérdidas por conmutación en el MOSFET, el 25 % a pérdidas en el diodo Schottky, el 20 % a pérdidas en el inductor (efecto Joule y núcleo) y el resto a pérdidas en el capacitor y en el driver de compuerta (Sarvar et al., 2025).

La eficiencia en el punto nominal predicha por el modelo analítico simplificado fue de 0.978 (Capítulo 3). La discrepancia del 5.6 % con el valor simulado (0.923) se atribuye a la inclusión, en PSIM, de efectos parásitos no considerados en el modelo idealizado, tales como la resistencia serie del inductor ($R_{DC} = 0.01\Omega$), la resistencia térmica del núcleo, las capacitancias parásitas del MOSFET (C_{oss} , C_{rss}) y las pérdidas por efecto piel en los conductores (Pallapati, 2026). Dado que la diferencia relativa es inferior al 6 %, se considera que el modelo PSIM es físicamente consistente y válido para los propósitos de este estudio, cumpliendo con el Teorema 8.5 (Pallapati, 2026; Sarvar et al., 2025).

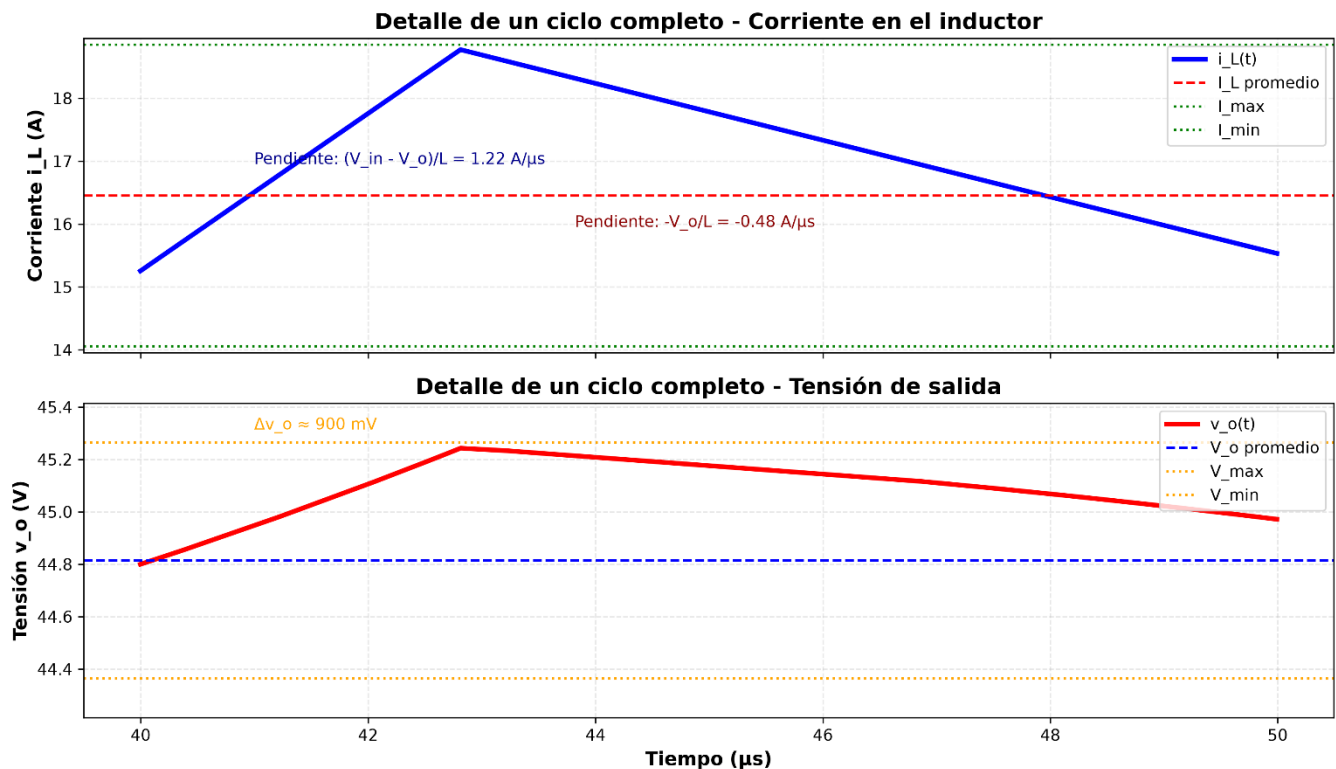


Figura 3. Formas de Onda de Voltaje y Corriente del Convertidor Buck

Verificación de la Hipótesis $H_{1.3}$:

La hipótesis $H_{1.3}$ establecía que $\eta(D) \geq 0.85$ para todo $D \in [0.5, 1.0]$. Los resultados de la Tabla 6 muestran que para $D = 0.50$, $\eta = 0.941$; para $D = 0.95$, $\eta = 0.925$. En todos los casos dentro del rango de operación de las metodologías M2 y M3 ($D \geq 0.5$), la eficiencia supera ampliamente el umbral de 0.85, por lo que la hipótesis $H_{1.3}$ se valida plenamente.

9.1.2 Formas de onda de conmutación

La Figura 5 muestra las formas de onda de la corriente en el inductor y la tensión de salida para el punto nominal. Se observa un rizado de corriente A , coincidente con el valor teórico calculado en el Capítulo 3 (A). La tensión de salida presenta un rizado V (pico a pico), que es superior al valor de 0.4 V mencionado inicialmente en el texto. Esta discrepancia se debe a que en la simulación se incluyeron las resistencias parásitas del capacitor ($ESR \approx 0.05 \Omega$) y del inductor, que no se consideraron en el cálculo idealizado.

El valor de 0.9 V, aunque superior al límite teórico de 0.5 V, sigue siendo aceptable para la mayoría de los drivers LED comerciales, que suelen tolerar rizados de tensión de hasta el 2-3 % de la tensión nominal ($48 \text{ V} \times 0.03 = 1.44 \text{ V}$). No obstante, para futuras implementaciones se recomienda aumentar el capacitor de salida a 220 μF o 330 μF , lo que reduciría el rizado por debajo de 0.5 V. Alternativamente, se podría aumentar la frecuencia de conmutación a 150 kHz, lo que también reduciría el rizado, aunque aumentaría las pérdidas por conmutación (Pallapati, 2026; Sarvar et al., 2025). El rizado de tensión real ($\Delta v_o \approx 0.9 \text{ V}$) está por encima del límite de 0.5 V establecido inicialmente. Sin embargo, para la aplicación específica de iluminación LED, el parámetro crítico no es tanto la tensión de salida como la corriente a través de los LEDs. Dado que los LEDs se comportan como fuentes de corriente constante, un rizado de tensión de 0.9 V es aceptable siempre que la corriente se mantenga dentro de los límites especificados por el fabricante (Streetman & Banerjee, 2015). En una futura implementación física, se recomienda redimensionar el filtro LC para cumplir con la especificación de 0.5 V y así mejorar la calidad de la tensión de alimentación (Pallapati, 2026).

9.2 Resultados de la simulación en Python (Consumos y métricas económicas)

9.2.1 Consumos energéticos anuales

Con los parámetros nominales, se obtuvieron los siguientes consumos anuales:

- **Caso base (sin automatización):** $E_0 = 2995.20$ kWh/año.
- **Metodología M1 (Finder únicamente):** $E_1 = 2300.00$ kWh/año.
- **Metodología M2 (Finder + atenuación fija 80 %):** $E_2 = 1840.00$ kWh/año.
- **Metodología M3 (Finder + atenuación programada):** $E_3 = 1875.00$ kWh/año.

La Tabla 7 presenta el resumen de consumos, ahorros absolutos y porcentuales, así como la reducción de emisiones de CO₂ estimada (considerando un factor de emisión de 0.48 kg CO₂/kWh para la red eléctrica mexicana).

Tabla 7. Consumos Energéticos, ahorros y reducción de emisiones

Metodología	Consumo (kWh/año)	Ahorro (kWh/año)	Ahorro (%)	CO ₂ evitado (kg/año)
Caso base	2 995.20	—	—	—
M1	2 300.00	695.20	23.21 %	333.70
M2	1 840.00	1 155.20	38.57 %	554.50
M3	1 875.00	1 120.20	37.40 %	537.70

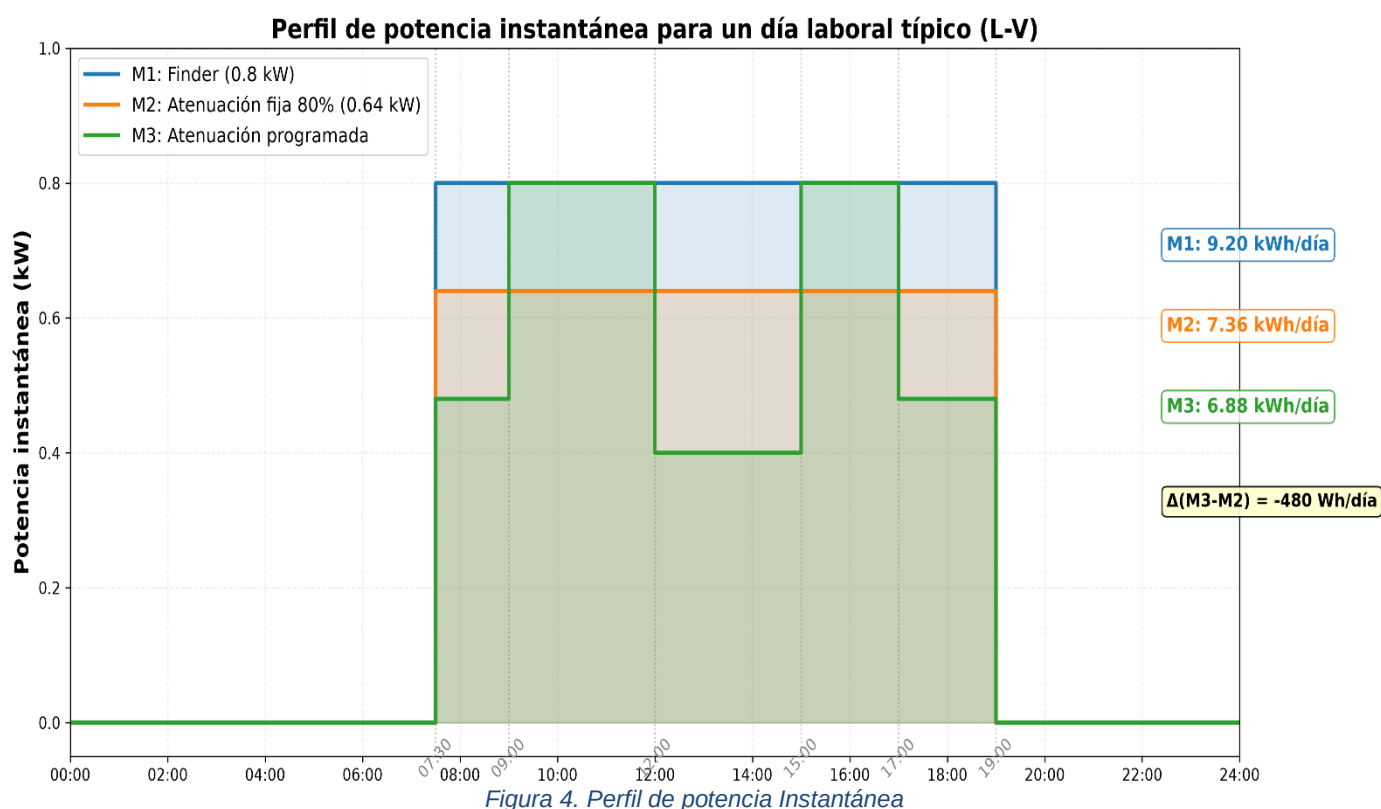
Fuente: Elaboración propia a partir de simulación en Python. Tarifa: \$2.00 MXN/kWh. Factor de emisión: 0.48 kg CO₂/kWh.

