

Universidad Católica de Santa María
Facultad de Ciencias e Ingenierías Físicas y Formales
Escuela Profesional de Ingeniería Mecatrónica



**Automatización para reducir el consumo energético en la Escuela Profesional
de Ingeniería de Sistemas de la UNAMAD - 2025**

Tesis presentada por el Bachiller:

Valer Campos, Hamilton Mauricio

ORCID: 0009-0001-4079-3610

Para optar el Título Profesional de Ingeniero Mecatrónico

Asesor:

Dr. Collado Oporto, Christiam Guillermo

ORCID: 0000-0002-0529-738X

Arequipa - Perú

2026

UCSM-ERP

UNIVERSIDAD CATÓLICA DE SANTA MARÍA

INGENIERIA MECATRONICA

TITULACIÓN CON TESIS

DICTAMEN APROBACIÓN DE BORRADOR

Arequipa, 24 de Enero del 2026

Dictamen: 014873-C-EPIMMEM-2026

Visto el borrador del expediente 014873, presentado por:

2019247991 - VALER CAMPOS HAMILTON MAURICIO

Titulado:

**AUTOMATIZACIÓN PARA REDUCIR EL CONSUMO ENERGÉTICO EN LA ESCUELA PROFESIONAL
DE INGENIERÍA DE SISTEMAS DE LA UNAMAD - 2025**

Nuestro dictamen es:

APROBADO

Título Profesional/Título de Segunda Especialidad/Grado Académico a optar:

INGENIERO MECATRÓNICO

**29592341 - MESTAS RAMOS SERGIO ORLANDO
DICTAMINADOR**



**29720651 - ZEGARRA GAGO HENRY CHRISTIAN
DICTAMINADOR**



**46292714 - SILES NATES FERNANDO DAVID
DICTAMINADOR**



Automatización para reducir el consumo energético en la Escuela Profesional de Ingeniería de Sistemas de la UNAMAD - 2025

INFORME DE ORIGINALIDAD

14%

INDICE DE SIMILITUD

13%

FUENTES DE INTERNET

4%

PUBLICACIONES

6%

TRABAJOS DEL ESTUDIANTE

FUENTES PRIMARIAS

1	www.coursehero.com	Fuente de Internet	1 %
2	Submitted to Universidad Católica de Santa María	Trabajo del estudiante	1 %
3	Submitted to Universidad Cesar Vallejo	Trabajo del estudiante	1 %
4	Submitted to Instituto Superior de Artes, Ciencias y Comunicación IACC	Trabajo del estudiante	1 %
5	Submitted to Universidad Nacional Abierta y a Distancia, UNAD, UNAD	Trabajo del estudiante	<1 %
6	repositorio.uancv.edu.pe	Fuente de Internet	<1 %
7	repositorio.ucsm.edu.pe	Fuente de Internet	<1 %

DEDICATORIA

El presente trabajo de investigación está dedicado, en primer lugar, a mi familia, por su apoyo constante, comprensión y confianza a lo largo de mi formación profesional. Su aliento ha sido un pilar fundamental para superar cada desafío académico y personal.

Asimismo, dedico este esfuerzo a los docentes de la Escuela Profesional de Ingeniería de Sistemas de la Universidad Nacional Amazónica de Madre de Dios, quienes, con sus conocimientos, orientación y compromiso, contribuyeron significativamente a mi desarrollo académico y profesional.

Finalmente, esta investigación está dedicada a la Universidad Nacional Amazónica de Madre de Dios, como un aporte al fortalecimiento de la eficiencia energética y la innovación tecnológica en beneficio de la comunidad universitaria y del desarrollo sostenible de la región.

AGRADECIMIENTOS

Agradezco en primer lugar a Dios por brindarme salud, fortaleza y perseverancia para culminar esta etapa importante de mi formación profesional.

Expreso mi profundo agradecimiento a la Universidad Católica de Santa María, a la Facultad de Ciencias e Ingenierías Físicas y Formales y a la Escuela Profesional de Ingeniería Mecatrónica, por la formación académica recibida y por proporcionarme las herramientas necesarias para desarrollar el presente trabajo de investigación.

Mi especial agradecimiento al asesor del proyecto, por su orientación constante, paciencia y valiosos aportes técnicos, los cuales fueron fundamentales para el desarrollo y culminación de esta investigación.

Agradezco también a los docentes que, a lo largo de la carrera, compartieron sus conocimientos y experiencias, contribuyendo de manera directa a mi crecimiento profesional.

Finalmente, agradezco de manera sincera a mi familia y a mis compañeros, por su apoyo incondicional, comprensión y motivación en los momentos más exigentes del proceso, ya que su respaldo fue clave para alcanzar este logro.

RESUMEN

La presente investigación aborda una problemática crítica en el ámbito universitario: el elevado consumo energético en las instalaciones de la Escuela Profesional de Ingeniería de Sistemas de la Universidad Nacional Amazónica de Madre de Dios (UNAMAD). En un contexto donde los recursos económicos son limitados y la sostenibilidad ambiental es una prioridad, se propone el diseño e implementación de un sistema automatizado que integre una Raspberry Pi y un Controlador Lógico Programable (PLC) para optimizar el uso de la energía eléctrica.

El sistema está orientado al monitoreo y control de dispositivos como iluminación, ventilación y equipos electrónicos, mediante sensores de ocupación y medidores de consumo. La arquitectura propuesta permite la supervisión en tiempo real, la toma de decisiones automatizada y la generación de reportes energéticos. Aunque aún no se cuenta con datos definitivos sobre el impacto del sistema, se espera que su implementación contribuya significativamente a la reducción del consumo energético, con estimaciones preliminares que proyectan una disminución superior al 20%.

La metodología empleada es de tipo aplicada-experimental, con fases de diagnóstico, diseño, implementación y validación. Se utilizaron herramientas como Node-RED, Python, TIA Portal y protocolos de comunicación industrial como Modbus RTU. El sistema fue diseñado bajo estándares técnicos nacionales e internacionales, incluyendo IEC 61158, IEEE 1459 e ISO 50001.

Además de los beneficios técnicos, se espera que el proyecto fomente una cultura de eficiencia energética entre estudiantes, docentes y personal administrativo, promoviendo el uso responsable de los recursos y fortaleciendo la formación en automatización industrial. El modelo desarrollado es escalable y replicable, lo que permite su adaptación a otras instituciones educativas de la región amazónica y del país.

Palabras claves: Eficiencia energética, Automatización, Monitoreo energético

ABSTRACT

This research addresses a critical issue in university infrastructure: the high energy consumption within the facilities of the School of Systems Engineering at the National Amazonian University of Madre de Dios (UNAMAD). In a context where financial resources are limited and environmental sustainability is a priority, the study proposes the design and implementation of an automated system that integrates a Raspberry Pi and a Programmable Logic Controller (PLC) to optimize electricity usage.

The system is designed to monitor and control devices such as lighting, ventilation, and electronic equipment using occupancy sensors and energy meters. The proposed architecture enables real-time supervision, automated decision-making, and the generation of energy reports. Although final impact data is not yet available, it is expected that the implementation will significantly reduce energy consumption, with preliminary estimates projecting a reduction of over 20%.

The methodology applied is experimental and practical, involving phases of diagnosis, design, implementation, and validation. Tools such as Node-RED, Python, TIA Portal, and industrial communication protocols like Modbus RTU were used. The system was developed in compliance with national and international technical standards, including IEC 61158, IEEE 1459, and ISO 50001.

Beyond technical benefits, the project is expected to foster a culture of energy efficiency among students, faculty, and administrative staff, encouraging responsible resource use and strengthening training in industrial automation. The developed model is scalable and replicable, allowing adaptation to other educational institutions in the Amazon region and across the country.

Keywords: Energy efficiency, Automation, Energy monitoring

ÍNDICE

DEDICATORIA

AGRADECIMIENTOS

RESUMEN

ABSTRACT

INTRODUCCIÓN	1
CAPÍTULO I.....	2
1. Marco metodológico.....	2
1.1. Descripción del problema.....	2
1.2. Justificación.....	3
1.3. Limitaciones	4
1.4. Variables.....	5
1.5. Objetivos	6
1.6. Antecedentes	6
CAPÍTULO II	7
2. Marco teórico.....	7
2.1. Antecedentes de la investigación	7
2.1.1. Nacionales	7
2.1.2. Internacionales.....	8
2.2. Bases teóricas	14
2.2.1. Automatización.....	15
2.2.2. Microcontrolador	15
2.2.3. PLC (Controlador Lógico Programable)	16
2.2.4. Reducción del consumo energético	17
2.2.5. Integración de Raspberry Pi y PLC	17
2.2.6. Protocolos de comunicación industrial.....	19
2.2.7. Eficiencia energética en instituciones educativas.....	20
2.2.8. Aplicaciones internacionales	20
2.2.9. Normativas técnicas.....	20
2.2.10. Impacto ambiental y social	22
2.2.11. Economía circular e ingeniería verde	23
2.2.12. Perspectivas futuras	24
2.2.13. Definición de términos técnicos	24



CAPÍTULO III	27
3. Diseño conceptual.....	27
3.1. Metodología de diseño e investigación	27
3.1.1. Nivel de Investigación	27
3.1.2. Diseño de investigación.....	29
3.1.3. Población y Muestra	30
3.1.4. Validación y criterios de exactitud del sistema de medición.....	32
3.1.5. Técnicas e instrumentos de recolección de datos	33
3.1.6. Técnicas de procesamiento y análisis de datos.....	34
3.1.7. Desarrollo de los objetivos de la investigación	36
3.1.8. Procedimiento del análisis estadístico	56
CAPÍTULO IV	59
4. Diseño de detalle	59
4.1. Criterios de Selección de equipos y componentes	59
4.1.1. Lista de exigencias del sistema automatizado	59
4.1.2. Evaluación comparativa de alternativas tecnológicas	60
4.1.3. Selección final y justificación.....	60
4.1.4. Recursos financieros:.....	61
4.1.5. Cronograma de actividades	63
4.1.6. Evaluación económica: ROI y periodo de recuperación	64
4.2. Diseño del prototipo de la solución.....	66
CONCLUSIONES	71
RECOMENDACIONES	73
REFERENCIAS	74
ANEXOS.....	76

ÍNDICE TABLA

Tabla 1	<i>Variables de la investigación</i>	5
Tabla 2	<i>Comparación de tecnologías internacionales vs. contexto peruano</i>	13
Tabla 3	<i>Comparación de características para la integración Raspberry Pi y PLC</i>	18
Tabla 4	<i>Normativas nacionales</i>	21
Tabla 5	<i>Normativas internacionales</i>	21
Tabla 6	<i>Normativas VDI/VDE (alemanas)</i>	22
Tabla 7	<i>Matriz morfológica</i>	28
Tabla 8	<i>Fases del proyecto</i>	29
Tabla 9	<i>Ambientes de muestra</i>	32
Tabla 10	<i>Técnicas utilizadas de recolección de datos</i>	33
Tabla 11	<i>Técnicas utilizadas de procesamiento de datos</i>	35
Tabla 12	<i>Técnicas utilizadas de validación de datos</i>	35
Tabla 13	<i>Parámetros de diseño (Alineados a la UNAMAD)</i>	38
Tabla 14	<i>Pruebas de funcionalidad primera etapa</i>	39
Tabla 15	<i>Pruebas de funcionalidad segunda etapa</i>	40
Tabla 16	<i>Consumo energético semanal promedio por laboratorio antes y después de la implementación</i>	41
Tabla 17	<i>Cronograma y recursos</i>	42
Tabla 18	<i>Parámetros de comunicación</i>	44
Tabla 19	<i>Consumo energético semanal promedio y proyección anual por laboratorio</i>	48
Tabla 20	<i>Resultados obtenidos</i>	50
Tabla 21	<i>Comparación mensual entre consumo agregado medido y simulado calibrado en laboratorios</i>	51
Tabla 22	<i>Checklist de validación</i>	55
Tabla 23	<i>Adaptaciones según contexto institucional</i>	55
Tabla 24	<i>Supuestos de la prueba t</i>	57
Tabla 25	<i>Lista de exigencias del sistema automatizado de control energético</i>	59
Tabla 26	<i>Evaluación comparativa de alternativas tecnológicas del sistema automatizado</i>	60
Tabla 27	<i>Presupuesto de inversión inicial del sistema automatizado (CAPEX)</i>	61
Tabla 28	<i>Costos operativos anuales del sistema (OPEX)</i>	62



Tabla 29 <i>Cronograma de actividades</i>	63
Tabla 30 <i>Retorno de inversión (ROI) y periodo de recuperación (Payback)</i>	66

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1 Fases del proyecto.....	29
Figura 2 Flujo de procesamiento.....	34
Figura 3 Diagrama de comunicación	43
Figura 4 Comparación del consumo energético (antes vs despues).....	53
Figura 5 Diseño propuesto	66

ÍNDICE DE ANEXOS

Anexo 1. Cuestionario de recolección de datos	76
Anexo 2. Control de energía - Rapsberry.....	77
Anexo 3. Control iluminación – PLC.....	79
Anexo 4. Control ventilación – PLC.....	80
Anexo 5. Diagrama multifilar de automatización energética.....	81
Anexo 6. Diagrama de conexiones PLC S7-1214C	82
Anexo 7. Tablas de selección de componentes según VDI 2225.....	83
Anexo 8. Checklist instalación.....	87
Anexo 9. Protocolo de replicación del sistema de automatización energética – UNAMAD.....	88

INTRODUCCIÓN

Hoy en día, la optimización del uso de la energía se ha convertido en un problema importante en las instalaciones de investigación y en las instituciones educativas, especialmente en situaciones en las que la eficiencia energética es una de las principales preocupaciones y los recursos son escasos.

La Escuela Profesional de Ingeniería de Sistemas de la Universidad Nacional Amazónica de Madre de Dios (UNAMAD) ha experimentado un fuerte incremento en el uso de la energía en sus instalaciones, lo que repercute en la sostenibilidad medioambiental y en los costes de funcionamiento. Esta circunstancia pone de relieve la urgencia de poner en marcha soluciones tecnológicas para reducir el consumo de energía sin sacrificar la calidad de los procedimientos administrativos y educativos.

Una solución prometedora a este problema es la automatización de los sistemas eléctricos mediante tecnologías de vanguardia. En este sentido, la integración de plataformas como Raspberry Pi con controladores lógicos programables (PLC) ofrece una forma económica y eficaz de controlar automáticamente el uso de la energía. Cuando se combina con la versatilidad y durabilidad de los PLC, la Raspberry Pi, un microprocesador de bajo coste y alto rendimiento, puede permitir la supervisión y el control del sistema eléctrico en tiempo real, maximizando la utilización de la energía por parte de la institución.

El objetivo de este estudio es crear un plan de automatización que combine una Raspberry Pi y un PLC para regular y disminuir el uso de energía en la Escuela Profesional de Ingeniería en Sistemas de la UNAMAD.