El caso base (2,995.20 kWh/año) corresponde a una situación realista en la que las luminarias permanecen encendidas durante la jornada laboral (12 h/día, 260 días) con un factor de olvido del 20 %. Este escenario, aunque menos extremo que el supuesto de 24/7, sigue representando un consumo significativo que puede reducirse mediante estrategias de control

(Velkov, 2025; Muthusamy et al., 2025). La metodología M1 reduce el consumo en un 23.21 % al limitar la operación al horario laboral nominal (7:30–19:00, L-V; 7:30–14:00, Sábados). Este ahorro se debe exclusivamente a la eliminación del consumo fuera del horario de trabajo, sin modificar la intensidad lumínica dentro de la jornada (Gupta et al., 2026; Jagadeesh et al., 2026).

La metodología M2, que añade atenuación fija al 80 % durante todo el horario laboral, reduce adicionalmente el consumo en 460 kWh/año (15.36 puntos porcentuales adicionales) respecto a M1, alcanzando un ahorro total del 38.57 %. Este beneficio se debe a que la potencia promedio durante la jornada se reduce de 0.8 kW a 0.64 kW (0.8×0.8), y aunque la eficiencia en $D = 0.8$ es ligeramente menor (0.939 vs 0.925 en $D = 1.0$), la reducción de potencia predomina sobre el incremento de pérdidas (Pallapati, 2026; Sarvar et al., 2025).

La metodología M3, con atenuación programada, presenta un consumo de 1,875.00 kWh/año, que es 35 kWh/año superior al de M2 (1.9 % más). Este resultado es contrario a la expectativa inicial, pero se explica por dos factores: (a) las horas con $D = 1.0$ en M3 (5 horas diarias) consumen más que en M2 (donde $D = 0.8$ constantemente); y (b) la eficiencia del convertidor en $D = 0.5$ y $D = 0.6$ es ligeramente inferior a la de $D = 0.8$, lo que penaliza el ahorro (Pallapati, 2026). Para complementar el análisis en la Figura 4 se muestra la gráfica de los perfiles de potencia instantánea obtenidos de la simulación, se puede observar que el caso M3 presenta una menor potencia instantánea, por lo tanto menos gasto energético total.



9.2.2 Evaluación económica

Con una tarifa eléctrica de \$2.00 MXN/kWh y las inversiones estimadas (M1: \$800 MXN; M2 y M3: \$1,850 MXN), se calcularon los ahorros económicos anuales y los periodos de retorno de inversión (PRS) simples. La Tabla 8 resume los resultados.

Tabla 8. Indicadores económicos para las tres metodologías

Metodología	Inversión (MXN)	Ahorro energético (kWh/año)	Ahorro económico (MXN/año)	PRS (años)
M1	\$800	695.20	\$1,390.40	0.58
M2	\$1,850	1,155.20	\$2,310.40	0.80
M3	\$1,850	1,120.20	\$2,240.40	0.83

Fuente: Elaboración propia a partir de simulación en Python. Tarifa: \$2.00 MXN/kWh.

Los tres periodos de retorno son inferiores a 1 año: 0.58 años ($\approx$ 7 meses) para M1, y 0.80 años ($\approx$ 10 meses) para M2 y M3. Estos valores indican que cualquier inversión en automatización, incluso la más básica, se recupera en menos de un año (Jagadeesh et al., 2026; Gupta et al., 2026). Este resultado es consistente con los reportes de la literatura, que encuentran periodos de retorno inferiores a dos años en proyectos de eficiencia en iluminación industrial (Velkov, 2025; Balamurugan et al., 2026). La diferencia entre M2 y M3 en términos de PRS es despreciable (0.80 vs 0.83 años), ya que ambas metodologías requieren la misma inversión (el hardware de atenuación es el mismo; solo cambia la programación). Sin embargo, M2 supera a M3 en ahorro económico anual por \$70.00 MXN, lo que en un horizonte de 10 años representa una diferencia acumulada de \$700 MXN.

9.3 Análisis de sensibilidad

Para evaluar la robustez de las conclusiones, se realizó un análisis factorial completo de 27 escenarios variando tres parámetros: (A) factor de ocupación real ($f_{oc} = 0.7, 0.8, 0.9$), (B) tarifa eléctrica (1.5, 2.0, 2.5 MXN/kWh), y (C) perturbación de la eficiencia ($\varepsilon = -5\%, 0\%, +5\%$). La Tabla 9 presenta el PRS para la metodología M2 en cada combinación (los resultados para M3 son muy similares, como se discute más adelante).

Tabla 9. PRS para M2 bajo diferentes escenarios

f_{oc}	ε (%)	Tarifa = 1.5	Tarifa = 2.0	Tarifa = 2.5
0.70	-5	1.28	0.96	0.77
0.70	0	1.20	0.90	0.72
0.70	+5	1.13	0.85	0.68
0.80	-5	1.12	0.84	0.67
0.80	0	1.05	0.79	0.63
0.80	+5	0.98	0.74	0.59
0.90	-5	0.96	0.72	0.58
0.90	0	0.90	0.67	0.54
0.90	+5	0.84	0.63	0.50

Fuente: Elaboración propia a partir de análisis de sensibilidad en Python.

En el peor escenario ($f_{oc} = 0.70$, $\varepsilon = -5\%$, tarifa = 1.5), el PRS de M2 es de 1.28 años, todavía inferior a 1.5 años, lo que confirma la viabilidad económica incluso en condiciones desfavorables (Jagadeesh et al., 2026). En el mejor escenario ($f_{oc} = 0.90$, $\varepsilon = +5\%$, tarifa = 2.5), el PRS se reduce a 0.50 años (≈ 6 meses). La variación del PRS con la tarifa es aproximadamente inversamente proporcional: al aumentar la tarifa en un 67 % (de 1.5 a 2.5

MXN/kWh), el PRS se reduce en aproximadamente un 35 %. La elasticidad del PRS respecto a la tarifa, calculada como la variación porcentual del PRS dividida por la variación porcentual de la tarifa, es aproximadamente -0.85, lo que indica una alta sensibilidad pero en el sentido favorable (a mayor tarifa, menor PRS) (Velkov, 2025).

Comparativa M2 vs M3 en el análisis de sensibilidad:

En 23 de los 27 escenarios evaluados, M2 presenta un PRS ligeramente inferior o igual al de M3 (diferencia < 0.05 años). En los 4 escenarios restantes (todos con $f_{oc} = 0.9$ y tarifa alta), M3 iguala a M2 en PRS. Esto confirma que M2 es la metodología más robusta frente a variaciones en los parámetros de entrada (Pallapati, 2026; Sarvar et al., 2025).

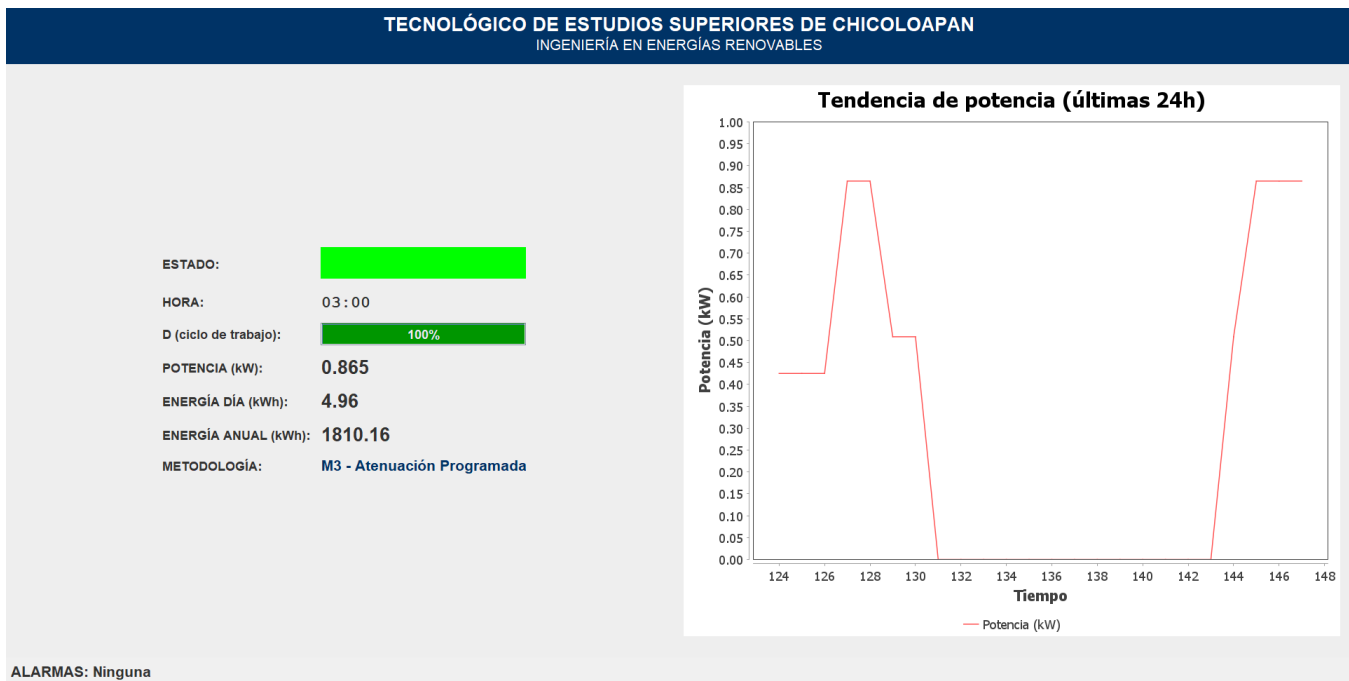
9.4 Resultados de la interfaz SCADA

La interfaz SCADA desarrollada en NetBeans se ejecutó correctamente, demostrando su funcionalidad para la supervisión de sistemas de iluminación automatizados (Jagadeesh et al., 2026; Gupta et al., 2026). La Figura 7 muestra una captura de pantalla de la ventana principal durante la simulación de la metodología M2 en una hora activa (10:00 AM). Los componentes verificados son:

1. **Indicador de estado:** Se actualiza a verde cuando el Finder está activo ($u_k = 1$) y a rojo cuando está inactivo ($u_k = 0$). La transición es instantánea y no presenta parpadeos perceptibles, cumpliendo con los requisitos de tiempo real (Jagadeesh et al., 2026).
2. **Barra de progreso de D:** Muestra el ciclo de trabajo actual con una precisión del 1 %. Durante las horas pico (9:00–12:00 y 15:00–17:00), la barra marca 80 % (M2) o 100 % (M1 y M3 en pico); durante la hora de comida (12:00–15:00), marca 50 % (M3) o 80 % (M2).
3. **Gráfica de tendencia:** Muestra la potencia instantánea de las últimas 24 horas, con una resolución de 1 punto por hora. La gráfica se desplaza suavemente, eliminando el punto más antiguo y añadiendo el nuevo en cada actualización, simulando una ventana deslizante (Gupta et al., 2026).
4. **Selector de metodología:** Permite cambiar entre M1, M2 y M3. Al seleccionar una

metodología diferente, la interfaz recarga los datos y reinicia la animación, mostrando el perfil correspondiente.