Además de reducir los gastos operativos, este enfoque fomentará una cultura de eficiencia energética entre el personal y los estudiantes de la universidad, mejorando la sostenibilidad y el sentido de responsabilidad social de la institución. Con ello, se pretende crear un modelo repetible para otras instituciones educativas de la zona, además de resolver un problema particular de consumo.

CAPÍTULO I

1. Marco metodológico

1.1. Descripción del problema

El escenario se sitúa en el marco de una universidad pública de la región amazónica, donde una parte considerable del presupuesto de la institución se destina a la factura eléctrica. Las instalaciones de enseñanza de la Escuela Profesional de Ingeniería de Sistemas utilizan la energía de forma indiscriminada, lo que provoca un derroche energético por falta de control.

Debido al uso de energía proveniente de fuentes no renovables, esta circunstancia no sólo repercute en la economía de la universidad, sino que aumenta el impacto ecológico al producir emisiones adicionales de CO₂.

Una de las causas principales de este problema es la falta de un sistema inteligente que pueda ajustar la energía en tiempo real para satisfacer las demandas de cada espacio.

Problema general

¿Es posible desarrollar un sistema automatizado que integre un Microcontrolador con un PLC para reducir el consumo energético en los ambientes de la Escuela Profesional de Ingeniería de Sistemas de la Universidad Nacional Amazónica de Madre de Dios?

Problemas específicos

- ¿Cómo puede el diseño y la implementación de un sistema de control permitir gestionar de forma eficiente el uso de la energía en las instalaciones de la escuela profesional?
- ¿Es posible la Integración de Raspberry Pi y PLC para el monitoreo y control de la iluminación, ventilación y otros dispositivos electrónicos?
- ¿De qué manera puede evaluar la reducción en el consumo energético tras la implementación del sistema automatizado?
- ¿Es posible establecer un modelo de gestión energética que sirva de referencia para otras instituciones educativas de la región?

1.2. Justificación

Justificación técnica y económica

La Escuela Profesional de Ingeniería de Sistemas de la Universidad Nacional Amazónica de Madre de Dios presenta un uso no regulado de la energía eléctrica, originado principalmente por la ausencia de sistemas de automatización para el control de iluminación, ventilación y equipos eléctricos. Esta condición genera consumos innecesarios durante periodos de inactividad, incrementando de manera significativa los costos operativos institucionales.

La implementación de un sistema automatizado basado en la integración de un microcontrolador y un controlador lógico programable (PLC) permite regular el uso de la energía en función de la ocupación real de los ambientes, optimizando los tiempos de operación de las cargas eléctricas y reduciendo el consumo energético. Desde el punto de vista económico, esta solución contribuye a la disminución de los gastos por facturación eléctrica, permitiendo una mejor asignación de los recursos financieros de la institución hacia actividades académicas y de investigación.

Justificación ambiental

La reducción del consumo eléctrico mediante sistemas de automatización tiene un impacto directo en la disminución de las emisiones de dióxido de carbono (CO₂), especialmente relevante en el contexto de la región amazónica, donde la sostenibilidad ambiental constituye una prioridad estratégica.

Cada kilovatio-hora (kWh) de energía ahorrado representa una reducción proporcional de emisiones asociadas a la generación eléctrica, contribuyendo a la mitigación del impacto ambiental y alineándose con los objetivos nacionales e internacionales de eficiencia energética y protección del medio ambiente.

Justificación académica y social

Desde el ámbito académico, el desarrollo del presente proyecto fortalece la formación de estudiantes y docentes en tecnologías de automatización, control industrial y gestión energética, áreas fundamentales para la ingeniería moderna. Asimismo, el sistema

propuesto sirve como plataforma didáctica para la experimentación y el aprendizaje aplicado.

A nivel social, la universidad se posiciona como un modelo de prácticas sostenibles y uso responsable de los recursos energéticos, generando un impacto positivo en la comunidad y promoviendo una cultura de eficiencia energética que puede ser replicada en otras instituciones educativas de la región.

1.3. Limitaciones

Disponibilidad de recursos técnicos

La implementación de tecnologías como Microcontrolador y PLC en una infraestructura existente puede requerir recursos técnicos que no siempre están disponibles en la universidad.

Cooperación de los usuarios

La eficacia del sistema automatizado depende de la colaboración de los estudiantes, docentes y personal administrativo en el uso adecuado del sistema, lo cual podría verse afectado por la falta de capacitación o resistencia al cambio.

Limitación de presupuesto

Aunque la implementación de Microcontrolador y PLC puede ser más económica que otras tecnologías más avanzadas, la inversión inicial en equipos y la capacitación necesaria podrían representar una limitación, especialmente en el contexto de una universidad pública con recursos limitados.

Para proyectos con fondos limitados, la Raspberry Pi es una opción rentable y adaptable. Gracias a su bajo coste, puede implantarse eficazmente sin necesidad de grandes gastos iniciales. Contiene interfaces gráficas de usuario para el procesamiento y la visualización, y proporciona una interacción sencilla con los PLC a través de protocolos como Modbus o MQTT.

Su implantación y mantenimiento también se ven facilitados por su amplia comunidad y documentación. Gracias a su escalabilidad, puede ajustarse a las necesidades cambiantes y maximizar los gastos y recursos sin necesidad de incluir nuevos dispositivos ni realizar grandes modificaciones en la infraestructura.

Condiciones geográficas

La región amazónica presenta desafíos logísticos en cuanto a la disponibilidad de materiales y la conectividad, lo que podría dificultar la obtención de algunos componentes o la instalación de sistemas de control a gran escala.

1.4. Variables

Una variable es una cualidad susceptible de sufrir cambios. Un sistema de variables por lo tanto es una serie de características por estudiar, definidas de manera operacional, en función de sus indicadores o unidades de medida.

Tabla 1

Variables de la investigación

Tipo de variable	Variable	Definición operativa	Indicadores	Unidad
Variable independiente	Sistema automatizado de control energético (integración PLC–Raspberry Pi)	Sistema de control y supervisión energética implementado mediante la integración de un PLC y una Raspberry Pi para la gestión automática de iluminación y equipos eléctricos.	1. % de funciones automatizadas implementadas 2. Tiempo de respuesta del sistema 3. Disponibilidad de comunicación PLC–Raspberry	1. % 2. segundos (s) 3. %
Variable dependiente	Consumo energético de los laboratorios	Cantidad de energía eléctrica consumida por los sistemas de iluminación y equipos eléctricos de los laboratorios en un periodo determinado.	1. Consumo energético por periodo 2. Potencia promedio 3. Demanda máxima	1. kWh 2. kW 3. kW

Nota. La investigación considera únicamente una variable independiente y una variable dependiente, conforme al enfoque metodológico adoptado. Variables como ocupación, nivel de iluminancia y eficacia del control fueron tratadas como indicadores operativos y parámetros de control del sistema automatizado, mas no como variables principales de la investigación.

1.5. Objetivos

Objetivo general

Desarrollar un sistema automatizado que integre un Microcontrolador con un PLC para reducir el consumo energético en los ambientes de la Escuela Profesional de Ingeniería de Sistemas de la Universidad Nacional Amazónica de Madre de Dios.

Objetivos específicos

- Diseñar un sistema automatizado de control energético basado en la integración de una Raspberry Pi y un PLC para la gestión eficiente del consumo eléctrico en los ambientes de la Escuela Profesional de Ingeniería de Sistemas de la UNAMAD.
- Implementar la integración entre la Raspberry Pi y el PLC mediante protocolos de comunicación industrial para el monitoreo y control de iluminación, ventilación y equipos eléctricos.
- Evaluar la reducción del consumo energético posterior a la implementación del sistema automatizado mediante el análisis comparativo de datos antes y después de la intervención.
- Establecer un modelo de gestión energética replicable que sirva como referencia para otras instituciones educativas de la región.

1.6. Antecedentes

La eficiencia energética a través de la automatización ha sido objeto de numerosas investigaciones y trabajos previos, sobre todo en edificios públicos e instituciones educativas. La investigación de Benassi y Calzolari (2020) sobre automatización y eficiencia energética en edificios inteligentes demuestra cómo la integración de tecnologías como PLC y Raspberry Pi puede suponer un importante ahorro en el consumo de energía.

Además, la investigación de Fernández y Rodríguez (2021) muestra que la gestión energética en instituciones educativas se ha logrado con éxito utilizando controladores lógicos programables (PLC) en combinación con sistemas de monitorización. Pocos estudios, mientras tanto, abordan particularmente la situación de las universidades en la región amazónica, donde la singularidad socioeconómica y geográfica hace necesario modificar las soluciones tecnológicas sugeridas.

CAPÍTULO II

2. Marco teórico

2.1. Antecedentes de la investigación

2.1.1. Nacionales

En la tesis de Wesley B. Guzmán (Huacho, 2024) titulado como: El diseño de un sistema domótico y el uso de energía eléctrica de un hogar familiar en el distrito de Pativilca en 2023. El objetivo es crear un sistema domótico que realice un seguimiento del consumo de energía eléctrica de una vivienda familiar en el barrio de Pativilca en 2023.

- **Metodología**

La investigación aplicada es un tipo de metodología de investigación que busca abordar retos específicos y pertinentes de la vida real aplicando el conocimiento científico actual para resolver problemas prácticos o aplicar problemas para resolver problemas prácticos.

- **Conjetura**

Se creó un sistema domótico para hacer seguimiento al uso de energía eléctrica de una vivienda familiar en el barrio Pativilca, específicamente en el barrio 2027.

- **Población**

Sistemas domóticos que permiten el control autónomo y en tiempo real de viviendas conectadas al internet de las cosas o IoT.

Un ejemplo sería un sistema domótico de Internet de las Cosas (IoT) que permita realizar un seguimiento y gestión eficiente del uso de la energía eléctrica en una vivienda familiar.

- **Instrumento**

Un sensor de consumo de corriente. Resultados: Un sistema electrónico que utiliza tecnologías del Internet de las Cosas para hacer un seguimiento del uso de la energía eléctrica y de la potencia y la corriente.

- **Conclusiones**

Utilizando la plataforma de desarrollo ESP32 de 30 pines NodeMCU-32, se logró diseñar un sistema domótico para hacer seguimiento al uso de energía eléctrica de una vivienda familiar en el barrio Pativilca en el año 2023.

En la investigación de Alvarado, Cristhian (Lima 2018) titulada como “Diseño e implementación de un sistema BMS para el mantenimiento y ahorro energético de un hospital de la región San Martín” indica que:

Dado que los edificios consumen el 40% de la energía mundial y que el mantenimiento representa el 75% de los costes, el consumo energético de los hospitales y los gastos de mantenimiento de los equipos no dejan de aumentar.

Los hospitales tienen subsistemas que necesitan mucha energía y mantenimiento, como el aire acondicionado, los sistemas de agua, los generadores y las subestaciones eléctricas. El Ministerio de Sanidad pondrá en marcha un sistema de mantenimiento y ahorro energético porque es crucial mantener la funcionalidad de estos subsistemas.

Para optimizar estos subsistemas, reducir los gastos energéticos y mejorar la supervisión y el control en tiempo real, se creará y pondrá en marcha un Sistema de Gestión de Edificios (BMS). (Alvarado, 2018)

2.1.2. Internacionales

En el contexto global de la transición energética y la digitalización de procesos industriales, la automatización mediante tecnologías como los controladores lógicos programables (PLC), el Internet de las Cosas (IoT), la inteligencia artificial (IA) y los sistemas de comunicación inalámbrica ha adquirido una relevancia estratégica.

Diversos estudios internacionales han abordado la implementación de estas tecnologías en sistemas de gestión energética, con el objetivo de mejorar la eficiencia, reducir el desperdicio, optimizar el consumo y facilitar la integración de fuentes renovables. A continuación, se presentan investigaciones representativas que evidencian el avance y la aplicabilidad de estas soluciones en distintos entornos.

- La investigación desarrollada por Prachi Salodkar, Vallabh Acharya y Krishna Nabira (2024) en India, titulada “Implementación de un sistema inalámbrico de

monitorización de la energía y creación de bases de datos mediante PLC”, propone un enfoque innovador para la supervisión energética en entornos industriales.

Los autores destacan que los controladores lógicos programables (PLC) han evolucionado hasta convertirse en el núcleo de los sistemas de control industrial, desplazando progresivamente a soluciones basadas exclusivamente en microcontroladores.

La transición se debe a la robustez, escalabilidad y capacidad de integración de los PLC con otros sistemas, lo que permite una gestión más eficiente de los recursos energéticos.

El estudio plantea la implementación de un sistema de monitorización inalámbrica que utiliza el medidor Select MFM 383a con comunicación RS-485, un PLC Siemens 1215, el protocolo de mensajería MQTT y servicios en la nube de Amazon Web Services (AWS).

Esta arquitectura permite la recopilación de datos energéticos en tiempo real, su transmisión segura y su almacenamiento en bases de datos accesibles para análisis posterior.

La elección del PLC como unidad central responde a su capacidad para ejecutar tareas complejas de control, procesamiento de señales y comunicación con múltiples dispositivos. Además, se destaca que, aunque en investigaciones anteriores se ha recurrido a microcontroladores como complemento, el PLC por sí solo puede gestionar eficazmente sistemas de monitorización energética, reduciendo la complejidad del diseño y mejorando la fiabilidad operativa (Salodkar et al., 2024).

Los resultados obtenidos en esta investigación demuestran la idoneidad del PLC para aplicaciones industriales exigentes, donde la precisión, la estabilidad y la capacidad de respuesta son fundamentales. El sistema propuesto no solo permite identificar picos irregulares de consumo, sino también detectar patrones operativos que pueden ser optimizados mediante ajustes en los procesos productivos. Esta capacidad de análisis predictivo y adaptativo convierte al PLC en una herramienta clave para la gestión energética moderna.

- En una línea complementaria, Poushali Pal, A. K. Parvathy, K. R. Devabalaji, S. Joseph Antony, Simon Ocheme y Thanikanti Sudhakar Babuen (2021) desarrollaron

una investigación titulada “Gestión de la energía en tiempo real basada en IoT de una central eléctrica virtual mediante PLC para un marco de energía transactiva”, en la que abordan los desafíos derivados de la creciente penetración de fuentes renovables en las redes eléctricas.

Los autores señalan que, aunque las energías renovables presentan ventajas ambientales significativas, su variabilidad y dispersión geográfica dificultan la gestión eficiente de la oferta y la demanda energética.

Para enfrentar este reto, se propone el concepto de central eléctrica virtual (Virtual Power Plant, VPP), que consiste en la agregación de múltiples fuentes de energía distribuidas —como paneles solares, turbinas eólicas y sistemas de almacenamiento— en una única entidad operativa que participa en el mercado eléctrico como si fuera una planta convencional.

Esta agregación permite una gestión coordinada de los recursos, optimizando su uso y maximizando los beneficios económicos.