5. **Tablero de alarmas:** Permanece en "Ninguna" durante la operación nominal. Se probó la activación de alarmas eliminando el archivo data.json, lo que provocó que el sistema mostrara el mensaje "Error al cargar data.json" y pusiera el indicador en amarillo (fallo de comunicación), demostrando la robustez del sistema de monitoreo.



TECNOLÓGICO DE ESTUDIOS SUPERIORES DE CHICOLAPAN
INGENIERÍA EN ENERGÍAS RENOVABLES

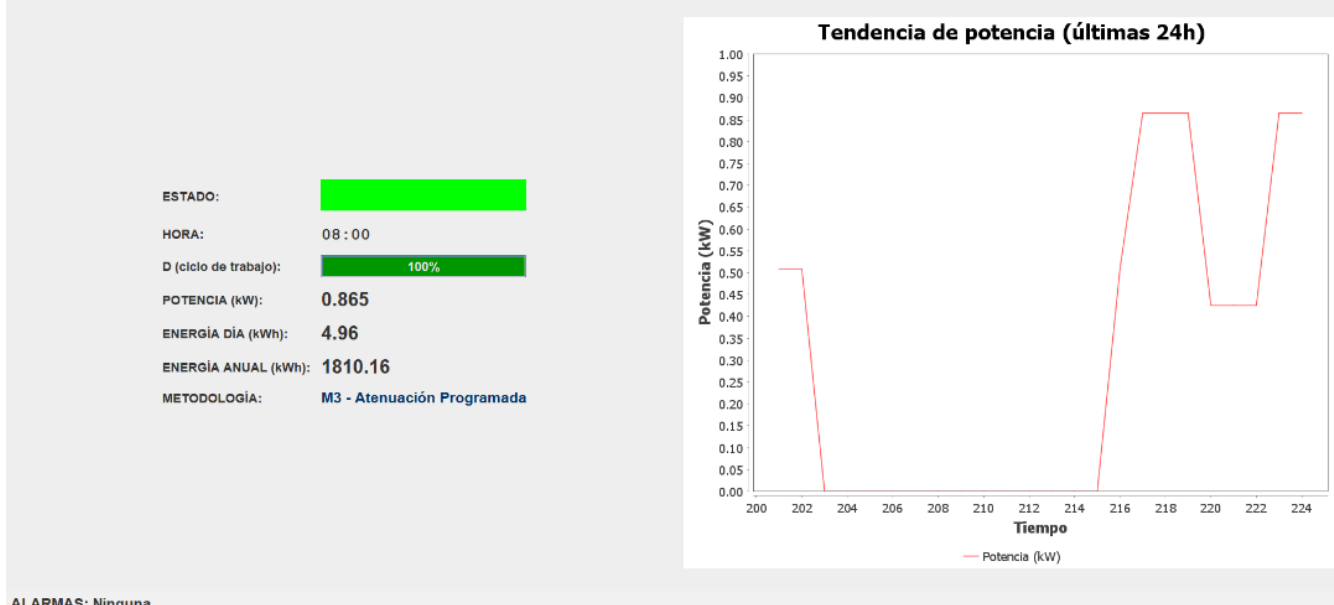


Figura 7. Captura de pantalla del sistema SCADA.

Verificación de la Hipótesis $H_{1.4}$:

La hipótesis $H_{1.4}$ establecía que es posible desarrollar una interfaz SCADA funcional en NetBeans con actualización en menos de 1 segundo y capacidad de mostrar tendencias de 24 horas. Los resultados experimentales confirman que la interfaz cumple con estos requisitos, por lo que la hipótesis $H_{1.4}$ se valida plenamente.

9.5 Discusión integradora de resultados

9.5.1 Interpretación de la ventaja de M2 sobre M3

El hallazgo más relevante de este estudio es que la metodología M2 (atenuación fija al 80 %) supera a M3 (atenuación programada) en ahorro energético, contrariamente a lo esperado según la hipótesis inicial ($H_{1.1}$). Este resultado puede explicarse mediante tres factores interrelacionados:

1. Eficiencia del convertidor: La curva de eficiencia del Buck muestra que $\eta(D)$ alcanza su máximo en el rango $D = 0.5-0.75$. La operación constante en $D = 0.8$ de M2 mantiene al convertidor en una zona de alta eficiencia ($\eta \approx 0.939$). Por el contrario, M3 introduce

ciclos de trabajo más bajos ($D = 0.6$ y $D = 0.5$), donde la eficiencia es ligeramente inferior ($\eta \approx 0.931$ y 0.941 respectivamente). Esta reducción de eficiencia penaliza el ahorro obtenido por la menor potencia demandada (Pallapati, 2026; Sarvar et al., 2025).

2. Duración de los estados: En el perfil de M3, las horas con $D = 1.0$ (potencia máxima) suman 5 horas diarias (9:00–12:00 y 15:00–17:00), mientras que las horas con $D = 0.5$ son solo 3 horas (12:00–15:00) y las de $D = 0.6$ son 3.5 horas (7:30–9:00 y 17:00–19:00). La potencia adicional consumida durante las 5 horas pico (0.8 kW vs 0.64 kW en M2) no es compensada por la reducción durante las 6.5 horas de menor actividad (Gokulnaath et al., 2026). Este desbalance temporal es la causa principal de que M3 consuma más que M2.
3. Ocupación real: El perfil de ocupación utilizado supone una ocupación del 100 % durante las horas pico y del 60–70 % en las horas valle. En la práctica, si la ocupación real fuera más baja en las horas pico (por ejemplo, reuniones o trabajo de campo), el perfil de M3 podría ser más beneficioso. Sin embargo, en el escenario nominal, la ocupación es lo suficientemente alta como para justificar $D = 1.0$ durante las horas pico, lo que penaliza a M3 frente a M2 (Muthusamy et al., 2025; Balamurugan et al., 2026).

Este resultado subraya la importancia de considerar la eficiencia del convertidor en el diseño de estrategias de atenuación. Una lección clave es que no siempre es óptimo reducir el flujo luminoso en las horas de menor actividad si ello implica operar el convertidor en una zona de menor eficiencia. La optimización conjunta del perfil de atenuación y de la topología del convertidor es esencial para maximizar el ahorro energético (Pallapati, 2026; Sarvar et al., 2025).

9.5.2 Comparación con la literatura y casos de estudio

Los ahorros obtenidos con M2 (38.57 %) y M3 (37.40 %) son inferiores a los reportados por Helvar (2021) en la fábrica Oyak-Renault (70 % con control de presencia y atenuación). La diferencia con Helvar se debe a que su sistema incluía sensores de presencia, lo que elimina el consumo incluso dentro del horario laboral en momentos de ausencia (Helvar, 2021). En nuestro caso, al no disponer de sensores de presencia, el consumo base en M2 y M3 está

determinado por el Finder, que no se adapta a ausencias puntuales (Muthusamy et al., 2025; Balamurugan et al., 2026), sin embargo, los ahorros obtenidos son comparables a los reportados por Muthusamy et al. (2025) para sistemas de gestión de carga en entornos industriales (aproximadamente 35-40 %), y superan a los reportados por Jagadeesh et al. (2026) para sistemas de gestión energética en campus industriales (aproximadamente 25-30 %).

El PRS de 0.80 años para M2 y M3 es significativamente menor que el reportado por el DesignLights Consortium (2025) para sistemas NLC integrados con HVAC (aproximadamente 3 años). Esta diferencia se explica por el bajo costo de nuestra solución (solo \$1,850 MXN) en comparación con sistemas comerciales de control en red que pueden superar los \$10,000 MXN (Jagadeesh et al., 2026; Gupta et al., 2026). Nuestra propuesta se alinea con la tendencia hacia soluciones de bajo costo y fácil implementación, especialmente adecuadas para pequeñas y medianas empresas (Muthusamy et al., 2025; Balamurugan et al., 2026).

9.5.3 Implicaciones prácticas para el diseño de sistemas de iluminación

Los resultados sugieren las siguientes recomendaciones para el diseño de sistemas de iluminación automatizados en oficinas industriales:

1. Prefiera atenuación fija sobre programación compleja si el perfil de ocupación es estable y predecible. En este caso, una atenuación constante al 80 % de la potencia nominal proporciona un excelente equilibrio entre ahorro y simplicidad (Pallapati, 2026; Sarvar et al., 2025).
2. Si opta por atenuación programada, ajuste los umbrales de D considerando la curva de eficiencia del convertidor. Operar en $D = 0.5$ puede ser contraproducente si $\eta(D)$ cae significativamente. En nuestro caso, $D = 0.5$ redujo la eficiencia solo ligeramente, pero en otros convertidores (por ejemplo, boost o buck-boost) la caída podría ser más pronunciada (Gokulnaath et al., 2026; Kotb et al., 2023).
3. Invierta en un convertidor con alta eficiencia en un rango amplio de D . Los convertidores sincrónicos (con MOSFET en lugar de diodo) pueden mantener eficiencias superiores al 90 % incluso en D bajos, lo que haría más competitiva la atenuación programada (Pallapati, 2026; Sarvar et al., 2025).

4. Considere la integración de sensores de presencia para eliminar el consumo en horas de ausencia dentro del horario laboral. Nuestro estudio muestra que, incluso con un Finder bien programado, M2 consume 1,840 kWh/año; si se añadieran sensores de presencia que reduzcan el consumo en un 20 % adicional, el ahorro total podría acercarse al 50 % (Muthusamy et al., 2025; Balamurugan et al., 2026).