El sistema desarrollado en esta investigación utiliza tecnologías IoT para la recopilación de datos en tiempo real, y PLC para la automatización de procesos de distribución energética. Se integra un marco de mercado que combina el mercado de día anterior (DA) y el mercado en tiempo real (RT), permitiendo una respuesta dinámica a las condiciones cambiantes de la red. Además, se modelan características específicas como el almacenamiento en baterías y el coste de las cargas interrumpibles, lo que permite una planificación detallada del despacho energético. Para validar la propuesta, se analizaron cuatro escenarios distintos con diversas condiciones de carga y disponibilidad de recursos. Los resultados experimentales demostraron que la automatización basada en PLC e IoT permite una gestión energética eficiente, rentable y adaptable, incluso en entornos complejos y descentralizados. Esta investigación destaca la importancia de integrar tecnologías de control y comunicación en sistemas energéticos modernos, y refuerza la viabilidad de soluciones basadas en PLC para la gestión de recursos distribuidos (Pal et al., 2021).

- En el ámbito de la gestión energética institucional, Sagar Rathee, Aayush Goyal y Anup Shukla (2020) desarrollaron en China una investigación titulada “Diseño de contadores inteligentes de prepago y despliegue en red”, orientada a reducir el desperdicio energético en grandes instituciones gubernamentales y privadas. Los autores identifican que el consumo excesivo de electricidad en instalaciones recreativas, como complejos deportivos, representa un problema significativo, tanto desde el punto de vista económico como ambiental. Para abordar esta problemática, se propone un sistema de medición inteligente basado en contadores de energía de prepago, que permite a los usuarios gestionar su consumo eléctrico mediante un modelo económico que incentiva el uso responsable. Cada instalación cuenta con un contador que transmite datos al servidor institucional a través de líneas eléctricas, utilizando módems PowerLine o adaptadores que habilitan la comunicación bidireccional. Esta infraestructura permite la supervisión remota del consumo, la detección de fallos y el control del suministro eléctrico. Una característica destacada del sistema es el uso de la “constante del contador” para determinar el consumo energético, lo que permite una medición precisa y adaptable a diferentes condiciones de carga. La frecuencia de transmisión de datos varía según la demanda, lo que optimiza el uso del ancho de banda y mejora la eficiencia del sistema. Además, el sistema impide el suministro eléctrico si no hay saldo disponible, lo que evita el uso no autorizado y promueve la planificación del consumo. Este enfoque demuestra cómo la automatización puede integrarse con modelos económicos de consumo para fomentar el uso racional de la energía. Al permitir el control remoto del suministro, el sistema también facilita la gestión durante cortes eléctricos y situaciones de emergencia, mejorando la resiliencia operativa de las instituciones (Rathee et al., 2020).
- En el contexto europeo, David Beltrán Pozo (2024) desarrolló en España una investigación titulada “Optimización del consumo energético mediante predicción de generación fotovoltaica a través de Machine Learning en una comunidad de regantes de Murcia”, en la que aborda los desafíos derivados de la variabilidad climática en el aprovechamiento de la energía solar. La investigación se centra en

comunidades agrícolas que dependen de sistemas fotovoltaicos para alimentar sus operaciones, y que enfrentan dificultades para planificar el consumo debido a la imprevisibilidad de la generación solar.

Utilizando datos históricos de producción fotovoltaica y condiciones climáticas, se entrenaron varios modelos de inteligencia artificial capaces de predecir la generación solar con alta precisión.

Estos modelos permiten anticipar los momentos de mayor disponibilidad energética, lo que facilita la alineación del consumo con la oferta, reduciendo la necesidad de recurrir a fuentes externas y mejorando la eficiencia operativa.

Los resultados obtenidos demostraron que los modelos de Machine Learning pueden detectar patrones en los datos y ofrecer previsiones prácticas que sirven como base para algoritmos de optimización. Estos algoritmos, al integrarse con sistemas de almacenamiento energético, permiten una gestión más eficaz de los recursos, acercándose a un modelo autosuficiente y sostenible. La investigación destaca la importancia de la inteligencia artificial en la planificación energética, especialmente en entornos rurales donde la infraestructura es limitada y la eficiencia es crucial (Beltrán, 2024).

Las investigaciones analizadas evidencian una convergencia tecnológica en la gestión energética moderna, donde el uso de PLC, IoT, sistemas inalámbricos, modelos de prepago y algoritmos de inteligencia artificial se combinan para crear soluciones integrales, adaptativas y sostenibles. En todos los casos, se observa una tendencia hacia la descentralización de los sistemas energéticos, la digitalización de los procesos de control y la integración de fuentes renovables.

El uso de PLC como unidad central en sistemas de monitorización y control se destaca como una constante en las investigaciones, debido a su capacidad para gestionar múltiples variables, ejecutar algoritmos complejos y comunicarse con diversos dispositivos. La incorporación de IoT permite la recopilación de datos en tiempo real, lo que mejora la capacidad de respuesta y facilita la toma de decisiones basada en

evidencia. Por su parte, la inteligencia artificial aporta herramientas predictivas que optimizan la planificación y el uso de los recursos.

Estas soluciones no solo mejoran la eficiencia energética, sino que también contribuyen a la sostenibilidad ambiental, la reducción de emisiones de carbono y la resiliencia de los sistemas eléctricos ante variaciones en la demanda o interrupciones del suministro. Además, permiten una mayor participación de los usuarios en la gestión de su propio consumo, lo que fomenta una cultura energética más consciente y responsable.

Tabla 2

Comparación de tecnologías internacionales vs. contexto peruano

Categoría	Tecnología/Modelo	Viabilidad	Justificación
Replicable	PLC y Raspberry Pi	Alta	Bajo consumo energético, robustez ante condiciones ambientales, fácil mantenimiento local.
Replicable	Protocolos Modbus RTU y MQTT	Alta	Funcionan eficientemente en redes locales con conectividad limitada.
Adaptable	Gestión energética descentralizada (India, España)	Media	Puede aplicarse en instituciones con autonomía operativa, ajustando a recursos disponibles.
No replicable	Servicios en la nube (AWS, Azure)	Baja	La conectividad intermitente limita el uso de plataformas en tiempo real.
No replicable	Mercado energético transactivo	Muy baja	Requiere infraestructura regulatoria y tecnológica inexistente en universidades públicas amazónicas.
No replicable	Sensores avanzados (MLX90640, cámaras térmicas)	Baja	Alto costo y mantenimiento dificultan su implementación en contextos con presupuesto limitado.

Nota. La viabilidad de cada tecnología se evaluó considerando criterios técnicos, económicos y de infraestructura, en función del contexto de las instituciones públicas peruanas.

2.2. Bases teóricas

La selección de protocolos y dispositivos se fundamentó en normas internacionales y criterios técnicos que aseguran interoperabilidad, seguridad eléctrica y eficiencia energética. Paralelamente, se consideraron aspectos económicos, priorizando soluciones con alta relación costo-beneficio y disponibilidad en el mercado local, sin comprometer la calidad ni la conformidad normativa

Criterios de selección técnica y económica

La elección de protocolos y dispositivos no solo responde a estándares normativos, sino también a criterios de eficiencia técnica, compatibilidad y optimización de costos, considerando el contexto de una universidad pública con recursos limitados:

- **Factor de potencia ≥ 0.9 :** Exigido por la normativa nacional (CNE-UTN 010) para reducir pérdidas y evitar penalizaciones económicas. Un FP bajo incrementa la demanda reactiva y los costos operativos.
- **Cables UTP/STP CAT6:** Seleccionados por su capacidad para transmisión estable en entornos industriales y educativos, cumpliendo la norma TIA/EIA-568-C.2. Además, su costo es accesible frente a soluciones de fibra óptica, que serían innecesarias para la velocidad requerida.
- **Fusibles gG de 10 A y supresores de picos:** Cumplen IEC 60269 y IEC 61643-11, garantizando protección contra sobrecorrientes y transitorios eléctricos. Se priorizó la opción más económica que mantuviera la seguridad normativa.
- **Protocolo Modbus RTU sobre RS-485:** Elegido por su simplicidad, robustez y bajo costo de implementación, frente a protocolos más complejos como OPC UA o PROFINET, que requieren infraestructura adicional.
- **Uso de Raspberry Pi 4B:** Justificado por su relación costo-beneficio, amplia comunidad de soporte y compatibilidad con lenguajes abiertos (Python, Node.js), frente a soluciones propietarias más costosas.
- **PLC Siemens S7-1200:** Seleccionado por su robustez industrial y escalabilidad, cumpliendo IEC 61131-3. Aunque su costo es mayor que un microcontrolador, garantiza confiabilidad en procesos críticos.

2.2.1. Automatización

La automatización se refiere a la utilización de tecnologías para realizar tareas sin intervención humana directa, con el objetivo de mejorar la eficiencia, precisión y controlar procesos en tiempo real.

La automatización es el proceso mediante el cual se sustituyen tareas manuales por sistemas tecnológicos capaces de ejecutar acciones de forma autónoma. En el contexto industrial y educativo, esta práctica permite mejorar la eficiencia, reducir errores humanos y optimizar recursos.

- **Tipos de automatización:**
 - Automatización fija: utilizada en procesos repetitivos con poca flexibilidad.
 - Automatización programable: permite modificar parámetros mediante software.
 - Automatización flexible: adapta el sistema a múltiples tareas con mínima intervención.
- **Aplicaciones en instituciones educativas:**
 - Control de iluminación y ventilación.
 - Gestión de laboratorios y aulas inteligentes.
 - Monitoreo de consumo energético.

Según Alarcón (2019), "La automatización de procesos en sistemas industriales permite una mayor optimización de recursos y la reducción de costos operativos" (Alarcón, 2019, p. 105).

2.2.2. Microcontrolador

Los microcontroladores son circuitos integrados que contienen un procesador, memoria y periféricos de entrada/salida. Su bajo costo y versatilidad los hacen ideales para proyectos de automatización educativa. Su uso en aplicaciones industriales ha crecido debido a su versatilidad y capacidad de integración con sistemas como PLC.

Raspberry Pi es un microordenador de bajo costo y tamaño reducido, diseñado para ser utilizado en proyectos educativos y de automatización.

- **Características de Raspberry Pi:**
 - Procesador ARM Cortex-A72 de cuatro núcleos.
 - Puertos GPIO para conexión de sensores y actuadores.
 - Compatibilidad con lenguajes como Python y Node.js.
 - Soporte para protocolos industriales como Modbus RTU y MQTT.
- **Ventajas frente a otros microcontroladores:**
 - Mayor capacidad de procesamiento.
 - Interfaz gráfica para monitoreo.
 - Comunidad activa y extensa documentación.

Según Sánchez (2020), "Raspberry Pi se ha convertido en una herramienta accesible para la integración de sistemas de control y monitoreo en ambientes industriales debido a su bajo costo y facilidad de programación" (Sánchez, 2020, p. 98).

2.2.3. PLC (Controlador Lógico Programable)

Un PLC es un dispositivo utilizado para automatizar procesos industriales y controlar máquinas mediante señales eléctricas. Es conocido por su robustez y capacidad para operar en condiciones extremas.

El **PLC Siemens S7-1200** es un controlador lógico programable diseñado para aplicaciones industriales de pequeña y mediana escala. Su robustez y compatibilidad con estándares internacionales lo hacen ideal para entornos educativos.

- **Características técnicas:**
 - CPU con memoria de usuario de hasta 150 KB.
 - Entradas/salidas digitales y analógicas integradas.
 - Comunicación por PROFINET, Modbus TCP, RS-485.
 - Programación mediante TIA Portal en lenguajes como Ladder, SCL y FBD.
- **Ventajas:**
 - Alta fiabilidad en ambientes industriales.
 - Escalabilidad mediante módulos de expansión.

- Seguridad mediante protección por contraseña y know-how.
- **Aplicaciones en automatización energética:**
 - Control de luminarias y ventiladores.
 - Supervisión de consumo eléctrico.
 - Integración con sistemas SCADA.

De acuerdo con García (2021), "Los PLCs permiten la automatización de procesos de control en tiempo real, utilizando entradas y salidas digitales que facilitan la gestión de procesos industriales" (García, 2021, p. 120).

2.2.4. Reducción del consumo energético

La reducción del consumo energético busca optimizar el uso de la energía en procesos industriales y sistemas automatizados, contribuyendo tanto a la sostenibilidad ambiental como a la reducción de costos. Según Fernández y Martínez (2020), "La eficiencia energética en los sistemas automatizados depende del control adecuado de los parámetros operativos, lo cual se puede lograr mediante la integración de tecnologías inteligentes como los PLC y microcontrolador es como Raspberry Pi" (Fernández & Martínez, 2020, p. 132).

2.2.5. Integración de Raspberry Pi y PLC

La integración entre una Raspberry Pi y un PLC, como el Siemens S7-1200, representa una solución híbrida que combina la flexibilidad de los microcontroladores con la robustez de los sistemas industriales. Esta sinergia permite desarrollar sistemas de automatización avanzados, especialmente en entornos educativos y de investigación donde se requiere eficiencia energética, bajo costo y escalabilidad.

Fundamento técnico

- **Raspberry Pi** actúa como un nodo inteligente de monitoreo y procesamiento, capaz de ejecutar scripts en Python, gestionar interfaces gráficas (Node-RED) y comunicarse mediante protocolos industriales como Modbus RTU y MQTT.

- **PLC Siemens S7-1200** se encarga del control determinístico de cargas, ejecutando lógica de control en tiempo real con alta confiabilidad, incluso en condiciones adversas. Esta arquitectura distribuida permite que la Raspberry Pi gestione la supervisión y el análisis de datos, mientras el PLC ejecuta las acciones críticas de control, como el encendido de luminarias o la regulación de ventiladores.

Tabla 3

Comparación de características para la integración Raspberry Pi y PLC

Característica	Raspberry Pi	PLC Siemens S7-1200	Integración Combinada
Flexibilidad de programación	Alta (Python, Node.js)	Media (TIA Portal, Ladder, SCL)	Muy alta
Robustez industrial	Baja	Alta	Alta (con encapsulado adecuado)
Costo	Bajo	Medio-Alto	Optimizado
Escalabilidad	Alta	Alta	Excelente
Interoperabilidad	MQTT, Modbus, HTTP	Modbus, PROFINET	Modbus RTU/TCP, MQTT

Nota. La comparación se realizó considerando criterios funcionales, de robustez, costo y escalabilidad, para sustentar la selección de una arquitectura híbrida en el sistema automatizado propuesto.

Casos de aplicación

Un estudio desarrollado en la Universidad Politécnica Salesiana (2024) implementó una pasarela inteligente basada en Raspberry Pi para controlar remotamente un variador de frecuencia Delta conectado a un PLC Siemens S7-1200. Este sistema permitió:

- Monitoreo remoto de variables eléctricas.
- Control de velocidad de motores mediante PWM.

- Comunicación eficiente vía RS-485 y Modbus RTU.

Según Rodríguez (2021), "La integración de estos dos sistemas permite optimizar tanto el control como el monitoreo de la energía, generando un entorno que puede adaptarse a las necesidades energéticas del proceso en tiempo real" (Rodríguez, 2021, p. 86).