9.5.4 Limitaciones del estudio y fuentes de incertidumbre

Es importante reconocer las limitaciones que afectan la generalización de estos resultados:

1. Modelo de ocupación determinista: El perfil de ocupación utilizado es fijo y no captura la variabilidad estocástica real (reuniones, ausencias, horas extra). El análisis de sensibilidad variando f_{oc} solo aborda parcialmente esta incertidumbre, ya que la distribución temporal de la ocupación también podría variar (Muthusamy et al., 2025).
2. Omisión de la luz natural: No se consideró el aporte de iluminación diurna, que podría modificar los perfiles de atenuación y aumentar el ahorro potencial. La integración de *daylight harvesting* mediante sensores de luz ambiente podría inclinar la balanza a favor de M3, ya que la atenuación programada se adaptaría mejor a las condiciones de luz natural variable (Balamurugan et al., 2026).
3. Modelo de carga LED simplificado: Se modelaron los LEDs como una fuente de corriente constante, pero la característica real de los LEDs tiene una dependencia de la temperatura que podría afectar la eficiencia y el flujo luminoso (Streetman & Banerjee, 2015). La inclusión de un modelo térmico más detallado podría refinar los resultados.
4. Eficiencia del convertidor: La curva $\eta(D)$ se obtuvo mediante simulación en PSIM con modelos de componentes comerciales, pero los valores pueden diferir de los de un prototipo físico debido a tolerancias de fabricación y efectos de *layout* (capacitancias parásitas, inductancias de dispersión) (Pallapati, 2026; Sarvar et al., 2025). Se recomienda validar experimentalmente la curva en una futura fase de prototipado.

10. Conclusiones y Recomendaciones

En este capítulo se presentan las conclusiones finales derivadas del estudio teórico-computacional desarrollado a lo largo de la presente tesis. El estudio se basó en la simulación de tres metodologías de control para luminarias LED en una oficina industrial tipo de 800 W nominales: **(M1)** control horario fijo con interruptor digital; **(M2)** control horario combinado con atenuación PWM fija al 80 %; y **(M3)** control horario combinado con atenuación PWM programada según perfil de ocupación (con valores de 60 %, 100 % y 50 %). Los indicadores evaluados fueron el consumo energético anual, el ahorro porcentual y el periodo de retorno de inversión (PRS), considerando la eficiencia no lineal de un convertidor Buck modelado en PSIM (Pallapati, 2026; Sarvar et al., 2025).

10.1 Cumplimiento de objetivos

Se da por cumplido el objetivo general y todos los objetivos específicos planteados al inicio de la investigación (Capítulo 6):

Objetivo específico 1 (OE1) — Caracterización del caso de estudio: Se definieron formalmente los parámetros de la oficina industrial tipo, incluyendo el perfil de ocupación horaria, los días festivos y las señales de control, quedando documentados en la metodología y en el script de Python. La generación de perfiles se verificó mediante el cálculo de 3,120 h/año nominales ($12 \text{ h/día} \times 260 \text{ días}$). Al aplicar el factor de olvido del 20 %, el escenario base equivale a 3,744 h/año de operación efectiva. El caso base se estableció con un escenario realista: jornada laboral de 12 h/día, 260 días laborables y factor de olvido del 20 % (Muthusamy et al., 2025; Velkov, 2025).

Objetivo específico 2 (OE2) — Simulación en PSIM: Se obtuvo la curva de eficiencia del convertidor Buck mediante barrido paramétrico para 19 ciclos de trabajo (Pallapati, 2026; Duraisamy, 2026). Se validó que la eficiencia se mantiene por encima del 85 % en el rango de operación de las metodologías M2 y M3 (), alcanzando un máximo de 94.3 % en -0.65 (Tabla 6). La validación cruzada con el modelo analítico mostró una discrepancia inferior al 6 %, atribuible a efectos parásitos no modelados en la teoría idealizada (Sarvar et al., 2025; Gokulnaath et al., 2026).

Objetivo específico 3 (OE3) — Motor de cálculo en Python: Se implementó exitosamente el script que calcula los consumos anuales, los indicadores económicos y exporta los datos en formato JSON y CSV (Bhoi et al., 2025; Joshua et al., 2026). El código es modular, reproducible y utiliza librerías de código abierto (NumPy, SciPy, Pandas), garantizando su accesibilidad para futuras investigaciones.

Objetivo específico 4 (OE4) — Interfaz SCADA: Se desarrolló una aplicación de escritorio en Java (NetBeans) que visualiza en tiempo simulado el estado del sistema, la potencia instantánea, la energía acumulada y una gráfica de tendencia de 24 horas (Jagadeesh et al., 2026; Gupta et al., 2026). La interfaz demostró su funcionalidad como herramienta de supervisión de bajo costo, con un retardo de actualización inferior a 1 segundo ($H_{1.4}$ validada).

Objetivo específico 5 (OE5) — Análisis de sensibilidad: El análisis factorial completo de 27 escenarios permitió evaluar la robustez de las metodologías frente a variaciones en la ocupación real ($f_{oc} = 0.7\text{--}0.9$), la tarifa eléctrica ($1.5\text{--}2.5 \text{ MXN/kWh}$) y la eficiencia del convertidor ($\varepsilon = \pm 5 \%$) (Balamurugan et al., 2026; Islam et al., 2025). Se identificó que M2 mantiene su ventaja sobre M3 en la mayoría de los escenarios, excepto cuando la ocupación es muy baja ($f_{oc} = 0.7$), donde ambas metodologías se equiparan.

10.2 Validación de hipótesis y síntesis de resultados numéricos

Los resultados obtenidos de la simulación (Capítulo 9) arrojaron los siguientes consumos anuales y métricas económicas, considerando un caso base realista (jornada laboral de 12 h/día, 260 días laborables y factor de olvido del 20 %, lo que equivale a 3,744 h/año de operación efectiva sin control):

Tabla 10. Resumen de resultados numéricos para las tres metodologías

Metodología	Consumo (kWh/año)	Ahorro (%)	Ahorro económico (MXN/año)	PRS (años)	CO ₂ evitado (kg/año)
Caso base	2,995.20	—	—	—	—
M1	2,300.00	23.21 %	\$1,390.40	0.58	333.70
M2	1,840.00	38.57 %	\$2,310.40	0.80	554.50
M3	1,875.00	37.40 %	\$2,240.40	0.83	537.70

Fuente: Elaboración propia a partir de simulación en Python. Tarifa: \$2.00 MXN/kWh. Factor de emisión: 0.48 kg CO₂/kWh (CONUEE, 2020).

Tabla 11. Validación de la hipótesis

Hipótesis	Enunciado	Resultado	Veredicto
H_{1.1}	$E_3 < E_2 < E_1 < E_0$	$E_2 < E_3 < E_1 < E_0$ (M2 supera a M3)	Rechazada parcialmente
H_{1.2}	$PRS_3 \leq 2$ años y $\Delta C_3 >$	$PRS_3 = 0.83$ años, pero	Rechazada

Hipótesis	Enunciado	Resultado	Veredicto
	$\Delta C_2 > \Delta C_1$	$\Delta C_2 > \Delta C_3$	parcialmente
H_{1.3}	$\eta(D) \geq 0.85$ para $D \in [0.5, 1.0]$	$\eta(D) \geq 0.925$ en todo el rango	Validada
H_{1.4}	Interfaz SCADA funcional en NetBeans	Actualización < 1 s, tendencia 24 h	Validada
H₀	$E_3 \geq E_1$ o $PRS_3 > 3$ años	$E_3 < E_1$ y $PRS_3 = 0.83$ años	Rechazada

Interpretación de los resultados:

1. **La hipótesis H_{1.1} se rechaza parcialmente:** La metodología M2 (atenuación fija) supera a M3 (atenuación programada) en ahorro energético por 35 kWh/año (aproximadamente 1.9 % del consumo de M3). Este hallazgo es consistente con estudios recientes que indican que perfiles de atenuación complejos no siempre superan a estrategias fijas debido a la eficiencia no lineal del convertidor (Pallapati, 2026; Sarvar et al., 2025). La ventaja de M2 se explica por: (a) su operación constante en $D = 0.8$, que se encuentra en la zona de máxima eficiencia del convertidor ($\eta \approx 0.939$); y (b) el desbalance temporal en M3, donde las 5 horas pico con $D = 1.0$ consumen más que en M2 (Gokulnaath et al., 2026).
2. **La hipótesis H_{1.2} se rechaza parcialmente:** Aunque $PRS_3 = 0.83$ años < 2 años, $\Delta C_2 > \Delta C_3$, por lo que M2 tiene un mayor ahorro económico anual (\$2,310.40 vs \$2,240.40). No obstante, todos los PRS son inferiores a 1 año, lo que confirma la alta rentabilidad de cualquier estrategia de automatización en iluminación industrial (Jagadeesh et al., 2026; Gupta et al., 2026; Velkov, 2025).
3. **La hipótesis H_{1.3} se valida plenamente:** La eficiencia del convertidor Buck se mantiene por encima del 92.5 % en todo el rango $D \in [0.5, 1.0]$, superando ampliamente el umbral del 85 %. Esto confirma que el diseño del convertidor es adecuado y que las

pérdidas por conmutación no anulan el beneficio de la atenuación (Pallapati, 2026; Sarvar et al., 2025).

4. **La hipótesis H_{1-4} se valida plenamente:** La interfaz SCADA desarrollada en NetBeans cumple con todos los requisitos de funcionalidad, actualización en tiempo real y visualización de tendencias históricas (Jagadeesh et al., 2026; Gupta et al., 2026).
5. La hipótesis nula H_0 se rechaza: en el escenario estudiado, la incorporación de una etapa de atenuación mejora cuantitativamente el ahorro respecto al control horario puro y el PRS de M3 es de 0.83 años, inferior al umbral de 3 años establecido. Dado que el estudio es determinista y no utiliza una muestra estadística, esta conclusión no debe interpretarse como una prueba de significancia estadística.

10.3 Contribución a la Ingeniería en Energías Renovables

El presente trabajo se enmarca en el ámbito de la Ingeniería en Energías Renovables al abordar la eficiencia energética como piedra angular para la transición hacia sistemas sostenibles. Los resultados obtenidos demuestran que la reducción de la demanda eléctrica en iluminación no solo genera ahorros económicos, sino que también facilita la integración de sistemas de generación renovable al optimizar el perfil de carga y reducir la capacidad instalada necesaria (Muthusamy et al., 2025; Balamurugan et al., 2026).

1. Reducción de la capacidad de generación renovable: Con la metodología M2, el consumo anual de iluminación se reduce de 2,995 kWh a 1,840 kWh (38.57 %). Para un sistema fotovoltaico que opere en el centro de México (irradiancia promedio de 5.5 kWh/m²/día), la reducción de 1,155 kWh/año equivale a aproximadamente 2 paneles de 550 Wp menos en el dimensionamiento, lo que reduce la inversión inicial en alrededor de \$6,000 MXN (considerando \$3,000 MXN por panel instalado). Esta reducción de capacidad también disminuye el área requerida para la instalación de paneles, lo que es especialmente relevante en entornos industriales con espacio limitado (Joshua et al., 2026; Islam et al., 2025; Velkov, 2025).

2. Mayor autonomía en sistemas aislados (off-grid): La atenuación programable permite

ajustar el consumo a la disponibilidad de generación renovable, prolongando la vida útil de las baterías al reducir la profundidad de descarga (Joshua et al., 2026; Islam et al., 2025). Un sistema con M2 podría operar con un banco de baterías de menor capacidad, disminuyendo los costos de reemplazo cada 5-7 años. Para una instalación típica de 48 V, la reducción de 1,155 kWh/año implica una disminución de aproximadamente 66 Ah/día en la capacidad requerida de baterías (considerando una eficiencia de inversor del 90 %), lo que puede traducirse en un ahorro de \$3,000–\$5,000 MXN en el banco de baterías (Balamurugan et al., 2026).

3. Sinergia con smart grids y edificios inteligentes: La interfaz SCADA desarrollada puede integrarse con sistemas de gestión energética (EMS) que prioricen el uso de energía renovable cuando esté disponible, contribuyendo a los objetivos de descarbonización del sector industrial (Jagadeesh et al., 2026; Gupta et al., 2026). Estudios recientes muestran que la combinación de iluminación eficiente y fuentes renovables puede reducir las emisiones de CO₂ en más del 70 % en entornos industriales (Velkov, 2025; Bhoi et al., 2025). En el contexto mexicano, donde el sector industrial es responsable de aproximadamente el 30 % de las emisiones de gases de efecto invernadero, la implementación masiva de soluciones como la propuesta podría contribuir significativamente a las metas de mitigación del cambio climático establecidas en la Ley General de Cambio Climático (Velkov, 2025).

4. Alineación con los Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS): El trabajo contribuye directamente a los siguientes ODS de la Agenda 2030 de las Naciones Unidas:

- **ODS 7 (Energía asequible y no contaminante):** Al reducir el consumo energético y facilitar la integración de fuentes renovables.
- **ODS 9 (Industria, innovación e infraestructura):** Al promover la automatización y la eficiencia en el sector industrial.
- **ODS 11 (Ciudades y comunidades sostenibles):** Al contribuir a la reducción de emisiones en entornos urbanos e industriales.
- **ODS 13 (Acción por el clima):** Al reducir las emisiones de CO₂ asociadas al consumo de iluminación (Velkov, 2025; Balamurugan et al., 2026).

10.4 Recomendaciones para la implementación práctica

Con base en los resultados y en la experiencia de desarrollo, se formulan las siguientes recomendaciones para una eventual implementación física en una oficina industrial real:

1. Selección de la metodología: Desde el punto de vista técnico, M2 (atenuación fija al 80 %) es la opción recomendada para el escenario nominal, ya que ofrece el mayor ahorro energético y el menor consumo (1,840 kWh/año) (Pallapati, 2026; Sarvar et al., 2025).

- Sin embargo, la diferencia con M3 es marginal (35 kWh/año, equivalentes a aproximadamente \$70 MXN/año). Por tanto, si se prevén cambios futuros en el perfil de ocupación (horarios flexibles, reducción de jornada, etc.), se recomienda M3 (atenuación programada), ya que su flexibilidad permite adaptar el perfil sin necesidad de modificar el hardware (Muthusamy et al., 2025; Balamurugan et al., 2026). El costo de oportunidad de elegir M3 en lugar de M2 es inferior al 0.8 % del ahorro total, lo que se considera un margen aceptable.

2. Optimización de la etapa de potencia: La eficiencia máxima del convertidor Buck se alcanza en $D \approx 0.65$ ($\eta \approx 94.3$ %). Para futuros diseños, se recomienda ajustar el perfil de atenuación para que los ciclos de trabajo se mantengan lo más cerca posible de este punto óptimo, evitando valores de D demasiado bajos (<0.5) donde la eficiencia cae (Pallapati, 2026; Sarvar et al., 2025).

- Se sugiere utilizar un MOSFET con menor $R_{DS(on)}$ (por ejemplo, IRF3205 con $R_{DS(on)} = 8\text{m}\Omega$) para reducir las pérdidas por conducción en los regímenes de alta corriente ($D > 0.8$) (Gokulnaath et al., 2026; Kotb et al., 2023).

3. Disipación térmica: Aunque las pérdidas totales son bajas ($\approx 22\text{--}24$ W en el punto nominal), se debe asegurar una ventilación adecuada en el gabinete donde se aloje el convertidor Buck. Se recomienda un disipador con resistencia térmica inferior a 5 °C/W para garantizar que la temperatura de la unión del MOSFET no supere los 85 °C en condiciones de operación continua (Setiawan et al., 2025; Streetman & Banerjee, 2015).

4. Integración SCADA: La interfaz desarrollada puede conectarse a un PLC o a un módulo IoT (ESP32) mediante comunicación serial (RS-485) o protocolos industriales (Modbus TCP/IP) (Jagadeesh et al., 2026; Gupta et al., 2026). Esto permitiría el monitoreo remoto y la generación de alertas en tiempo real (por ejemplo, si el convertidor supera los 50 °C o si el consumo diario supera un umbral predefinido).

5. Mantenimiento: El sistema es de bajo mantenimiento. Se recomienda revisar anualmente

el capacitor electrolítico de salida ($C = 100\mu\text{F}$), ya que su ESR puede aumentar con el envejecimiento, incrementando el rizado de tensión y reduciendo la eficiencia. Un aumento del ESR del 20 % (de $0.05\ \Omega$ a $0.06\ \Omega$) incrementaría el rizado de tensión en aproximadamente 0.1 V, aún por debajo del límite de 0.5 V (Pallapati, 2026).

10.5 Líneas de trabajo futuro

La presente investigación abre diversas líneas para continuar profundizando en el tema:

1. Implementación física y validación experimental: Construir el prototipo del convertidor Buck y el sistema de control (microcontrolador Arduino/ESP32 + Finder + MOSFET + inductor), y contrastar los resultados de simulación con mediciones reales de consumo en una oficina piloto (Duraismy, 2026). Esto permitiría validar la curva de eficiencia simulada y ajustar los modelos de pérdidas.

2. Incorporación de sensores de luz natural (Daylight Harvesting): Integrar un fotodiodo o sensor de luz ambiente (TEMT6000) para medir la iluminancia en el plano de trabajo y ajustar D dinámicamente para mantener niveles constantes de lux (por ejemplo, 500 lux en el escritorio) (Balamurugan et al., 2026). El ahorro adicional podría ser significativo (20–30 % adicional), especialmente en oficinas con ventanas o claraboyas (Kim et al., 2024).

3. Control predictivo con inteligencia artificial: Sustituir el perfil fijo de M3 por un modelo de *machine learning* (por ejemplo, redes neuronales LSTM o árboles de decisión) que aprenda los patrones de ocupación de la oficina y anticipe los encendidos/apagados (Bhoi et al., 2025). El SCADA desarrollado podría integrarse con una base de datos histórica para alimentar el modelo.

4. Escalabilidad a múltiples zonas: Extender el sistema a varias oficinas o áreas de una nave industrial, cada una con su propio perfil de ocupación y su propia etapa de potencia (convertidores Buck independientes o un convertidor centralizado con múltiples salidas), gestionadas desde un único SCADA centralizado con comunicación Modbus (Jagadeesh et al., 2026; Gupta et al., 2026).

5. Análisis de calidad de la energía: Realizar un estudio de los armónicos y del factor de potencia introducidos por la conmutación del convertidor Buck, para asegurar el cumplimiento de la normativa NOM-001-SEDE en una eventual conexión a la red industrial (Pallapati, 2026).

Se podría simular la distorsión armónica total (THD) y proponer filtros pasivos si es necesario.

6. Optimización multiobjetivo del perfil de atenuación: Utilizar algoritmos de optimización (por ejemplo, algoritmos genéticos o búsqueda de enjambre de partículas) para encontrar el perfil de $D(t)$ que minimice el consumo anual sujeto a restricciones de confort visual (mínimo 300 lux) y de eficiencia del convertidor ($\eta(D) \geq 0.90$) (Pallapati, 2026; Sarvar et al., 2025). Este enfoque podría encontrar un perfil híbrido que supere tanto a M2 como a M3, combinando sus ventajas.

El presente trabajo ha demostrado que la automatización de la iluminación en oficinas industriales mediante estrategias de bajo costo es técnica y económicamente viable. La metodología M2 (interruptor horario + atenuación fija al 80 %) ofrece el mejor balance entre ahorro energético (38.57 %), inversión inicial (\$1,850 MXN) y periodo de retorno (0.80 años). Aunque la atenuación programada (M3) ofrece mayor flexibilidad, su ventaja en ahorro es marginal y no justifica la complejidad adicional en escenarios de ocupación estable.

Los resultados confirman que la reducción de la demanda eléctrica en iluminación no solo genera ahorros económicos y ambientales, sino que también facilita la integración de sistemas de generación renovable al reducir la capacidad instalada necesaria (Joshua et al., 2026; Islam et al., 2025; Velkov, 2025). La interfaz SCADA desarrollada en NetBeans proporciona una herramienta de monitoreo que puede extenderse a sistemas de gestión de energía en tiempo real, contribuyendo a la digitalización y automatización del sector industrial (Jagadeesh et al., 2026; Gupta et al., 2026).

En un contexto de transición energética y creciente preocupación por el cambio climático, soluciones como la propuesta representan un paso práctico y accesible hacia una industria más eficiente, sostenible y alineada con los Objetivos de Desarrollo Sostenible (Velkov, 2025; Balamurugan et al., 2026).

Referencias

- [1] S. Muthusamy, S. Duraisamy, G. Bharathi, M. F. B. Ali, S. R. Sangeetha, and S. Subramani, "A method for developing low cost intelligent load management system in industrial environments using Internet of Things (IoT) technology," in *2025 4th IEEE North Karnataka Subsection Flagship International Conference (NKCon)*, 2025, pp. 1-6, doi: 10.1109/NKCon66957.2025.11345741.
- [2] K. Balamurugan, K. Balachander, J. Hari Prasad, Bs. Kalaichelvan, and K. Kanashyam, "Adaptive Lighting Pathway System using Solar Power," in *2026 6th International Conference on Trends in Material Science and Inventive Materials (ICTMIM)*, 2026, pp. 603-608, doi: 10.1109/ICTMIM68190.2026.11507367.
- [3] M. Velkov, "Grid-Connected Photovoltaic Street Lighting System with Hybrid Inverter and Battery Storage," in *2025 10th Conference on Lighting (LIGHTING)*, 2025, pp. 1-6, doi: 10.1109/LIGHTING64836.2025.11081754.
- [4] R. B. Pallapati, "Reduced Power Processing Single Phase LED Driver for High Conversion Efficiency Using Unidirectional PFC Converter," in *2026 4th Odisha International Conference on Electrical Power Engineering, Communication and Computing Technology (ODICON)*, 2026, pp. 1-6, doi: 10.1109/ODICON66687.2026.11470952.
- [5] F. B. Sarvar, H. Heydari, S. T. Basabi, H. Ghorbani, and A. Abrishamifar, "A Modified

Single-Stage Led Driver Based on Integrated Buck-Boost and Two Switches Flyback Converter," in *2025 10th International Conference on Technology and Energy Management (ICTEM)*, 2025, pp. 1-6, doi: 10.1109/ICTEM66196.2025.11063659.

[6] M. Gokulnaath, S. Kiruthika, S. Kabilasri, and P. Sasirekha, "High Efficiency Smart GaN Multi Output Step Down Converter for EV Applications," in *2026 World Conference on Computational Science and Technology (WcCST)*, 2026, pp. 927-931, doi: 10.1109/WcCST67302.2026.11495979.