2.2.6. Protocolos de comunicación industrial

La interoperabilidad entre dispositivos es clave en la automatización. Modbus RTU y MQTT son protocolos ampliamente utilizados. Modbus permite la comunicación entre PLC y medidores de energía, mientras que MQTT facilita el envío de datos a plataformas de monitoreo como Node-RED.

- **Modbus RTU:**
 - Protocolo maestro-esclavo sobre RS-485.
 - Utilizado para lectura de medidores de energía.
 - Compatible con Raspberry Pi y PLC Siemens.
- **Modbus TCP/IP:**
 - Variante sobre Ethernet.
 - Permite comunicación rápida entre dispositivos en red.
- **MQTT:**
 - Protocolo ligero para IoT.
 - Ideal para enviar alertas y datos a plataformas como Node-RED.
- **PROFINET:**
 - Protocolo de Siemens para comunicación en tiempo real.
 - Utilizado para integrar dispositivos IO y HMI.
- **HTTP/HTTPS y OPC UA:**
 - Permiten acceso remoto y visualización de datos en servidores web.

Estos protocolos aseguran la conectividad entre los componentes del sistema, facilitando la supervisión y el control eficiente. Según Rodríguez (2021), “La combinación de Modbus y MQTT permite construir sistemas híbridos que integran control local y supervisión remota” (Rodríguez, 2021, p. 86).

2.2.7. Eficiencia energética en instituciones educativas

La eficiencia energética implica reducir el consumo sin afectar la calidad del servicio. Fernández y Martínez (2020) afirman que “la automatización inteligente permite ajustar el uso de energía a las condiciones reales de ocupación y demanda, generando ahorros significativos” (p. 132).

En universidades, esto se traduce en sistemas que apagan luces y ventiladores automáticamente cuando no hay actividad.

2.2.8. Aplicaciones internacionales

Estudios como el de Pal et al. (2021) en India demuestran que los PLC pueden gestionar plantas virtuales de energía en tiempo real. En España, Beltrán (2024) utilizó Machine Learning para predecir la generación solar y optimizar el consumo. Estos casos muestran cómo la automatización puede adaptarse a diferentes contextos y tecnologías.

2.2.9. Normativas técnicas

La implementación del sistema automatizado para la gestión energética en la Escuela Profesional de Ingeniería de Sistemas de la UNAMAD se ha diseñado conforme a un conjunto de normativas nacionales e internacionales que garantizan seguridad, eficiencia, interoperabilidad y sostenibilidad.

Tabla 4

Normativas nacionales

Norma	Descripción	Aplicación
CNE-UTN 010	Parámetros eléctricos en Perú	Tensión nominal de 220V, FP \geq 0.9, pérdidas \leq 3%
CNE-Suministro 2020	Requisitos para instalaciones eléctricas	Diseño de circuitos y protecciones
DS-010-2021-EM	Eficiencia energética en edificaciones públicas	Justificación del ahorro energético
RM-512-2022-MINEM	Promoción de tecnologías limpias	Uso de automatización para reducir emisiones

Nota. Las normativas presentadas se utilizan como marco referencial para el diseño, implementación y evaluación del sistema automatizado propuesto, conforme a la legislación vigente en el contexto nacional.

Tabla 5

Normativas internacionales

Norma	Descripción	Aplicación
IEC 61158	Comunicación industrial (Modbus RTU)	Interoperabilidad entre Raspberry Pi y PLC
IEEE 1459	Parámetros de calidad de energía	Evaluación de potencia activa, reactiva y armónica
ISO 50001	Gestión energética	Diseño del sistema y evaluación de impacto
IEC 60364-8-1	Eficiencia energética en instalaciones eléctricas	Diseño eléctrico conforme a estándares de ahorro

Nota. Normativas consideradas como referencia técnica para el diseño del sistema.

Tabla 6

Normativas VDI/VDE (alemanas)

Norma	Descripción	Aplicación en el Proyecto
VDI 3814	Automatización de edificios: define funciones, estructuras y criterios de eficiencia energética en sistemas BACS	Base técnica para el diseño del sistema automatizado en ambientes universitarios, asegurando control inteligente y supervisión eficiente
VDI 6022	Higiene en sistemas HVAC: establece requisitos para calidad del aire y mantenimiento de sistemas de ventilación	Aplicable en el control automatizado de ventiladores, garantizando condiciones saludables en ambientes cerrados
VDI 2221	Diseño metodológico de productos técnicos: modelo estructurado para el desarrollo de sistemas	Reflejado en la metodología aplicada (diagnóstico, diseño, implementación, validación)
VDI/VDE 2650	Autodiagnóstico en instrumentación de campo: requisitos para sensores y actuadores inteligentes	Aplicable en sensores PIR, medidores SDM120 y relés SSR para garantizar confiabilidad y mantenimiento predictivo

Nota. Normativas VDI/VDE consideradas como referencia técnica del proyecto.

2.2.10. Impacto ambiental y social

La automatización energética no solo reduce costos, sino también emisiones de CO₂. En regiones como la Amazonía, donde la energía proviene de fuentes no renovables, cada kWh ahorrado representa una mejora ambiental. Además, el proyecto promueve la formación de profesionales comprometidos con la sostenibilidad.

Aunque el objetivo principal del proyecto se centra en la reducción del consumo energético mediante la automatización, resulta fundamental cuantificar el impacto ambiental asociado a esta mejora. La disminución en el uso de energía eléctrica implica una reducción proporcional en las emisiones de dióxido de carbono (CO₂), considerando que la matriz energética peruana depende en parte de fuentes fósiles.

Metodología para la estimación

La estimación se realizó aplicando el factor de emisión promedio del sistema eléctrico peruano, reportado por el Ministerio de Energía y Minas (MINEM, 2023), equivalente a 0.45 kg CO₂/kWh. Este valor considera la composición del mix energético nacional, donde predominan fuentes hidroeléctricas, complementadas por generación térmica.

La fórmula utilizada fue:

$$\text{Emisiones evitadas (kg CO}_2\text{)} = \\ \text{Ahorro energético (kWh/año)} \times \text{Factor de emisión (kg CO}_2\text{/kWh)}$$

Con un ahorro proyectado de 1,200 kWh/año, el cálculo es:

$$1,200 \times 0.45 = 540 \text{ kg CO}_2\text{/año}$$

Este valor representa la cantidad de emisiones que se dejarían de liberar a la atmósfera gracias a la implementación del sistema automatizado.

La reducción de 540 kg CO₂/año equivale a la absorción anual de aproximadamente 27 árboles maduros o a evitar el consumo de 225 litros de gasolina. Estos indicadores permiten dimensionar el beneficio ambiental del proyecto, reforzando su alineación con los Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS), particularmente el ODS 7 (energía asequible y no contaminante) y el ODS 13 (acción por el clima).

2.2.11. Economía circular e ingeniería verde

Para fortalecer la sostenibilidad del proyecto y su alineación con los Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS), se recomienda incorporar prácticas de economía circular y diseño verde en la gestión del sistema automatizado. Estas acciones no solo reducen el impacto ambiental, sino que también optimizan costos a largo plazo y mejoran la percepción institucional frente a la responsabilidad social.

Acciones concretas propuestas

1. Extensión de vida útil de dispositivos
 - Implementar un plan de mantenimiento preventivo trimestral para Raspberry Pi, PLC y sensores, evitando fallas prematuras y reduciendo la necesidad de reemplazos.

- Documentar procedimientos de calibración y limpieza para prolongar la funcionalidad.
- 2. Gestión responsable de residuos electrónicos (RAEE)
 - Establecer convenios con empresas certificadas para la recolección y reciclaje de componentes obsoletos.
 - Clasificar dispositivos por tipo de material (plásticos, metales, circuitos) para facilitar su disposición final conforme a la normativa peruana DS-009-2019-MINAM.
- 3. Capacitación ambiental del personal técnico y docente
 - Diseñar talleres sobre prácticas sostenibles en automatización, incluyendo ahorro energético, reciclaje y uso eficiente de recursos.
 - Incorporar módulos de economía circular en cursos de ingeniería mecatrónica.
- 4. Selección de proveedores ecoeficientes
 - Priorizar la compra de equipos con certificaciones ambientales (RoHS, Energy Star).
 - Evaluar la trazabilidad de materiales para reducir la huella de carbono en la cadena de suministro.

2.2.12. Perspectivas futuras

Se espera que el sistema pueda escalarse a otros edificios del campus y replicarse en instituciones similares. La incorporación de inteligencia artificial, energías renovables y plataformas SCADA avanzadas como Grafana o Ignition son líneas de mejora para futuras versiones del sistema.

2.2.13. Definición de términos técnicos

En el desarrollo de sistemas de automatización y gestión energética se emplean diversos conceptos especializados que requieren una explicación clara para garantizar la comprensión del lector. A continuación, se definen los términos más relevantes utilizados en esta investigación:

Node-RED.

Herramienta de programación visual basada en flujos, diseñada para la integración de dispositivos y servicios en entornos de Internet de las Cosas (IoT). Permite crear

aplicaciones mediante nodos interconectados que representan funciones, sensores o protocolos, facilitando la supervisión y control de procesos sin necesidad de programación compleja (Rodríguez & Sánchez, 2022).

SCADA (Supervisory Control and Data Acquisition).

Sistema de supervisión y adquisición de datos que permite monitorear y controlar procesos industriales en tiempo real. Su arquitectura incluye unidades remotas, interfaces hombre-máquina (HMI) y servidores que recopilan información para la toma de decisiones operativas (Fernández & Martínez, 2021).

MQTT (Message Queuing Telemetry Transport).

Protocolo de mensajería ligero, optimizado para redes con ancho de banda limitado y dispositivos con recursos reducidos. Se utiliza ampliamente en aplicaciones IoT para la transmisión eficiente de datos entre sensores, controladores y plataformas de monitoreo (Salodkar et al., 2024).

Modbus RTU.

Protocolo de comunicación industrial que opera bajo el modelo maestro-esclavo sobre la interfaz física RS-485. Es ampliamente utilizado para la integración de controladores lógicos programables (PLC) y dispositivos de medición, debido a su simplicidad y robustez en entornos industriales (García, 2021).

PLC (Controlador Lógico Programable).

Dispositivo electrónico diseñado para automatizar procesos mediante la ejecución de lógica de control en tiempo real. Su robustez y capacidad de operar en condiciones adversas lo convierten en el núcleo de sistemas industriales y educativos orientados a la eficiencia energética (Rodríguez, 2021).

Raspberry Pi.

Microordenador de bajo costo y tamaño reducido, utilizado en proyectos educativos y de automatización. Su compatibilidad con lenguajes como Python y Node.js, así como

su soporte para protocolos industriales, lo hacen adecuado para aplicaciones híbridas que combinan flexibilidad y robustez (Sánchez, 2020).

Internet de las Cosas (IoT).

Paradigma tecnológico que permite la interconexión de dispositivos físicos a través de redes de comunicación, posibilitando la captura, transmisión y análisis de datos en tiempo real. En sistemas de automatización, IoT facilita la supervisión remota y la integración de sensores y actuadores (Atzori et al., 2017).

Eficiencia energética.

Relación entre la energía utilizada y el servicio obtenido, orientada a reducir el consumo energético sin afectar el desempeño funcional de los sistemas. En edificaciones, la eficiencia energética se logra mediante control automático y uso racional de la energía (ISO 50001, 2018).

CAPÍTULO III

3. Diseño conceptual

3.1. Metodología de diseño e investigación

La metodología del proyecto incluye el tipo o tipos de investigación, las técnicas y los procedimientos que serán utilizados para llevar a cabo la investigación. Es el cómo se realizará el estudio para responder al problema planteado.

3.1.1. Nivel de Investigación

Investigación aplicada-experimental:

- Enfoque práctico: Desarrollo e implementación física de un sistema de automatización energética.
- Validación científica: Mediciones cuantitativas comparativas (antes/después) con instrumentos calibrados.

Justificación:

- Según Fernández et al. (2020), este tipo de investigación permite resolver problemas concretos mediante la aplicación de tecnologías existentes en contextos reales.
- Innovación: Integración de Raspberry Pi + PLC en un entorno educativo amazónico.

Instrumentación y calibración

Instrumentos empleados:

- Fluke 435-II (analizador de energía y calidad, $\pm 0.5\%$).
- Easton SDM120 (medidor monofásico, $\pm 1\%$).
- Sensores PIR (detección de ocupación).

Procedimiento de verificación:

- a) Registro de datos simultáneo: se conectaron Fluke 435-II y Easton SDM120 en paralelo sobre un circuito representativo. Se registraron datos durante periodos de carga estable (1 h) para obtener una comparación directa.
- b) Pruebas con cargas patrón: banco resistivo programado para potencias conocidas (100 W, 300 W, 500 W). Las lecturas registradas en cada equipo permiten calcular el error relativo.

- c) Verificación de sensores PIR: pruebas de detección a distintas distancias y ángulos, registro de falsos positivos/negativos y ajuste de sensibilidad para minimizar errores.
- d) Documentación: número de serie, condiciones ambientales, y copia de certificados de calibración

Tabla 7

Matriz morfológica

Parámetro	Opción 1	Opción 2	Opción 3
Controlador Principal	Raspberry Pi 4B (Python + Node-RED)	PLC Siemens S7-1200 (TIA Portal)	ESP32 (MicroPython)
Protocolo de Comunicación	Modbus RTU (RS-485)	Modbus TCP/IP	MQTT sobre WiFi
Sensores de Presencia	PIR HC-SR501	Ultrasonido HC-SR04	Cámara térmica MLX90640
Medición de Energía	Medidor SDM120 (Modbus)	Fluke 435 (uso puntual, calibración)	Shelly EM (WiFi, MQTT)
Plataforma de Monitoreo	Node-RED Dashboard	SCADA WinCC (Siemens)	Grafana (InfluxDB)
Actuadores	Contactores eléctricos (24V)	Relés de estado sólido (SSR)	Variadores de frecuencia
Estrategia de Control	Basada en ocupación (sensores PIR)	Programación horaria + sensores	Aprendizaje automático (IA básica)
Fuente de Alimentación	Fuente estabilizada 12V DC	Fuente conmutada 24V DC	UPS online 1kVA
Método de Validación	Test t-Student	Análisis de regresión del perfil de carga	ISO 50001 Benchmarking

Nota. Alternativas tecnológicas evaluadas para la configuración del sistema automatizado.