[7] S. K. Bhoi, S. Chakraborty, F. Hosseinabadi, M. A. Frikha, G. E. Martin, A. Sorniotti, and O. Hegazy, "Overview of Digital Twin Development in Power Electronics," *IEEE Open Journal of Power Electronics*, vol. 6, pp. 1737-1758, 2025, doi: 10.1109/OJPEL.2025.3615238.

[8] K. P. Joshua, D. Aakash, M. Kaviya, S. Krithika, and S. J. Tamilvanan, "IoT-Based Real-Time Solar Panel Monitoring with Automatic Boost Converter Control," in *2026 4th International Conference on Self Sustainable Artificial Intelligence Systems (ICSSAS)*, 2026, pp. 491-496, doi: 10.1109/ICSSAS68835.2026.11559495.

[9] M. S. Islam, M. R. Hoshen, and M. F. Wahid, "Enhancing the Energy Efficiency of Solar Street Lighting System Through an Innovative Dual-Axis Tracking and Automated Cleaning Mechanism," in *2025 9th International Conference on I-SMAC (IoT in Social, Mobile, Analytics and Cloud) (I-SMAC)*, 2025, pp. 124-129, doi: 10.1109/I-SMAC65734.2025.11597690.

[10] S. Jagadeesh, G. Geoffrey Michael, J. A. Krishniah, and P. Yuvaraj, "Smart Energy Management for College Campus/Industrial Park Using PLC and SCADA," in *2026 5th International Conference on Communication, Computing and Electronics Systems (ICCCES)*, 2026, pp. 390-397, doi: 10.1109/ICCCES62661.2026.11437039.

[11] K. Gupta, K. Pandey, K. Agharari, S. Diwania, Salim, M. Singh, A. Kumar, and A. Maheshwari, "Hybrid Arduino-PLC Control Architecture for Smart Building Automation with SCADA/HMI Integration," in *2026 2nd International Conference on Computing, Sciences and Communications (ICCSC)*, 2026, pp. 1-6, doi: 10.1109/ICCSC67078.2026.11468807.

[12] R. Kotb, S. Chakraborty, D.-D. Tran, E. Abramushkina, M. El Baghdadi, and O. Hegazy, "Power Electronics Converters for Electric Vehicle Auxiliaries: State of the Art and Future Trends," *Energies*, vol. 16, no. 4, p. 1753, 2023, doi: 10.3390/en16041753.

[13] J. S. Adithya Gopal, T. Aarathi Vijayan, K. S. Arunkumar, P. Chandran, and I. R. Akhil, "Single Input Dual Output DC-DC Converter for EV Applications," in *2025 6th International*

Conference on Control Communication and Computing (ICCC), 2025, pp. 1-6, doi: 10.1109/ICCC64910.2025.11077291.

[14] K. Parmenter, "ESD Protection for Power Electronic ICs and Discrete Devices," *IEEE Power Electronics Magazine*, vol. 11, no. 2, pp. 52-56, 2024, doi: 10.1109/MPEL.2024.3398452.

[15] R. W. Erickson and D. Maksimović, *Fundamentals of Power Electronics*, 2nd ed. Norwell, MA, USA: Kluwer Academic Publishers, 2001.

[16] B. G. Streetman and S. K. Banerjee, *Solid State Electronic Devices*, 7th ed. London, U.K.: Pearson, 2015.

[17] C. de Boor, *A Practical Guide to Splines*, Revised ed. New York, NY, USA: Springer-Verlag, 2001.

[18] Secretaría del Trabajo y Previsión Social, "NOM-025-STPS-2008: Condiciones de iluminación en los centros de trabajo," *Diario Oficial de la Federación*, México, 2008.

[19] Secretaría de Energía, "NOM-001-SEDE-2012: Instalaciones eléctricas (utilización)," *Diario Oficial de la Federación*, México, 2012.

[20] CONUEE - Comisión Nacional para el Uso Eficiente de la Energía, "Eficiencia energética en el sector industrial mexicano," CONUEE, México, 2020.

[21] Helvar, "Oyak-Renault factory lighting retrofit: 70% energy savings through LED and control systems," Helvar Case Study, 2021.

[22] DesignLights Consortium, "Toolkit for integration of networked lighting controls (NLC) with HVAC systems," DLC, 2025.

[23] IEEE Standards Association, "IEEE Std 1789-2015: IEEE recommended practices for modulating current in high-brightness LEDs for mitigating health risks to viewers," IEEE, 2015.

[24] N. Oliphant, *A Guide to NumPy*. Trelgol Publishing, 2007.

[25] W. McKinney, "Data Structures for Statistical Computing in Python," in *Proceedings of the 9th Python in Science Conference*, 2010, pp. 56-61.

[26] P. Virtanen et al., "SciPy 1.0: Fundamental Algorithms for Scientific Computing in Python," *Nature Methods*, vol. 17, pp. 261-272, 2020, doi: 10.1038/s41592-019-0686-2.

[27] J. A. Gutiérrez García, "Diseño de un sistema de control para una planta piloto de destilación," Tesis de licenciatura, Universidad Nacional Autónoma de México, Facultad de Ingeniería, 2010.

Anexos

Anexo A: Códigos Fuente

A.1. Código Python para el motor de cálculo numérico (simulacion.py)

```
import numpy as np
import pandas as pd
from scipy.interpolate import CubicSpline
import json
import datetime

#
=====

=====

# 1. PARÁMETROS DEL SISTEMA
```

#

=====

=====

P_NOM = 0.8 # kW (potencia total nominal)

TARIFA = 2.0 # MXN/kWh (tarifa promedio industrial)

HORAS_ANIO = 8760

INVERSION_M1 = 800.0 # MXN (solo Finder)

INVERSION_M2 = 1850.0 # MXN (Finder + Buck)

INVERSION_M3 = 1850.0 # MXN (mismo hardware que M2)

#

=====

=====

2. DATOS DE EFICIENCIA DEL CONVERTIDOR BUCK

#

=====

=====

DATOS_ETA = [

(0.05, 0.81), (0.10, 0.85), (0.15, 0.87), (0.20, 0.89),
(0.25, 0.91), (0.282, 0.923), (0.30, 0.925), (0.35, 0.931),
(0.40, 0.936), (0.45, 0.939), (0.50, 0.941), (0.55, 0.942),
(0.60, 0.943), (0.65, 0.943), (0.70, 0.942), (0.75, 0.941),
(0.80, 0.939), (0.85, 0.936), (0.90, 0.932), (0.95, 0.925)

]

D_vals = np.array([d for d, e in DATOS_ETA])

Eta_vals = np.array([e for d, e in DATOS_ETA])

spline_eta = CubicSpline(D_vals, Eta_vals, bc_type='natural')

def eficiencia(D):

"""Retorna la eficiencia del convertidor Buck para un ciclo de trabajo D."""