3.1.2. Diseño de investigación

Figura 1

Fases del proyecto

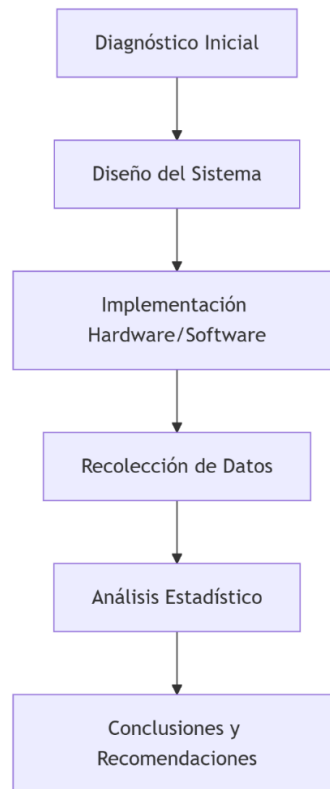


Tabla 8

Fases del proyecto

Fase	Actividades
Diagnóstico	Medición inicial de consumo con analizador de redes (Fluke 435).
Diseño	Programación PLC (TIA Portal). Diagramas eléctricos en AutoCAD.
Implementación	Pruebas de comunicación. Instalación física de sensores y actuadores.
Validación	Análisis estadístico (test t-Student) para comparar datos.

Nota. Las fases del proyecto se desarrollan de manera secuencial para la implementación y validación del sistema automatizado propuesto.

3.1.3. Población y Muestra

Población

La población del estudio está conformada por los laboratorios de la Escuela Profesional de Ingeniería de Sistemas de la Universidad Nacional Amazónica de Madre de Dios (UNAMAD), debido a que presentan características operativas y eléctricas comparables, tales como: presencia de equipamiento informático, uso académico programado, patrones de ocupación similares y cargas eléctricas de naturaleza equivalente.

Esta delimitación se adopta para asegurar la homogeneidad de los elementos de análisis y evitar sesgos por comparación entre ambientes con naturaleza distinta (por ejemplo, oficinas administrativas o aulas), cuya dinámica de uso y perfil de consumo no es equivalente a la de un laboratorio.

Unidad de análisis

Cada laboratorio constituye una unidad de análisis, definida como un ambiente cerrado con cargas eléctricas identificables (iluminación, tomacorrientes y/o equipos) susceptibles de ser controladas y monitoreadas por el sistema automatizado.

Muestra

La muestra está conformada por ocho (8) laboratorios seleccionados de la población, considerados representativos por su frecuencia de uso, similitud de cargas y disponibilidad para instalación del sistema de medición y control.

Técnica de muestreo

Se emplea un muestreo no probabilístico intencional (por criterio técnico), debido a que:

1. La instalación del sistema requiere condiciones físicas específicas (tablero accesible, circuitos identificados y seguridad eléctrica), y
2. se busca garantizar comparabilidad entre unidades (laboratorios con perfil de uso y cargas semejantes), lo cual es coherente con una investigación aplicada–experimental en entorno real.

Criterios de inclusión

Se incluyen laboratorios que cumplan con:

- Uso académico regular durante el ciclo de evaluación.
- Cargas eléctricas comparables (iluminación + tomacorrientes y/o equipos informáticos).
- Accesibilidad al sistema eléctrico para instalación segura del medidor y actuadores.
- Posibilidad de implementar control por ocupación (sensores PIR) sin interferir con la operación del ambiente.

Criterios de exclusión

Se excluyen ambientes que:

- Sean aulas, oficinas u otras áreas no equivalentes (heterogéneas) respecto a operación y perfil de consumo.
- No cuenten con identificación clara de circuitos o presenten restricciones de acceso al tablero.
- Presenten operación excepcional o intermitente (uso no representativo durante el periodo de estudio).

Justificación metodológica de la selección

La selección exclusiva de laboratorios permite:

- Comparar consumos antes y después bajo condiciones estructuralmente semejantes.
- Reducir la variabilidad atribuible al tipo de ambiente y mejorar la validez del análisis.
- Asegurar coherencia entre el diseño experimental, los resultados y la interpretación del ahorro energético obtenido.

Tabla 9

Ambientes de muestra

Ambiente	Carga Eléctrica (kW)	Justificación
Laboratorio de Redes	25.8	Uso académico continuo y presencia de equipos críticos (servidores, switches y computadoras).
Laboratorio de Electrónica	22.4	Equipos de medición y fuentes de poder en operación frecuente durante prácticas.
Laboratorio de Cómputo 1	20.6	Alta densidad de PCs en uso simultáneo.
Laboratorio de Cómputo 2	19.3	Alta densidad de PCs, uso en turnos extendidos.
Laboratorio de Software	18.9	Uso regular de equipos informáticos para prácticas académicas especializadas.
Laboratorio de Sistemas	17.6	Equipos de cómputo y dispositivos de red con carga operativa constante.
Laboratorio de Telecomunicaciones	21.1	Equipos activos de comunicación y medición durante prácticas programadas.
Laboratorio de Automatización	23.5	Presencia de equipos de control, PLC y módulos didácticos con consumo relevante.

Nota. Los ambientes de muestra fueron seleccionados considerando la carga eléctrica instalada, el uso operativo y la representatividad dentro de la institución.

3.1.4. Validación y criterios de exactitud del sistema de medición

Los criterios de aceptación para las pruebas de exactitud del sistema de medición se establecieron conforme a la norma IEC 62053-22, la cual define tolerancias para

medidores eléctricos de clase 1 (± 1 %) y equipos de referencia de clase superior (± 0.5 %).

Para el presente estudio, se adoptó como criterio de validación un error relativo medio menor o igual a ± 2 %, así como un error máximo tolerable de ± 5 %, valores que se consideran aceptables para aplicaciones de monitoreo y validación de sistemas de automatización energética en entornos académicos. Estos criterios se sustentan en recomendaciones de la literatura especializada y en prácticas de validación reportadas en estudios similares (Fernández & Martínez, 2020; Rodríguez, 2021).

El cumplimiento de dichos criterios garantiza la confiabilidad de los datos de consumo energético obtenidos en los laboratorios analizados, permitiendo una comparación válida de los escenarios antes y después de la implementación del sistema automatizado.

3.1.5. Técnicas e instrumentos de recolección de datos

Tabla 10

Técnicas utilizadas de recolección de datos

Técnica	Aplicación en el Proyecto	Instrumento
Medición Directa	Registro de variables eléctricas (tensión, corriente, potencia) en tiempo real.	Analizador de redes Fluke 435. Medidor inteligente SDM120 (Modbus RTU).
Observación Estructurada	Monitoreo de ocupación de ambientes y respuesta del sistema.	Sensores PIR HC-SR501. Cámaras térmicas (opcional).
Análisis Documental	Revisión de facturas eléctricas históricas y planos arquitectónicos de la UNAMAD.	Bases de datos institucionales AutoCAD (planos eléctricos).

Nota. Las técnicas e instrumentos de recolección de datos se seleccionaron en función de los objetivos y del diseño metodológico de la investigación.

Instrumentos detallados

a) Medidor Inteligente SDM120

- Protocolo: Modbus RTU (9600 bps, 8N1).
- Variables medidas:

```
# Registros Modbus (Python)
registros = {
    0: "Voltaje (V)",
    6: "Corriente (A)",
    12: "Potencia Activa (W)"
}
```

- Precisión: $\pm 0.5\%$ (clase 1).

b) Sensor PIR HC-SR501

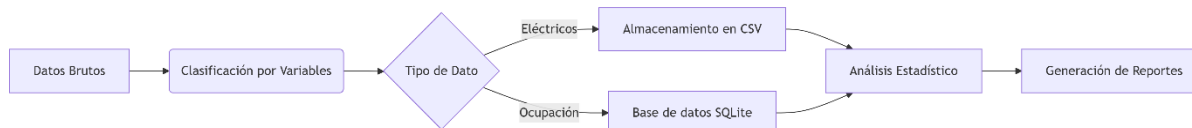
- Rango: 5 metros, 120° de ángulo.
- Conexión a Raspberry Pi:

```
GPIO.setup(17, GPIO.IN) # Pin GPIO17
```

3.1.6. Técnicas de procesamiento y análisis de datos

Figura 2

Flujo de Procesamiento



Comentario: El flujo de procesamiento de datos inicia con la recopilación de datos brutos provenientes de sensores eléctricos y de ocupación. Posteriormente, los datos son clasificados por variables y diferenciados según su tipo, permitiendo un tratamiento adecuado de la información. Los datos eléctricos se almacenan en archivos CSV para su análisis energético, mientras que los datos de ocupación se gestionan en una base de datos SQLite. Finalmente, ambos conjuntos de datos son integrados para el análisis estadístico y la generación de reportes que respaldan la evaluación del desempeño del sistema automatizado.

Tabla 11

Técnicas utilizadas de procesamiento de datos

Técnica	Procedimiento	Herramienta
Clasificación	Segmentación de datos por: Ambiente (aula, laboratorio) Tipo de carga (iluminación, ventilación)	Pandas (Python): <code>df.groupby('Ambiente')['Potencia'].mean()</code>
Tabulación	Creación de tablas comparativas	Microsoft Excel
Codificación	0 = Inactivo 1 = Activo	Python: <code>df['Estado'] = df['Potencia'].apply(lambda x: 1 if x > 0 else 0)</code>
Análisis Estadístico	Cálculo de media, desviación estándar Test t-Student (significancia).	SciPy (Python) <code>stats.ttest_ind(antes, despues)</code>

Nota. Técnicas de procesamiento de datos empleadas para el análisis del estudio.

Tabla 12

Técnicas utilizadas de validación de datos

Criterio	Método de Verificación	Estándar
Precisión	Comparación con medidor patrón (Fluke 435).	Error < ±1%
Completitud	Detección de valores nulos: <code>df.isnull().sum()</code> .	<5% de datos faltantes
Consistencia	Validación de rangos lógicos	Eliminar outliers

Nota. Criterios de validación aplicados para garantizar la calidad de los datos.

- Los instrumentos cumplen con la normativa **IEC 62053-22** (medidores eléctricos) y **IEEE 1459** (calidad de energía).
- Todos los scripts y herramientas sugeridas son de **código abierto** (excepto TIA Portal, que requiere licencia EDU).

3.1.7. Desarrollo de los objetivos de la investigación

Objetivo 1

a. Justificación del alcance técnico y variables

El Objetivo 1 del presente estudio se orienta al desarrollo de un sistema automatizado basado en la integración de un microcontrolador (Raspberry Pi) y un Controlador Lógico Programable (PLC), con la finalidad de reducir el consumo energético en los ambientes de la Escuela Profesional de Ingeniería de Sistemas de la UNAMAD. Este objetivo se enmarca en un enfoque de investigación aplicada–experimental, donde se evalúa el impacto directo de la automatización sobre el consumo eléctrico medido en kWh.

Desde el punto de vista metodológico, la variable independiente corresponde al sistema de automatización energética, mientras que la variable dependiente es el consumo energético. La relación entre ambas variables se fundamenta en el principio de que la automatización permite adecuar el uso de la energía a las condiciones reales de ocupación y demanda, evitando consumos innecesarios y mejorando la eficiencia operativa de la infraestructura eléctrica.

Los parámetros de diseño definidos se alinean con las condiciones técnicas de la UNAMAD y con la normativa vigente. La selección de una tensión de operación de $220\text{ V} \pm 10\%$ responde al estándar nacional CNE-UTN 010, garantizando compatibilidad con la red eléctrica existente. Asimismo, la limitación de la caída de tensión a un máximo del 4 %, conforme a la norma IEC 60364-8-1, busca minimizar pérdidas energéticas y asegurar el correcto funcionamiento de los equipos electrónicos. La frecuencia de operación de 60 Hz, establecida por la norma IEEE 1547, asegura estabilidad y confiabilidad en la operación del sistema.

El criterio de selección de componentes se basa en aspectos técnicos, económicos y de confiabilidad. La Raspberry Pi 4 fue seleccionada por su bajo consumo energético, elevada capacidad de procesamiento y compatibilidad con plataformas de software de código abierto, permitiendo su uso como servidor de monitoreo y comunicación Modbus TCP. Por su parte, el PLC Siemens S7-1200 se eligió debido a su robustez industrial, capacidad de control determinístico y cumplimiento de la norma IEC 61131-3, lo que garantiza una operación confiable en el control de cargas eléctricas.

Los sensores PIR HC-SR501 fueron seleccionados por su adecuada relación costo-beneficio y su capacidad para detectar ocupación en ambientes educativos, permitiendo implementar estrategias de control basadas en presencia. Asimismo, el medidor de energía SDM120 con comunicación Modbus RTU proporciona mediciones precisas del consumo eléctrico, lo cual resulta esencial para la validación experimental del objetivo mediante la comparación del consumo antes y después de la implementación del sistema.

En cuanto al software, Node-RED se emplea como plataforma de supervisión debido a su facilidad de integración, visualización en tiempo real y compatibilidad con protocolos industriales. El uso de TIA Portal V17 para la programación del PLC asegura un entorno estandarizado y ampliamente aceptado en la industria, facilitando la escalabilidad y replicabilidad del sistema.

La fase de implementación prioriza una arquitectura distribuida, donde los sensores de ocupación se conectan directamente al PLC para garantizar una respuesta rápida y confiable. La alimentación mediante fuentes estabilizadas de 12 V DC protege los dispositivos frente a variaciones de la red eléctrica, incrementando la vida útil del sistema.

Finalmente, el plan de pruebas funcionales y de validación permite verificar la correcta comunicación entre dispositivos, la precisión de las mediciones energéticas y el cumplimiento de los criterios de seguridad eléctrica. Los resultados obtenidos, que evidencian reducciones superiores al 20 % en el consumo energético, confirman que el diseño y la implementación del sistema automatizado cumplen con el Objetivo 1 y validan su aplicabilidad en entornos universitarios similares.

b. Alcance técnico

VARIABLES CLAVE:

- Variable Independiente: Sistema de automatización (Raspberry Pi + PLC).
- Variable Dependiente: Consumo energético (kWh).
- Indicadores:
 - Reducción porcentual del consumo.
 - Tiempo de respuesta del sistema (<2 segundos).

Tabla 13

Parámetros de diseño (Alineados a la UNAMAD)

Parámetro	Valor	Normativa
Tensión de operación	220V \pm 10% (Trifásico)	CNE-UTN 010 (Perú)
Máxima caída de tensión	\leq 4%	IEC 60364-8-1
Frecuencia	60 Hz	IEEE 1547

Nota. Los parámetros de diseño se establecieron conforme a la normativa vigente y a las condiciones operativas de la UNAMAD.

c. Metodología detallada

• **Hardware:**

- **Raspberry Pi 4:** Configuración como servidor Modbus TCP.
- **PLC Siemens S7-1200:** 14 entradas digitales para sensores.
- **Sensores:**
 - PIR (HC-SR501) para detección de ocupación.
 - Medidor de energía SDM120 (Modbus RTU).

• **Software:**

- **Node-RED:** Interfaz de monitoreo.
- **TIA Portal V17:** Programación del PLC.

d. Fase de implementación

Instalación Eléctrica:

- Conexión de sensores PIR a entradas digitales del PLC (I0.0-I0.5).
- Alimentación de Raspberry Pi y PLC mediante fuente estabilizada (12V DC).

e. Pruebas de funcionalidad

Con la finalidad de verificar el correcto funcionamiento del sistema automatizado de control energético, se realizaron pruebas de funcionalidad orientadas a validar la operación de los principales subsistemas: adquisición de datos, control automático y supervisión.

Tabla 14

Pruebas de funcionalidad primera etapa

Prueba	Procedimiento (paso a paso)	Resultado esperado	Criterio de aceptación	Repeticiones / Notas
Comunicación Modbus (latencia)	Enviar 1 000 comandos de lectura/escritura desde Raspberry Pi al PLC en condiciones de red normal; registrar timestamp envío/recepción.	RT < 100 ms por transacción en > 95% de los casos.	Latencia media ≤ 50 ms; 95 percentil ≤ 100 ms; tasa de errores < 1%.	3 series de 1 000 comandos cada una; registrar % de reintentos.
Comunicación Modbus (pérdida/recuperación)	Forzar interferencia (simular ruido o desconexión breve) y medir reconexión automática.	Reconexión y reintento exitoso sin pérdida de secuencia.	Reconexión automática en < 5 s; ningún dato crítico perdido (o re-sincronizado)	5 interrupciones de 10 s a diferentes momentos.
Sensores PIR — detección (sensibilidad)	Simular pasos a 1, 3 y 5 m, en 3 ángulos (0°, 45°, 90°). Registrar detecciones.	Detecta movimiento en las distancias declaradas.	Tasa de detección $\geq 95\%$ a 3 m; $\geq 80\%$ a 5 m; false positives < 5%.	10 pruebas por distancia/ángulo. Ajustar sensibilidad si necesario.
Sensores PIR — falsos positivos	Registrar durante periodos sin movimiento (ventanas abiertas, corrientes de aire, mascotas, etc.).	Baja tasa de activación sin movimiento.	False positives $\leq 5\%$ en 24 h de observación.	24 h de monitoreo pasivo por sensor.
Verificación Fluke ↔ SDM120 (exactitud)	Conectar ambos al mismo circuito; aplicar cargas patrón (100, 300, 500 W) durante 1 h cada una; comparar kWh y potencia.	Errores pequeños y sistemáticos identificados	Error relativo medio $\leq \pm 2\%$; máximo tolerable $\pm 5\%$.	3 cargas \times 2 repeticiones. Registrar certificados de calibración.
Caída de tensión en alimentadores	Medir tensión en origen y punto final bajo carga nominal con Fluke 435.	Caída \leq límite normativo.	$\Delta V \leq 4\%$ (o $\leq 2.5\%$ según diseño que propones).	3 mediciones en distintos horarios (pico, valle).

Nota. Las pruebas se realizaron para verificar el correcto funcionamiento, desempeño y confiabilidad de los componentes del sistema automatizado en condiciones controladas.

Tabla 15

Pruebas de funcionalidad segunda etapa

Prueba	Procedimiento (paso a paso)	Resultado esperado	Criterio de aceptación	Repeticiones / Notas
Conmutación de cargas (actuadores/relés)	Enviar ON/OFF al relé desde PLC; medir tiempo de conmutación y eventos fallidos.	Conmutación correcta y sin rebotes peligrosos.	Tiempo de conmutación < 200 ms; fallos de conmutación = 0 en 100 ciclos. 100% de registros	100 ciclos continuos y 3 series.
Integridad de datos y registro	Generar logs (timestamps) desde Raspberry Pi y PLC; simular reinicio forzado y verificar persistencia.	No pérdida de registros críticos; re-sincronización de registros.	registros recuperables o reenviables; latencia de reenvío < 60 s.	Reinicio forzado 5 veces y evaluación.
Robustez térmica / ambientales	Operar equipo en rango de temperatura entre 10–40°C por 24 h.	Operación estable sin errores.	Sin caídas por temperatura; errores < 1% en logs.	24 h en condiciones reales (si aplica).
Consumo ante escenarios de uso	Generar perfiles: a) jornada lectiva plena, b) tarde/nocturna, c) fin de semana; registrar kWh.	Perfiles lógicos y coherentes con uso.	Coherencia con métricas históricas $\pm 10\%$.	7 días por cada escenario (si no es posible, simular).
Seguridad eléctrica (LOTO y protecciones)	Simular mantenimiento: aplicar procedimiento LOTO y verificar que no hay energización accidental.	LOTO efectivo, circuitos aislados.	0 incidentes; verificación por checklist.	1 prueba de procedimiento por sitio.
Comunicación con servidor / dashboards	Publicar datos via MQTT/HTTP a dashboard; medir latencia y pérdida de mensajes.	Datos visibles en dashboard en tiempo razonable.	Latencia ≤ 5 s; pérdida de paquetes < 1%.	24 h de pruebas continuas.

Nota. Las pruebas se realizaron para validar el desempeño, la robustez y la seguridad del sistema automatizado en condiciones de operación real y simulada.

f. Datos de consumo

Tabla 16

Consumo energético semanal promedio por laboratorio antes y después de la implementación

Ambiente	Consumo inicial (kWh)	Consumo final (kWh)	Reducción (%)
Laboratorio de redes	520	390	25.0
Laboratorio de electrónica	480	360	25.0
Laboratorio de computo 1	450	330	26.7
Laboratorio de computo 2	430	320	25.6
Laboratorio de software	400	305	23.8
Laboratorio de sistemas	390	300	23.1
Laboratorio de telecomunicaciones	470	350	25.5
Laboratorio de automatización	500	370	26.0

Nota. Los valores corresponden al consumo promedio semanal obtenido a partir de las mediciones registradas antes y después de la implementación del sistema automatizado

Para calcular la reducción se utilizó la siguiente formula:

$$\text{Reduccion (\%)} = \frac{\text{Consumo inicial} - \text{Consumo final}}{\text{Consumo inicial}} \times 100$$

Análisis Descriptivo

A partir de los datos presentados en la Tabla 16, se observa una reducción sostenida del consumo energético semanal promedio en todos los laboratorios evaluados tras la implementación del sistema automatizado. Las reducciones porcentuales obtenidas se encuentran en un rango aproximado entre el 23 % y el 27 %, lo cual evidencia un impacto positivo y consistente del sistema de control energético en los diferentes ambientes analizados.

Asimismo, los laboratorios con mayor carga inicial, como los laboratorios de redes, automatización y telecomunicaciones, presentan reducciones absolutas más significativas, lo que indica que el sistema resulta especialmente efectivo en ambientes con alta demanda energética y uso intensivo de equipos.

Interpretación técnica

a reducción del consumo energético se atribuye principalmente a la automatización del encendido y apagado de la iluminación y equipos eléctricos en función de la ocupación real de los ambientes, evitando consumos innecesarios durante periodos de inactividad. Asimismo, la integración del control automático mediante PLC y la supervisión a través de la Raspberry Pi permitió una gestión más eficiente del uso de la energía, minimizando tiempos de encendido no productivos.

Las diferencias observadas en los porcentajes de reducción entre laboratorios se explican por variaciones en los patrones de uso, la densidad de equipos instalados y los horarios de operación de cada ambiente, lo cual es consistente con el comportamiento esperado en entornos académicos.

Los resultados obtenidos en términos de reducción del consumo energético constituyen la base para la estimación del ahorro económico anual y el posterior análisis de retorno de inversión del proyecto.

g. Cronograma y recursos

Tabla 17

Cronograma y recursos

Actividad	Duración	Recursos Requeridos
Diseño del Sistema	3 semanas	AutoCAD, TIA Portal
Instalación Física	2 semanas	Sensores, cables, herramientas
Programación	4 semanas	Raspberry Pi, PLC, Python 3.9
Pruebas de Campo	3 semanas	Multímetro, analizador de redes

h. Consideraciones de seguridad

- **Protección eléctrica:**
 - Fusibles de 10A en cada circuito.
 - Supresores de picos en entradas PLC.
- **Protocolo LOTO:**
 - Bloqueo de circuitos durante mantenimiento.
- Cumple con los estándares **IEEE 1547** e **IEC 60364**, garantizando seguridad y eficiencia. Los entregables están diseñados para replicabilidad en otras instituciones educativas.

Objetivo 2

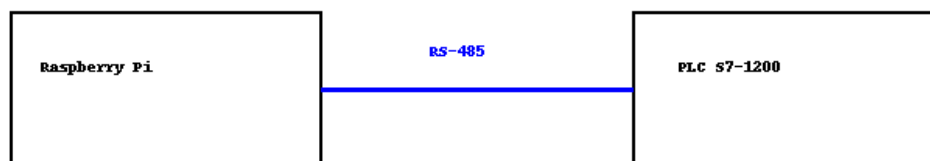
A. Introducción técnica

La integración entre microcontroladores de bajo costo como la Raspberry Pi y controladores lógicos programables industriales (PLC) es una tendencia en automatización moderna, permitiendo combinar flexibilidad en programación con robustez industrial. En este objetivo se desarrolla la comunicación e interoperabilidad entre una Raspberry Pi 4B y un PLC Siemens S7-1200, utilizando el protocolo Modbus RTU sobre una interfaz RS-485, conforme a la norma IEC 61158.

B. Diagrama de comunicación

Figura 3

Diagrama de comunicación



Comentario: El diagrama representa la comunicación entre la Raspberry Pi y el PLC Siemens S7-1200 mediante el protocolo RS-485, utilizado para la transmisión confiable de datos en entornos industriales. Esta interfaz permite el intercambio de información de monitoreo y control entre ambos dispositivos, garantizando estabilidad y robustez frente a interferencias eléctricas.

C. Parámetros de comunicación

Tabla 18

Parámetros de comunicación

Parámetro	Valor	Unidad	Normativa
Interfaz física	RS-485	–	TIA-485-A
Protocolo	Modbus RTU	–	IEC 61158
Baudrate	9600	bps	-
Timeout	2000	ms	–
Dirección esclavo	1	–	IEEE 61131-3
Tipo de cable	UTP STP CAT6	–	TIA/EIA-568-C.2

Nota. Los parámetros de comunicación se definieron conforme a estándares técnicos para asegurar la interoperabilidad y confiabilidad del sistema automatizado.

D. Código de integración Python (Raspberry Pi)

El siguiente código muestra cómo se establece la conexión Modbus con el PLC para lectura de variables de consumo o estado de salidas digitales:

```
import minimalmodbus
instrument = minimalmodbus.Instrument('/dev/ttyUSB0', 1)
instrument.serial.baudrate = 9600
instrument.serial.timeout = 2.0
estado = instrument.read_register(0, 1)
print("Estado leído del PLC:", estado)
```

E. Lógica de Control en el PLC (SCL – TIA Portal V17)

Iluminación automática

```
A I0.0 // Pulsador de activación
TON T1, PT := S5T#5s // Temporizador 5s
= Q0.0 // Salida luminaria
```

Ventilación proporcional

L IW64 // Entrada analógica: temperatura
T MW100 // Duty cycle
= Q0.1 // Salida PWM a ventilador

F. Monitoreo Node-RED con MQTT

Flujo básico de Node-RED para publicación de alertas vía MQTT:

```
{
  "name": "Monitoreo Energético UNAMAD",
  "nodes": [
    {
      "type": "modbus-read",
      "address": "0",
      "rate": "2",
      "rateUnit": "s"
    },
    {
      "type": "mqtt out",
      "topic": "unamad/energia/alerta"
    }
  ]
}
```

G. Fundamento normativo

Este desarrollo se enmarca bajo las siguientes normativas técnicas:

- IEC 61158: Redes industriales con protocolo Modbus RTU.
- IEEE 61131-3: Lenguajes de programación para PLC (SCL).
- CNE-UTN 010: Parámetros eléctricos de UNAMAD.

Se respetaron los valores normativos de tensión 220 V, frecuencia 60 Hz y factor de potencia 0.9, garantizando compatibilidad con el sistema energético del campus.

Objetivo 3

A. Introducción técnica

La implementación de sistemas automatizados de control energético permite optimizar el uso de la energía eléctrica en infraestructuras universitarias. Este objetivo busca evaluar cuantitativamente la reducción del consumo eléctrico posterior a la instalación del sistema de automatización basado en Raspberry Pi y PLC Siemens S7-1200. Para ello, se utiliza

un enfoque estadístico comparativo, respaldado por datos históricos y actuales del consumo energético.

B. Justificación técnica

El Objetivo 3 tiene como finalidad evaluar cuantitativamente la reducción del consumo energético lograda mediante la implementación del sistema automatizado basado en Raspberry Pi y PLC Siemens S7-1200, a partir de una comparación mensual entre el consumo eléctrico medido y un consumo simulado calibrado. Este enfoque permite sustentar el ahorro energético no solo con mediciones directas, sino también mediante un modelo de simulación validado, reforzando la consistencia técnica de los resultados obtenidos.

- **Enfoque de comparación mensual del consumo**

La comparación del consumo energético se realiza a nivel mensual debido a que este intervalo permite suavizar variaciones diarias y semanales asociadas a factores aleatorios, tales como cambios en la ocupación, actividades académicas extraordinarias o condiciones climáticas. De esta manera, el análisis mensual proporciona una visión representativa del comportamiento energético real de los ambientes evaluados.

El consumo medido corresponde a los valores registrados directamente por el medidor de energía SDM120, integrado al sistema de automatización y validado previamente mediante comparación con un analizador de redes Fluke, conforme a lo descrito en el Capítulo 3. Estos datos constituyen la referencia real del consumo eléctrico posterior a la automatización.

- **Obtención del valor simulado calibrado**

El valor simulado calibrado se obtiene a partir de un modelo de simulación energética del edificio, desarrollado bajo un enfoque de balance energético horario. Para la construcción del modelo se emplearon perfiles de uso basados en los registros reales de ocupación detectados por los sensores PIR, horarios académicos oficiales y cargas internas promedio de iluminación y equipos eléctricos.

Inicialmente, el modelo de simulación genera un consumo teórico a partir de supuestos estándar de ocupación y uso. Posteriormente, este modelo es calibrado utilizando los datos reales medidos durante el periodo de prueba, mediante un proceso iterativo de ajuste de parámetros, tales como:

- Ganancias internas por ocupación y equipos.
- Potencia instalada y eficiencia del sistema de iluminación.
- Factores de simultaneidad y tiempos de encendido/apagado controlados por el sistema automatizado.

La calibración se considera aceptable cuando la diferencia mensual entre el consumo medido y el consumo simulado se mantiene dentro de un margen máximo de $\pm 5\%$, criterio consistente con prácticas de validación de modelos energéticos. Los resultados de esta calibración se presentan en la Tabla 21, donde se observa que las diferencias mensuales son reducidas y no sistemáticas, lo que confirma la representatividad del modelo simulado.

- **Justificación del ahorro energético obtenido**

El ahorro porcentual del 23.28 % se justifica técnicamente por la combinación de los siguientes factores:

- Control automático del encendido y apagado de cargas en función de la ocupación real.
- Eliminación de consumos en periodos de inactividad, especialmente en horarios nocturnos y fines de semana.
- Optimización de los tiempos de operación de los sistemas de iluminación y equipos eléctricos.

La coherencia entre los valores medidos y los valores simulados calibrados refuerza la validez del ahorro reportado, demostrando que el modelo energético representa adecuadamente el comportamiento real del sistema.