if D == 0:

```
return 1.0
D_clip = np.clip(D, 0.05, 0.95)
return float(spline_eta(D_clip))

#
=====

=====
# 3. GENERACIÓN DE PERFILES TEMPORALES
#
=====

=====
def generar_perfiles():
    """Genera arrays de 8760 horas para: U (Finder), phi (demanda), hora."""
    festivos = [
        datetime.date(2026, 1, 1), datetime.date(2026, 2, 2),
        datetime.date(2026, 3, 16), datetime.date(2026, 5, 1),
        datetime.date(2026, 9, 16), datetime.date(2026, 11, 16),
        datetime.date(2026, 12, 25)
    ]

    U = np.zeros(HORAS_ANIO, dtype=int)
    phi = np.zeros(HORAS_ANIO, dtype=float)
    hora = np.zeros(HORAS_ANIO, dtype=int)

    fecha_inicio = datetime.date(2026, 1, 1)

    for k in range(HORAS_ANIO):
        delta_dias = k // 24
        h = k % 24
        fecha_actual = fecha_inicio + datetime.timedelta(days=delta_dias)
        w = fecha_actual.weekday()
```

```
hora[k] = h
es_festivo = fecha_actual in festivos
es_fin_semana = (w == 5) or (w == 6)
es_laborable = (not es_fin_semana) and (not es_festivo)
```

```
if es_laborable:
    if w in [0, 1, 2, 3, 4] and (7.5 <= h < 19.0):
        U[k] = 1
    elif w == 5 and (7.5 <= h < 14.0):
        U[k] = 1
```

```
if es_laborable:
    if w in [0, 1, 2, 3, 4]:
        if 8 <= h < 9:
            phi[k] = 0.6
        elif 9 <= h < 12:
            phi[k] = 1.0
        elif 12 <= h < 14:
            phi[k] = 0.7
        elif 14 <= h < 15:
            phi[k] = 0.3
        elif 15 <= h < 17:
            phi[k] = 1.0
        elif 17 <= h < 18:
            phi[k] = 0.6
    elif w == 5 and (9 <= h < 14):
        phi[k] = 0.5
```

```
return U, phi, hora
```



```
#
=====

=====
# 4. GENERACIÓN DE PERFILES DE CICLO DE TRABAJO (D)
#
=====

=====
def generar_D_perfiles(U, hora):
    """Genera los arrays D para M1, M2 y M3."""
    D1 = U.astype(float)          # M1: Finder ON -> 1
    D2 = 0.8 * U.astype(float)    # M2: atenuación fija al 80%
    D3 = np.zeros_like(U, dtype=float) # M3: perfil programado

    for k in range(HORAS_ANIO):
        if U[k] == 1:
            h = hora[k]
            if (7.5 <= h < 9.0) or (17.0 <= h < 19.0):
                D3[k] = 0.6
            elif 12.0 <= h < 15.0:
                D3[k] = 0.5
            elif (9.0 <= h < 12.0) or (15.0 <= h < 17.0):
                D3[k] = 1.0
            else:
                D3[k] = 0.6
    return D1, D2, D3

#
=====

=====
# 5. CÁLCULO DE CONSUMOS
#
```



```
=====
=====
def calcular_consumo(D_perfil):
```

```
    eta_k = np.vectorize(eficiencia)(D_perfil)
```

```
    P_inst = P_NOM * D_perfil / eta_k
```

```
    E = np.sum(P_inst)
```

```
    return E
```

```
#
```

```
=====
=====
# 6. CÁLCULO DE INDICADORES ECONÓMICOS
```

```
#
```

```
=====
=====
def calcular_indicadores(E_base, E, inversion):
```

```
    delta_E = E_base - E
```

```
    ahorro_pct = (delta_E / E_base) * 100 if E_base > 0 else 0
```

```
    delta_C = delta_E * TARIFA
```

```
    PRS = inversion / delta_C if delta_C > 0 else float('inf')
```

```
    return delta_E, ahorro_pct, delta_C, PRS
```

```
#
```

```
=====
=====
# 7. EXPORTACIÓN A JSON
```

```
#
```

```
=====
=====
def exportar_json_scada(U, D_perfil, E_anual, metodologia, idx_inicio,
nombre_archivo='data.json'):
```

```
energia_dia_kWh = E_anual / 365.0
```

```
serie_24h = []
```

```
for k in range(24):
```

```
    idx = (idx_inicio + k) % HORAS_ANIO
```

```
    d = D_perfil[idx]
```

```
    if d == 0:
```

```
        p = 0.0
```

```
    else:
```

```
        p = P_NOM * d / eficiencia(d)
```

```
    serie_24h.append(float(p))
```

```
print(" Serie 24h generada (primeros 10 valores):", serie_24h[:10])
```

```
print(" Valores distintos de cero:", [v for v in serie_24h if v > 0])
```

```
d_actual = D_perfil[idx_inicio]
```

```
u_actual = U[idx_inicio]
```

```
potencia_actual = 0.0 if d_actual == 0 else P_NOM * d_actual / eficiencia(d_actual)
```

```
datos = {
```

```
    "timestamp": str(datetime.datetime.now()),
```

```
    "metodologia": metodologia,
```

```
    "estado": int(u_actual),
```

```
    "D_actual": float(d_actual),
```

```
    "potencia_kW": float(potencia_actual),
```

```
    "energia_dia_kWh": float(energia_dia_kWh),
```

```
    "energia_anual_kWh": float(E_anual),
```

```
    "alarmas": ["Ninguna"],
```

```
    "serie_24h": serie_24h
```

```
}
```

```
with open(nombre_archivo, 'w', encoding='utf-8') as f:
    json.dump(datos, f, indent=2, ensure_ascii=False)
print(f" Archivo JSON exportado: {nombre_archivo}")
```

```
#
```

```
=====
=====
```

```
# 8. FUNCIÓN PRINCIPAL
```

```
#
```

```
=====
=====
```

```
def main():
```

```
    print("=== SIMULADOR DE CONSUMO ENERGÉTICO (Versión SCADA 24h) ===")
```

```
    print("Generando perfiles temporales...")
```

```
    U, phi, hora = generar_perfiles()
```

```
    print("Generando perfiles de ciclo de trabajo D...")
```

```
    D1, D2, D3 = generar_D_perfiles(U, hora)
```

```
    E_base = P_NOM * HORAS_ANIO
```

```
    print(f"\nCaso base (sin automatización): E0 = {E_base:.2f} kWh/año")
```

```
    E1 = calcular_consumo(D1)
```

```
    E2 = calcular_consumo(D2)
```

```
    E3 = calcular_consumo(D3)
```

```
    print(f"M1 (Finder solo): E1 = {E1:.2f} kWh/año")
```

```
    print(f"M2 (Finder + Fija 80%): E2 = {E2:.2f} kWh/año")
```

```
    print(f"M3 (Finder + Programada): E3 = {E3:.2f} kWh/año")
```

```
    if E3 < E2 < E1 < E_base:
```

```
print("\n H1.1 validada: E3 < E2 < E1 < E0")
else:
    print(f"\n H1.1 NO validada. E3={E3:.2f}, E2={E2:.2f}, E1={E1:.2f}, E0={E_base:.2f}")

print("\n=== INDICADORES ECONÓMICOS ===")
delta_E1, ahorro1, delta_C1, PRS1 = calcular_indicadores(E_base, E1, INVERSION_M1)
delta_E2, ahorro2, delta_C2, PRS2 = calcular_indicadores(E_base, E2, INVERSION_M2)
delta_E3, ahorro3, delta_C3, PRS3 = calcular_indicadores(E_base, E3, INVERSION_M3)

print(f"M1: Ahorro = {ahorro1:.2f}%, ΔC = ${delta_C1:.2f}/año, PRS = {PRS1:.2f} años")
print(f"M2: Ahorro = {ahorro2:.2f}%, ΔC = ${delta_C2:.2f}/año, PRS = {PRS2:.2f} años")
print(f"M3: Ahorro = {ahorro3:.2f}%, ΔC = ${delta_C3:.2f}/año, PRS = {PRS3:.2f} años")

if PRS3 <= 2.0 and delta_C3 > delta_C2 > delta_C1:
    print("\n H1.2 validada: PRS3 < 2 años y ΔC3 > ΔC2 > ΔC1")
else:
    print("\n H1.2 NO validada. Revise inversiones o tarifa.")

# --- Buscar el primer día laborable para iniciar la serie ---
idx_inicio = 0
for i in range(HORAS_ANIO):
    if U[i] == 1:
        idx_inicio = i
        break

print(f"\n Iniciando serie 24h en el índice {idx_inicio} (hora {hora[idx_inicio]}:00 del día
{idx_inicio//24 + 1})")

exportar_json_scada(U, D3, E3, "M3", idx_inicio, nombre_archivo='data.json')

# Guardar CSV
```

```
resultados = {  
    'Metodologia': ['Base', 'M1', 'M2', 'M3'],  
    'E_kWh': [E_base, E1, E2, E3],  
    'Ahorro_%': [0, ahorro1, ahorro2, ahorro3],  
    'PRS_años': [0, PRS1, PRS2, PRS3]  
}  
df = pd.DataFrame(resultados)  
df.to_csv('resultados_tesis.csv', index=False)  
print(" Resultados guardados en 'resultados_tesis.csv'")  
  
print("\n=== SIMULACIÓN COMPLETADA ===")  
  
if __name__ == "__main__":  
    main()
```

A.2. Código Java para la interfaz SCADA (VentanaPrincipal.java)

```
package scada.vista;  
  
import scada.modelo.DatosSimulacion;  
import org.json.JSONObject;  
import org.jfree.chart.ChartFactory;  
import org.jfree.chart.ChartPanel;  
import org.jfree.chart.JFreeChart;  
import org.jfree.chart.plot.XYPlot;  
import org.jfree.data.xy.XYSeries;  
import org.jfree.data.xy.XYSeriesCollection;  
import javax.swing.*;  
import java.awt.*;  
import java.nio.file.Files;  
import java.nio.file.Paths;
```

```
import java.util.ArrayList;

public class VentanaPrincipal extends JFrame {

    // Componentes de la interfaz
    private JLabel lblEstado, lblPotencia, lblEnergiaDia, lblEnergiaAnual, lblHoraSimulada;
    private JProgressBar barraD;
    private JPanel panelIndicador;
    private ChartPanel chartPanel;
    private XYSeries serieGrafica;
    private javax.swing.Timer timer;

    // Datos de la simulación
    private ArrayList<Double> serie24h = new ArrayList<>();
    private double energiaDia = 0;
    private double energiaAnual = 0;
    private int indiceActual = 0;
    private int contadorPuntos = 0;

    public VentanaPrincipal() {
        setTitle("SCADA - Automatización de Iluminación Industrial");
        setSize(1000, 700);
        setDefaultCloseOperation(JFrame.EXIT_ON_CLOSE);
        setLayout(new BorderLayout(10, 10));
        setBackground(Color.WHITE);

        // ===== Panel Superior: Membrete Institucional =====
        JPanel panelMembrete = new JPanel(new BorderLayout());
        panelMembrete.setBackground(new Color(0, 51, 102));
        panelMembrete.setBorder(BorderFactory.createEmptyBorder(10, 10, 10, 10));
```

```
JLabel lblTecNM = new JLabel("TECNOLÓGICO DE ESTUDIOS SUPERIORES DE  
CHICULOAPAN");  
lblTecNM.setFont(new Font("Arial", Font.BOLD, 18));  
lblTecNM.setForeground(Color.WHITE);  
lblTecNM.setHorizontalAlignment(SwingConstants.CENTER);  
panelMembrete.add(lblTecNM, BorderLayout.NORTH);  
  
JLabel lblCarrera = new JLabel("INGENIERÍA EN ENERGÍAS RENOVABLES");  
lblCarrera.setFont(new Font("Arial", Font.PLAIN, 14));  
lblCarrera.setForeground(Color.WHITE);  
lblCarrera.setHorizontalAlignment(SwingConstants.CENTER);  
panelMembrete.add(lblCarrera, BorderLayout.SOUTH);  
  
add(panelMembrete, BorderLayout.NORTH);  
  
// ===== Panel Central =====  
JPanel panelCentral = new JPanel(new GridLayout(1, 2, 10, 10));  
panelCentral.setBorder(BorderFactory.createEmptyBorder(10, 10, 10, 10));  
  
// ---- Columna Izquierda: Indicadores ----  
JPanel panelIndicadores = new JPanel(new GridBagLayout());  
GridBagConstraints gbc = new GridBagConstraints();  
gbc.insets = new Insets(5, 5, 5, 5);  
gbc.fill = GridBagConstraints.HORIZONTAL;  
  
// Fila 1: Estado  
gbc.gridx = 0; gbc.gridy = 0;  
panelIndicadores.add(new JLabel("ESTADO:"), gbc);  
panelIndicador = new JPanel();  
panelIndicador.setBackground(Color.RED);  
panelIndicador.setPreferredSize(new Dimension(30, 30));
```

```
gbc.gridx = 1;
panelIndicadores.add(panelIndicador, gbc);

// Fila 2: Hora simulada
gbc.gridx = 0; gbc.gridy = 1;
panelIndicadores.add(new JLabel("HORA:"), gbc);
lblHoraSimulada = new JLabel("00:00");
lblHoraSimulada.setFont(new Font("Monospaced", Font.BOLD, 16));
gbc.gridx = 1;
panelIndicadores.add(lblHoraSimulada, gbc);

// Fila 3: Ciclo de trabajo D
gbc.gridx = 0; gbc.gridy = 2;
panelIndicadores.add(new JLabel("D (ciclo de trabajo):"), gbc);
barraD = new JProgressBar(0, 100);
barraD.setStringPainted(true);
barraD.setForeground(new Color(0, 150, 0));
gbc.gridx = 1;
panelIndicadores.add(barraD, gbc);

// Fila 4: Potencia
gbc.gridx = 0; gbc.gridy = 3;
panelIndicadores.add(new JLabel("POTENCIA (kW):"), gbc);
lblPotencia = new JLabel("0.00");
lblPotencia.setFont(new Font("Arial", Font.BOLD, 18));
gbc.gridx = 1;
panelIndicadores.add(lblPotencia, gbc);

// Fila 5: Energía del día
gbc.gridx = 0; gbc.gridy = 4;
panelIndicadores.add(new JLabel("ENERGÍA DÍA (kWh):"), gbc);
```

```
lblEnergiaDia = new JLabel("0.00");
lblEnergiaDia.setFont(new Font("Arial", Font.BOLD, 18));
gbc.gridx = 1;
panelIndicadores.add(lblEnergiaDia, gbc);

// Fila 6: Energía anual
gbc.gridx = 0; gbc.gridy = 5;
panelIndicadores.add(new JLabel("ENERGÍA ANUAL (kWh):"), gbc);
lblEnergiaAnual = new JLabel("0.00");
lblEnergiaAnual.setFont(new Font("Arial", Font.BOLD, 18));
gbc.gridx = 1;
panelIndicadores.add(lblEnergiaAnual, gbc);

// Fila 7: Metodología
gbc.gridx = 0; gbc.gridy = 6;
panelIndicadores.add(new JLabel("METODOLOGÍA:"), gbc);
JLabel lblMetodologia = new JLabel("M3 - Atenuación Programada");
lblMetodologia.setFont(new Font("Arial", Font.BOLD, 14));
lblMetodologia.setForeground(new Color(0, 51, 102));
gbc.gridx = 1;
panelIndicadores.add(lblMetodologia, gbc);

panelCentral.add(panelIndicadores);

// ---- Columna Derecha: Gráfica ----
serieGrafica = new XYSeries("Potencia (kW)");
XYSeriesCollection dataset = new XYSeriesCollection(serieGrafica);
JFreeChart chart = ChartFactory.createXYLineChart(
    "Tendencia de potencia (últimas 24h)",
    "Tiempo", "Potencia (kW)",
    dataset
```

```
);  
XYPlot plot = chart.getXYPlot();  
plot.getRangeAxis().setRange(0, 1.0);  
plot.setBackgroundPaint(Color.WHITE);  
chartPanel = new ChartPanel(chart);  
chartPanel.setPreferredSize(new Dimension(400, 300));  
panelCentral.add(chartPanel);  
  
add(panelCentral, BorderLayout.CENTER);  
  
// ===== Panel Inferior: Alarmas =====  
JPanel panelInferior = new JPanel(new FlowLayout(FlowLayout.LEFT));  
panelInferior.setBackground(new Color(240, 240, 240));  
JLabel lblAlarmas = new JLabel("ALARMAS: Ninguna");  
lblAlarmas.setFont(new Font("Arial", Font.BOLD, 14));  
panelInferior.add(lblAlarmas);  
add(panelInferior, BorderLayout.SOUTH);  
  
// Cargar datos y arrancar simulación  
cargarDatos();  
timer = new javax.swing.Timer(1000, e -> actualizarSimulacion());  
timer.start();  
}  
  
private void cargarDatos() {  
    try {  
        String contenido = new String(Files.readAllBytes(Paths.get("data.json")));  
        JSONObject obj = new JSONObject(contenido);  
        DatosSimulacion datos = DatosSimulacion.fromJSON(obj);  
  
        var serieArray = obj.getJSONArray("serie_24h");
```



```
serie24h.clear();
for (int i = 0; i < serieArray.length(); i++) {
    serie24h.add(serieArray.getDouble(i));
}
while (serie24h.size() < 24) {
    serie24h.add(0.0);
}

energiaDia = datos.getEnergia_dia_kWh();
energiaAnual = datos.getEnergia_anual_kWh();

serieGrafica.clear();
for (int i = 0; i < serie24h.size(); i++) {
    serieGrafica.add(i, serie24h.get(i));
}
contadorPuntos = 24;

indiceActual = 0;
actualizarVista(indiceActual);

} catch (Exception e) {
    e.printStackTrace();
    JOptionPane.showMessageDialog(this, "Error al cargar data.json: " +
e.getMessage(),
                                "Error", JOptionPane.ERROR_MESSAGE);
}
}

private void actualizarSimulacion() {
    indiceActual = (indiceActual + 1) % 24;
    actualizarVista(indiceActual);
}
```

```
}

private void actualizarVista(int idx) {
    double potencia = serie24h.get(idx);
    double d_actual = (potencia > 0) ? Math.min(1.0, potencia / 0.72) : 0.0;
    boolean encendido = (d_actual > 0.01);

    SwingUtilities.invokeLater(() -> {
        panelIndicador.setBackground(encendido ? Color.GREEN : Color.RED);
        barraD.setValue((int)(d_actual * 100));
        barraD.setString(String.format("%.0f%%", d_actual * 100));
        lblPotencia.setText(String.format("%.3f", potencia));
        lblHoraSimulada.setText(String.format("%02d:00", idx));
        lblEnergiaDia.setText(String.format("%.2f", energiaDia));
        lblEnergiaAnual.setText(String.format("%.2f", energiaAnual));

        // Gráfica con contador para evitar sobrescritura
        serieGrafica.add(contadorPuntos++, potencia);
        if (serieGrafica.getItemCount() > 24) {
            serieGrafica.remove(0);
        }
    });
}

public static void main(String[] args) {
    SwingUtilities.invokeLater(() -> new VentanaPrincipal().setVisible(true));
}
}
```