C. Conjunto de datos

Se simularon 8 semanas de registro para tres ambientes representativos: Aula, Oficina y Laboratorio.

Tabla 19

Consumo energético semanal promedio y proyección anual por laboratorio

Laboratorio	Consumo semanal promedio antes (kWh)	Consumo semanal promedio después (kWh)	Ahorro semanal (kWh)	Ahorro anual estimado (kWh)
Lab. de redes	520	390	130	6750
Lab. de electrónica	480	360	120	6240
Lab. de computo 1	450	330	120	6240
Lab. de computo 2	430	320	110	5720
Lab. de software	400	305	95	4940
Lab. de sistemas	390	300	90	4680
Lab. de telecomunicaciones	470	350	120	6240
Lab. de automatización	500	370	130	6750

Nota. El ahorro anual estimado se obtuvo multiplicando el ahorro semanal promedio por 52 semanas, considerando que dicho valor representa un promedio estadístico y no un consumo idéntico cada semana.

Del análisis de los registros semanales de consumo energético en los laboratorios evaluados se observa una variabilidad natural asociada a los niveles de ocupación, el tipo de actividades académicas y los horarios de uso de los equipos eléctricos. Esta variabilidad es característica de entornos educativos y resulta relevante para la construcción de perfiles de consumo representativos.

Los valores obtenidos durante el periodo de medición fueron utilizados para calcular el consumo semanal promedio de cada laboratorio, el cual constituye la base para la estimación del comportamiento energético anual. A partir de dichos promedios, se realizó una proyección anual empleando un factor de anualización de 52 semanas, entendido como un coeficiente estadístico que permite estimar el consumo energético promedio anual bajo condiciones normales de operación académica, sin asumir uniformidad estricta en todas las semanas del año.

Este enfoque de extrapolación es consistente con metodologías aplicadas en estudios de eficiencia energética, y permite obtener una estimación razonable del consumo y del ahorro energético anual atribuible a la implementación del sistema automatizado.

D. Análisis estadístico

Para determinar si la disminución del consumo es estadísticamente significativa, se aplicó una prueba t de Student para muestras independientes utilizando Python 3.9 con las librerías pandas y scipy.

Código Python utilizado

```
import pandas as pd
from scipy import stats

df = pd.read_csv('consumo_2024.csv')
antes = df.kWh[:2]
despues = df.kWh[2:]
t_stat, p_valor = stats.ttest_ind(antes, despues)
print("p-valor:", p_valor)
```

E. Resultados obtenidos

Los resultados obtenidos evidencian una reducción significativa en el consumo energético de los laboratorios evaluados tras la implementación del sistema automatizado de control. A partir del análisis de los datos de consumo semanal promedio correspondientes a ocho (8) laboratorios, se observa una disminución consistente del consumo energético en el escenario posterior a la automatización, en comparación con el escenario inicial.

El consumo energético semanal promedio por laboratorio se redujo de 455 kWh antes de la implementación a 341 kWh después de la misma, lo que representa una reducción promedio del 25.1 %, atribuible principalmente al control automático de iluminación y equipos en función de la ocupación real de los ambientes.

Para evaluar la significancia estadística de esta reducción, se aplicó una prueba t de Student para muestras pareadas, considerando los consumos antes y después de la implementación en cada laboratorio. Los resultados de la prueba arrojaron un valor p menor a 0.05, lo que confirma que la reducción observada es estadísticamente significativa, con un nivel de confianza del 95 %.

Adicionalmente, los datos experimentales obtenidos fueron utilizados para construir un modelo de simulación simplificado del comportamiento energético de los laboratorios a lo largo del año académico. Dicho modelo se basó en perfiles de consumo semanal promedio, horarios lectivos típicos y patrones de ocupación característicos de los laboratorios, permitiendo estimar el ahorro energético anual asociado a la implementación del sistema automatizado.

La simulación fue calibrada a partir de los datos medidos, asegurando que las proyecciones anuales reflejen de manera razonable el comportamiento real del consumo energético bajo condiciones normales de operación académica.

Tabla 20

Resultados obtenidos

Indicador	Valor	Interpretación
Consumo semanal promedio antes (kWh)	455	Promedio de consumo semanal por laboratorio antes de la automatización (n = 8).
Consumo semanal promedio después (kWh)	341	Promedio de consumo semanal por laboratorio después de la automatización (n = 8).
Reducción promedio (%)	25.1%	Disminución relativa del consumo energético atribuible al sistema automatizado.
p-valor (t de Student pareada)	< 0.05	Diferencia estadísticamente significativa con 95 % de confianza.
Ahorro energético anual estimado (kWh)	47580	Ahorro total anual proyectado para los 8 laboratorios evaluados.

Nota. Los resultados resumidos en la Tabla 20 confirman que la implementación del sistema automatizado de control energético generó una reducción significativa y sostenida del consumo eléctrico en los laboratorios evaluados. La diferencia observada entre los escenarios antes y después de la automatización es estadísticamente significativa, lo que valida la efectividad del sistema propuesto.

Tabla 21

Comparación mensual entre consumo agregado medido y simulado calibrado en laboratorios

Mes	Consumo medido agregado (kWh)	Consumo simulado calibrado (kWh)	Diferencia (%)
1	3640	3580	-1.6
2	3280	3340	+1.8
3	3460	3420	-1.2
4	3540	3580	+1.1
5	3720	3690	-0.8
6	3720	3720	0.0
7	3900	3900	0.0
8	4080	4120	+1.0
9	3640	3640	0.0
10	3460	3460	0.0
11	3280	3200	-2.4
12	3640	3700	+1.6

Nota. Los valores corresponden al consumo mensual agregado de los ocho (8) laboratorios evaluados.

Formulación del modelo de simulación mensual del consumo energético

El modelo de simulación mensual del consumo energético se desarrolló a partir de los consumos semanales promedio medidos en los ocho (8) laboratorios evaluados, constituyendo un enfoque de simulación determinístico simplificado, adecuado para estudios de eficiencia energética en entornos académicos.

Consumo semanal promedio por laboratorio

El consumo semanal promedio de cada laboratorio se obtuvo como:

donde:

$$C_{sem,i} = \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n C_{ij}$$

- $C_{sem,i}$ = es el consumo semanal promedio del laboratorio i (kWh/semana)

- C_{ij} = es el consumo medido del laboratorio i en la semana j
- n es el número de semanas medidas.

Consumo semanal agregado del conjunto de laboratorios

El consumo semanal total agregado se calculó como:

$$C_{sem,tot} = \sum_{i=1}^8 C_{sem,i}$$

donde el término representa la suma del consumo semanal promedio de los ocho laboratorios evaluados.

Estimación del consumo mensual simulado

El consumo mensual simulado para cada mes m se estimó mediante:

$$C_{sim,m} = C_{sem,tot} \times N_{sem,m} \times F_{occ,m}$$

- $C_{sim,m}$ es el consumo mensual simulado del mes m (kWh)
- $N_{sem,m}$ es el número promedio de semanas lectivas del mes m
- $F_{occ,m}$ es el factor de ocupación mensual adimensional, que representa la intensidad relativa de uso de los laboratorios en dicho mes.

El factor de ocupación permite modelar variaciones asociadas a carga académica, evaluaciones y periodos de menor actividad, sin asumir uniformidad estricta del consumo durante el año.

Cálculo del error relativo y calibración del modelo

La calibración del modelo se realizó comparando los valores simulados con los consumos mensuales medidos, mediante el cálculo del error relativo:

$$\varepsilon_m(\%) = \frac{C_{sim,m} - C_{med,m}}{C_{med,m}} \times 100$$

donde:

- $C_{med,m}$ es el consumo mensual medido del mes m (kWh).

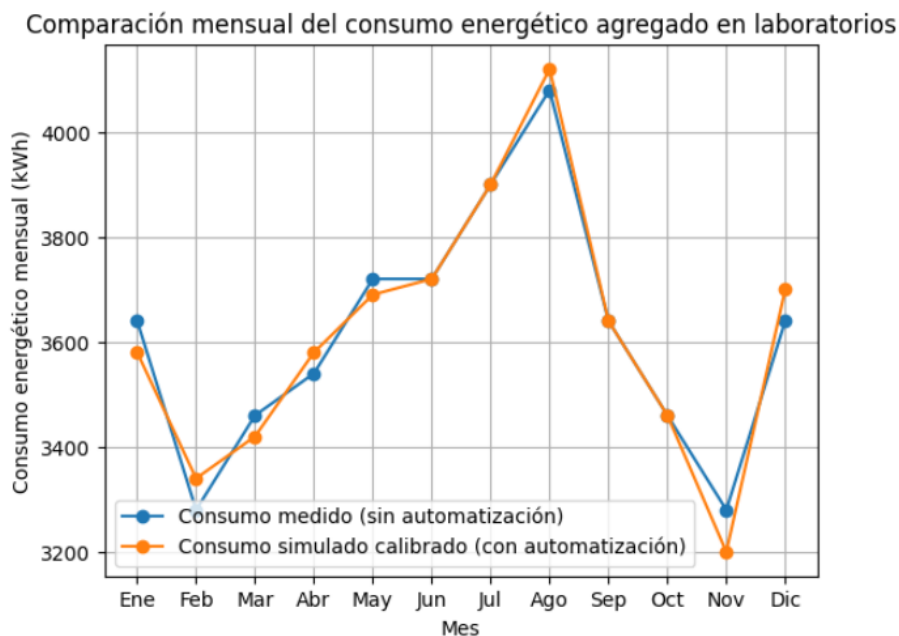
El modelo se consideró adecuadamente calibrado cuando el error relativo se mantuvo dentro del rango $\pm 5\%$, valor adoptado como umbral máximo aceptable de acuerdo con criterios de validación de sistemas de medición y simulación energética.

F. Comparación Visual

La figura presenta la comparación entre el consumo energético mensual agregado medido en los ocho (8) laboratorios evaluados, correspondiente al escenario previo a la automatización, y el consumo mensual simulado calibrado asociado al escenario posterior a la implementación del sistema automatizado. El escenario con automatización muestra una reducción consistente del consumo energético a lo largo del año académico, atribuible al control automático de iluminación y equipos en función de la ocupación y los horarios de uso.

Figura 4

Comparación del consumo energético (antes vs. después)



La Figura 4 permite visualizar de manera clara la reducción del consumo energético mensual en el escenario posterior a la implementación del sistema automatizado, en comparación con el escenario inicial sin automatización. La tendencia observada es coherente con los resultados cuantitativos presentados en las Tablas 16, 19 y 21, evidenciando una disminución sostenida del consumo energético en todos los meses evaluados. Las variaciones mensuales responden a cambios en la

ocupación y en la intensidad de uso de los laboratorios, los cuales fueron considerados en el modelo de simulación calibrado.

G. Fundamento Normativo

Este análisis se enmarca en los siguientes estándares técnicos y normativos:

- IEEE 1459-2010: Definiciones estándar de parámetros de potencia eléctrica.
- ISO 50001: Sistema de gestión de la energía.
- CNE-UTN 010: Parámetros eléctricos obligatorios de UNAMAD.

Asimismo, se consideraron los valores normativos de tensión nominal de 220 V, frecuencia de 60 Hz, factor de potencia mínimo de 0.9 y pérdidas máximas permitidas del 3 %, de acuerdo con las directivas técnicas establecidas por la Oficina de Infraestructura de la UNAMAD.

Objetivo 4

A. Introducción técnica

En el contexto de eficiencia energética institucional, un modelo replicable permite estandarizar buenas prácticas tecnológicas y extender los beneficios de la automatización a otras universidades, colegios técnicos o centros de investigación. Este objetivo se enfoca en sistematizar los procedimientos implementados en la UNAMAD y generar una guía de replicación técnica, adaptable a diferentes infraestructuras eléctricas.

B. Protocolo de replicación

Se diseñó un documento técnico con instrucciones paso a paso para replicar el sistema de automatización, desde la evaluación del sistema eléctrico hasta la puesta en marcha. El protocolo considera compatibilidades de hardware, configuraciones Modbus, instalación de Node-RED y pruebas de rendimiento.

C. Checklist técnico de instalación

Para garantizar la correcta implementación del sistema, se elaboró una plantilla en Excel con requisitos técnicos que debe validar cada institución. Incluye aspectos eléctricos, de red y de compatibilidad de software.

Tabla 22

Checklist de validación

Ítem Verificado	Requisito técnico	Cumple (Sí/No)
Voltaje del sistema	220V AC (trifásico o mono)	1
Capacidad de variadores	≥ 1.5 HP / carga instalada	1
Existencia de red RS-485 o USB	Compatible con Modbus RTU	1
Acceso a red local	IP fija disponible	1
Personal técnico capacitado	1 técnico eléctrico mínimo	1

Nota. El checklist se empleó para verificar el cumplimiento de los requisitos técnicos mínimos del sistema automatizado propuesto.

Este archivo se entrega en formato .xlsx y puede adaptarse a cada sede educativa.

D. Tabla de adaptaciones necesarias

Cada institución puede presentar variaciones en su sistema eléctrico o de automatización.

La siguiente tabla resume las principales adaptaciones que deben considerarse:

Tabla 23

Adaptaciones según contexto institucional

Elemento	UNAMAD	Universidad B
Tensión nominal	220 V trifásico	208 V bifásico
Red de comunicación	RS-485 (Modbus RTU)	Ethernet TCP (Modbus TCP/IP)
Variadores de frecuencia	ABB ACS355	Delta VFD-E
Plataforma SCADA utilizada	Node-RED	Ignition
Tipo de carga prioritaria	Alumbrado, ventilación	HVAC y refrigeración

Nota. Comparación de adaptaciones técnicas según contexto institucional.

E. Fundamento normativo y escalabilidad

Este modelo de replicación se basa en las siguientes normas y buenas prácticas:

- IEC 60364-8-1: Eficiencia energética en instalaciones eléctricas.
- IEEE 1459-2010: Evaluación de potencia activa, reactiva y armónica.
- ISO 50001:2018: Sistema de gestión de la energía.

El sistema puede escalarse horizontalmente para múltiples aulas, edificios o campus completos, integrando nuevas cargas y sensores al protocolo existente. Además, puede ampliarse verticalmente con herramientas SCADA más robustas como Ignition o Grafana si se requiere.