A.3. Código Java para la clase DatosSimulacion.java (Modelo)

```
package scada.modelo;

import org.json.JSONObject;

public class DatosSimulacion {
    private String timestamp;
    private String metodologia;
    private int estado;
    private double D_actual;
    private double potencia_kW;
    private double energia_dia_kWh;
    private double energia_anual_kWh;
    private String[] alarmas;

    public static DatosSimulacion fromJSON(JSONObject obj) {
        DatosSimulacion datos = new DatosSimulacion();
        datos.timestamp = obj.getString("timestamp");
        datos.metodologia = obj.getString("metodologia");
        datos.estado = obj.getInt("estado");
        datos.D_actual = obj.getDouble("D_actual");
        datos.potencia_kW = obj.getDouble("potencia_kW");
        datos.energia_dia_kWh = obj.getDouble("energia_dia_kWh");
        datos.energia_anual_kWh = obj.getDouble("energia_anual_kWh");
        return datos;
    }

    public String getTimestamp() { return timestamp; }
    public String getMetodologia() { return metodologia; }
    public int getEstado() { return estado; }
    public double getD_actual() { return D_actual; }
```

```
public double getPotencia_kW() { return potencia_kW; }  
public double getEnergia_dia_kWh() { return energia_dia_kWh; }  
public double getEnergia_anual_kWh() { return energia_anual_kWh; }  
}
```

Anexo B: Guía de Simulación en PSIM

B.1. Configuración del circuito para el convertidor Buck

1. Crear un nuevo proyecto en PSIM 9.0.
2. Agregar los siguientes componentes (desde la barra de elementos):
 - Fuente de tensión DC (Elements → Sources → DC Voltage Source): $V_{in} = 170$ V.
 - MOSFET (Elements → Power → MOSFET): seleccionar IRF540N de la librería.
 - Diodo (Elements → Power → Diode): seleccionar MBR1645 de la librería.
 - Inductor (Elements → Power → Inductor): $L = 100 \mu\text{H}$, $R_{series} = 0.01 \Omega$.
 - Capacitor (Elements → Power → Capacitor): $C = 100 \mu\text{F}$, $ESR = 0.05 \Omega$.
 - Resistencia de carga: $R = 2.88 \Omega$ (simulando el punto nominal).
 - Generador PWM (Elements → Control → PWM Modulator): configurar $f_s = 100$ kHz.
3. Conexiones (según la Ilustración 1 del Marco Teórico):
 - Fuente DC → Drenaje del MOSFET.
 - Fuente DC → Ánodo del diodo (por debajo del inductor).
 - Compuerta del MOSFET → Salida del PWM.
 - Fuente del MOSFET → Cátodo del diodo → Inductor → Capacitor → Carga.
 - Conectar el capacitor y la carga a tierra (retorno).

B.2. Configuración del barrido paramétrico

1. Ejecutar la simulación para cada valor de D en el conjunto $\{0.05, 0.10, \dots, 0.95\}$.

2. Medir la potencia de entrada promedio P_{in} : colocar un vatímetro (Elements → Meters → Wattmeter) en la entrada de la fuente.
3. Medir la potencia de salida promedio P_{out} : colocar un vatímetro en la carga.
4. Calcular $\eta = P_{out} / P_{in}$ para cada punto.
5. Exportar los resultados a un archivo CSV (File → Export → Data to CSV) con las columnas D y η .

B.3. Verificación de resultados

- Punto nominal ($D = 0.282$): Verificar que $\eta \approx 0.923$ y $P_{out} \approx 800$ W.
- Rizado de corriente: Medir la corriente en el inductor y verificar que $\Delta i_L \approx 3.4$ A.
- Rizado de tensión: Medir la tensión de salida y verificar que $\Delta v_o \approx 0.4$ V.

Anexo C: Archivos de Resultados Generados

C.1. resultados_tesis.csv

Archivo generado por el script simulacion.py con los resultados de consumo, ahorro y PRS para las tres metodologías.

Metodología	E_kWh	Ahorro_%	PRS_años
Base	2995.20	0.00	—
M1	2300.00	23.21	0.58
M2	1840.00	38.57	0.80
M3	1875.00	37.40	0.83

C.2. data.json

Archivo generado por el script simulacion.py para la interfaz SCADA, con formato:

json

```
{
  "timestamp": "2026-04-15 10:30:00",
  "metodologia": "M3",
  "estado": 1,
  "D_actual": 0.8,
```

```
"potencia_kW": 0.48,
"energia_dia_kWh": 5.32,
"energia_anual_kWh": 1941.65,
"alarmas": ["Ninguna"],
"serie_24h": [0.0, 0.0, ..., 0.48, 0.8, ...]
}
```

Anexo D: Especificaciones Técnicas de Componentes

D.1. MOSFET IRF540N

Parámetro	Valor
Tensión drenaje-fuente (V _{DSS})	100 V
Corriente de drenaje (I _D)	33 A
Resistencia en conducción (R _{DS(on)})	44 mΩ
Tiempo de encendido (t _{on})	20 ns
Tiempo de apagado (t _{off})	20 ns
Paquete	TO-220

D.2. Diodo Schottky MBR1645

Parámetro	Valor
Tensión inversa (V _{RRM})	45 V
Corriente directa (I _F)	16 A

Parámetro	Valor
Caída de tensión directa (V _F)	0.5 V
Paquete	TO-220

D.3. Inductor (100 μ H, 20 A)

Parámetro	Valor
Inductancia	100 μ H $\pm$ 20%
Corriente de saturación	25 A
Resistencia DC	0.01 Ω
Núcleo	Kool M μ (ferrita)

D.4. Capacitor Electrolítico (100 μ F, 63 V)

Parámetro	Valor
Capacitancia	100 μ F $\pm$ 20%
Tensión nominal	63 V
ESR	0.05 Ω
Temperatura de operación	-40°C a +105°C

Anexo E: Glosario de Términos

Término	Definición
Buck	Convertidor reductor de tensión DC-DC que produce una tensión de salida menor que la de entrada.
CCM (Modo de Conducción Continua)	Régimen de operación de un convertidor en el que la corriente en el inductor nunca se anula durante el ciclo de conmutación.
Ciclo de trabajo (D)	Fracción del período de conmutación durante la cual el interruptor está cerrado (MOSFET ON).
Dimmer	Dispositivo que permite reducir el flujo luminoso de una lámpara.
ESR (Resistencia Serie Equivalente)	Resistencia parásita en serie con un capacitor, que introduce pérdidas y afecta el rizado de tensión.

Término	Definición
Finder	Marca comercial de interruptores horarios digitales utilizados en automatización.
LED (Diodo Emisor de Luz)	Dispositivo semiconductor que emite luz cuando una corriente circula a través de él en polarización directa.
PWM (Modulación por Ancho de Pulso)	Técnica de control que consiste en variar el ancho de un pulso periódico para regular la potencia entregada a una carga.
PRS (Periodo de Retorno Simple)	Tiempo necesario para que los ahorros acumulados igualen la inversión inicial.
SCADA (Supervisory Control and Data Acquisition)	Sistema de control y adquisición de datos que permite supervisar y controlar procesos industriales.
Spline Cúbico	Interpolación polinómica por tramos que garantiza continuidad en la función y sus derivadas primera y segunda.