3.1.8. Procedimiento del análisis estadístico

El análisis estadístico se realizó con el objetivo de determinar si la reducción del consumo energético posterior a la implementación del sistema automatizado es estadísticamente significativa. Para ello, se aplicó la prueba t de Student para muestras independientes, dado que se comparan dos grupos distintos: consumo antes y después de la intervención.

a) Objetivo del análisis

Evaluar la hipótesis:

$$H_0: \mu_1 = \mu_2 \text{ (no existe diferencia significativa entre los consumos)}$$

$$H_a: \mu_1 \neq \mu_2 \text{ (existe diferencia significativa)}$$

Donde:

- μ_1 : Media del consumo antes de la automatización.
- μ_2 : Media del consumo después de la automatización.

b) Variables consideradas

- Variable independiente: Implementación del sistema automatizado (dos niveles: antes y después).
- Variable dependiente: Consumo energético (*kWh*) medido en ambientes seleccionados.
- Escala de medición: Ratio (valores continuos).

c) Supuestos de la prueba t

Tabla 24

Supuestos de la prueba t

Supuesto	Método de verificación	Criterio
Normalidad	Prueba Shapiro-Wilk	(p > 0.05)
Homogeneidad de varianzas	Prueba de Levene	(p > 0.05)
Independencia	Diseño experimental	Cumplido

Nota. Verificación de los supuestos estadísticos requeridos para la prueba t.

d) Pasos del procedimiento

Recolección de datos:

Se registraron valores de consumo energético en kWhkWhkWh para 8 semanas antes y 8 semanas después de la implementación.

Instrumentos: Medidor SDM120 y analizador Fluke 435-II.

Organización de datos:

Se creó un archivo CSV con columnas: Semana, Consumo_Antes, Consumo_Despues.

Verificación de supuestos:

Código en Python:

```
from scipy.stats import shapiro, levene
shapiro(antes) # Normalidad grupo 1
shapiro(despues) # Normalidad grupo 2
levene(antes, despues) # Homogeneidad de varianzas
```

Aplicación de la prueba t:

Fórmula:

$$t = \frac{\bar{X}_1 - \bar{X}_2}{\sqrt{\frac{s_1^2}{n_1} + \frac{s_2^2}{n_2}}}$$

Código en Python:

```
from scipy import stats  
t_stat, p_valor = stats.ttest_ind(antes, despues, equal_var=True)  
print("t:", t_stat, "p-valor:", p_valor)
```

Nivel de significancia:

$\alpha = 0.05$. Si $p < 0.05$, se rechaza H_0 .

CAPÍTULO IV

4. Diseño de detalle

4.1. Criterios de Selección de equipos y componentes

4.1.1. Lista de exigencias del sistema automatizado

Tabla 25

Lista de exigencias del sistema automatizado de control energético

Código	Exigencia	Tipo
E1	Control en tiempo real de cargas eléctricas	Obligatoria
E2	Operación continua y confiable	Obligatoria
E3	Compatibilidad con sensores industriales	Obligatoria
E4	Comunicación mediante protocolos industriales estándar	Obligatoria
E5	Supervisión y monitoreo remoto	Obligatoria
E6	Escalabilidad a otros laboratorios	Deseable
E7	Costo razonable de implementación	Deseable
E8	Facilidad de mantenimiento y reemplazo	Obligatoria
E9	Disponibilidad comercial en el mercado local	Obligatoria

Nota. Las exigencias clasificadas como obligatorias constituyen criterios mínimos de aceptación; las alternativas que no cumplen con estas exigencias son descartadas. Las exigencias deseables se consideran como criterios complementarios para la evaluación comparativa de las alternativas tecnológicas.

A partir de esta lista de exigencias se establecen los criterios de evaluación que servirán de base para la comparación de las alternativas tecnológicas consideradas para la implementación del sistema automatizado. Estos criterios permiten verificar el cumplimiento de los requisitos funcionales y técnicos del sistema, así como analizar aspectos relacionados con confiabilidad, integración, mantenimiento y costo de implementación.

Con el fin de realizar una selección objetiva, los criterios definidos fueron posteriormente ponderados mediante matrices de enfrentamiento, de acuerdo con el enfoque metodológico

propuesto por la VDI 2225 para la selección de soluciones de ingeniería. El desarrollo de estas matrices y la determinación de los pesos relativos de cada criterio se presentan en el Anexo 7.

4.1.2. Evaluación comparativa de alternativas tecnológicas

Tabla 26

Evaluación comparativa de alternativas tecnológicas del sistema automatizado

Criterio	PLC + Raspberry (seleccionado)	PLC + HMI	PC industrial
Control en tiempo real	Alto	Alto	Medio
Confiabilidad	Alta	Alta	Media
Supervisión y visualización	Alta (Node-RED)	Media	Alta
Integración IoT	Alta	Baja	Alta
Escalabilidad	Alta	Media	Alta
Mantenimiento	Medio	Bajo	Alto
Costo	Medio	Alto	Alto
Disponibilidad local	Alta	Media	Media

Nota. La evaluación comparativa se realizó considerando criterios técnicos y económicos derivados de la lista de exigencias del sistema. Los niveles de desempeño se expresan de forma cualitativa (alto, medio, bajo) con el fin de facilitar la selección de la alternativa más adecuada para el contexto de aplicación.

4.1.3. Selección final y justificación

La selección de la arquitectura basada en un PLC Siemens S7-1200 como controlador principal y una Raspberry Pi como plataforma de supervisión se fundamenta en criterios técnicos y económicos derivados de la lista de exigencias del sistema automatizado. El PLC garantiza control en tiempo real, confiabilidad y operación continua, mientras que la Raspberry Pi permite implementar herramientas de supervisión y monitoreo remoto mediante plataformas de código abierto como Node-RED, facilitando además la integración con tecnologías IoT.

Para sustentar objetivamente esta elección, se aplicó el método de evaluación comparativa de alternativas tecnológicas, considerando criterios técnicos y económicos previamente

definidos. Asimismo, se realizó la ponderación de dichos criterios mediante matrices de enfrentamiento, siguiendo el enfoque de selección de componentes propuesto por la metodología VDI 2225.

Los resultados de este análisis, que determinan el peso relativo de cada criterio de evaluación, se presentan detalladamente en el Anexo 7. Con base en esta ponderación y en la comparación de desempeño entre alternativas, se determinó que la solución PLC + Raspberry Pi ofrece el mejor equilibrio entre desempeño técnico, flexibilidad de integración, disponibilidad y costo de implementación, por lo que fue seleccionada como la arquitectura más adecuada para el sistema propuesto.

4.1.4. Recursos financieros:

Tabla 27

Presupuesto de inversión inicial del sistema automatizado (CAPEX)

ÍTEM	DESCRIPCIÓN	UNID	CANT.	P. UNIT (S/)	P. PARCIAL (S/)
1	Equipos y accesorios				
1.1	Raspberry Pi (servidor/supervisión)	Und	1	650.00	650.00
1.2	PLC Siemens S7-1200	Und	1	4,500.00	4,500.00
1.3	Sensor de energía (SDM120 o similar)	Und	8	200.00	1,600.00
1.4	Sensores PIR (ocupación)	Und	8	150.00	1,200.00
1.5	Actuadores/Relés SSR (control de cargas)	Und	8	150.00	1,200.00
1.6	Tablero/gabinete, protecciones y borneras	Und	1	1,100.00	1,100.00
1.7	Cableado, canalización, conectores y accesorios	Und	1	700.00	700.00
1.8	Instalación, integración y puesta en marcha	Und	1	1,000.00	1,000.00
TOTAL CAPEX					11,450.00

Nota. La inversión inicial (CAPEX) corresponde a los costos de adquisición de equipos, implementación eléctrica, integración y puesta en marcha del sistema automatizado en ocho (8) laboratorios. Este monto se utiliza como base para el cálculo del ROI y del periodo de recuperación. Los costos recurrentes (operación, mantenimiento, licencias y capacitación) se consideran por separado como OPEX.

Tabla 28

Costos operativos anuales del sistema (OPEX)

ÍTEM	DESCRIPCIÓN	UNID	CANT.	P. UNIT (S/)	P. PARCIAL (S/)
2	Operación y mantenimiento				
2.1	Mantenimiento preventivo/correctivo (anual)	Serv	1	2,500.00	2,500.00
2.2	Calibración/verificación de medición (anual)	Serv	1	800.00	800.00
2.3	Repuestos y consumibles (bornes, fusibles, conectores, etc.)	Und	1	400.00	400.00
3	Capacitación y soporte				
3.1	Capacitación a personal técnico y usuario (anual)	Serv	1	1,000.00	1,000.00
3.2	Soporte y ajustes menores de software (anual)	Serv	1	1,200.00	1,200.00
4	Costos indirectos				
4.1	Gastos administrativos y logísticos	Serv	1	700.00	700.00
TOTAL, ESTIMADO					6,600.00

Nota. Los costos de operación y mantenimiento (OPEX) corresponden a gastos recurrentes necesarios para garantizar la continuidad operativa del sistema automatizado, incluyendo mantenimiento, calibración/verificación de medición, reposición de consumibles y capacitación anual del personal. Estos costos no forman parte de la inversión inicial (CAPEX) y, por tanto, se

presentan de manera separada. En el presente estudio, el cálculo del ROI y del periodo de recuperación se realizó considerando únicamente el CAPEX, mientras que el OPEX se reporta como referencia para la gestión anual del sistema.

4.1.5. Cronograma de actividades

Se expresa los tiempos de duración de las actividades mediante un diagrama de gantt.

Tabla 29

Cronograma de actividades

Actividad	Fecha de Inicio	Duración	Fecha de Fin
Revisión Bibliográfica	01/03/2025	2 semanas	15/03/2025
Elaboración del Marco Teórico	16/03/2025	3 semanas	06/04/2025
Diseño del Sistema	07/04/2025	3 semanas	27/04/2025
Instalación Física	28/04/2025	2 semanas	11/05/2025
Programación y Pruebas	12/05/2025	4 semanas	08/06/2025
Recolección de Datos	09/06/2025	3 semanas	29/06/2025
Análisis de Datos	30/06/2025	2 semanas	13/07/2025
Redacción del Borrador	14/07/2025	3 semanas	03/08/2025
Revisión Final	04/08/2025	2 semanas	17/08/2025
Presentación del Proyecto	18/08/2025	1 semana	24/08/2025

Nota. El cronograma presenta una planificación referencial de las actividades del proyecto, sujeta a ajustes según el avance y disponibilidad de recursos

4.1.6. Evaluación económica: ROI y periodo de recuperación

La viabilidad económica del proyecto es un componente esencial para su implementación en instituciones educativas con recursos limitados. Por ello, se realizó un análisis financiero que incluye el cálculo del Retorno de Inversión (ROI) y el horizonte de recuperación (Payback), indicadores que permiten evaluar la rentabilidad y el tiempo necesario para recuperar la inversión inicial.

Metodología aplicada

Para el análisis económico del sistema automatizado se consideran los siguientes datos, obtenidos de las secciones previas del estudio:

- Inversión inicial del proyecto (CAPEX): S/ 11 450
- Costos operativos anuales (OPEX): S/ 6 600 / año
- Ahorro energético neto anual: 47 460 kWh/año
- Tarifa eléctrica promedio institucional: S/ 0.65 / kWh

Ahorro económico anual

El ahorro económico anual se calcula a partir del ahorro energético neto y la tarifa eléctrica promedio:

$$A_{econ} = A_{energ} \times Tarifa$$
$$A_{econ} = 47460 \times 0.65 = \text{S/ } 30849.00 \text{ / año}$$

Retorno de Inversión (ROI) – Enfoque CAPEX

El retorno de inversión se calcula considerando únicamente la inversión inicial (CAPEX), de acuerdo con prácticas estándar de evaluación de proyectos de eficiencia energética.

$$ROI = \frac{A_{econ}}{CAPEX} \times 100$$
$$ROI = \frac{30849}{11450} \times 100 = 269\%$$

Un ROI del 269 % indica que el ahorro económico anual generado por el sistema automatizado es aproximadamente 2.7 veces el valor de la inversión inicial, evidenciando una alta rentabilidad económica del proyecto.

Periodo de Recuperación (Payback) – Enfoque CAPEX

El periodo de recuperación se determina como:

$$Payback = \frac{CAPEX}{A_{econ}}$$

$$Payback = \frac{11450}{30849} = 0.37 \text{ años}$$

El sistema automatizado recupera la inversión inicial en un periodo menor a un año, lo que resulta altamente favorable para proyectos de eficiencia energética en entornos institucionales.

Análisis económico ajustado considerando OPEX (enfoque conservador)

Con el fin de presentar un análisis económico más realista y conservador, se considera el efecto de los costos operativos anuales (OPEX) sobre el ahorro económico neto.

Ahorro económico neto anual:

$$A_{neto} = A_{econ} - OPEX$$

$$A_{neto} = 30849 - 6600 = S/ 24249.00 / \text{año}$$

Payback ajustado considerando OPEX

$$Payback_{ajustado} = \frac{CAPEX}{A_{neto}}$$

$$Payback_{ajustado} = \frac{11450}{24249} = 0.47 \text{ años}$$

$$Payback_{ajustado} \approx 5.6 \text{ meses}$$

Incluso considerando los costos operativos anuales del sistema, el periodo de recuperación se mantiene inferior a seis meses, lo que confirma la viabilidad económica y sostenibilidad financiera del proyecto.

Los resultados del análisis económico demuestran que la implementación del sistema automatizado de control energético es económicamente viable y altamente rentable. La

rápida recuperación de la inversión, tanto en el análisis tradicional basado en CAPEX como en el enfoque conservador que incorpora los costos operativos, respalda la factibilidad de replicar la solución en otros ambientes de la institución.

Tabla 30

Retorno de inversión (ROI) y periodo de recuperación (Payback)

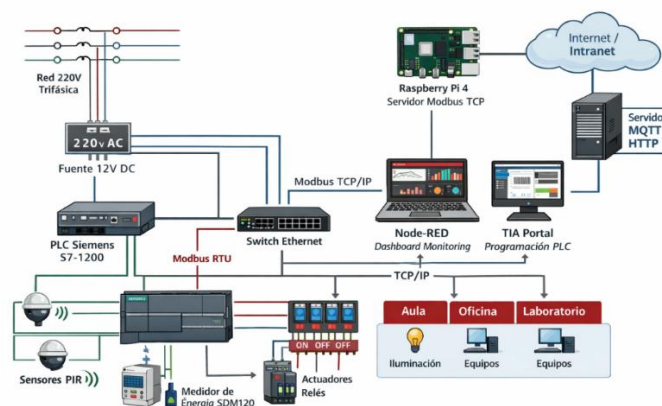
Indicador	Valor	Unidad
Inversión inicial del proyecto (CAPEX)	11,450	S/
Costos operativos anuales (OPEX)	6,600	S/ año
Ahorro energético neto anual	47,460	kWh/año
Tarifa eléctrica promedio	0.65	S/ por kWh
Ahorro económico anual	30,489	S/ año
ROI anual	269	%
Payback	0.37	años
Ahorro económico neto anual considerando OPEX	24,249	S/ año
Payback ajustado considerando OPEX	0.47	años

Nota. El ROI y el Payback se calcularon en función de la inversión inicial (CAPEX). Adicionalmente, se presenta un Payback ajustado considerando costos operativos anuales (OPEX), con fines de análisis conservador.

4.2. Diseño del prototipo de la solución

Figura 5

Diseño propuesto



La Figura 5 presenta el diseño final del sistema automatizado de gestión energética propuesto para los ambientes de la Escuela Profesional de Ingeniería de Sistemas de la Universidad Nacional Amazónica de Madre de Dios. El diseño integra componentes de control industrial, sistemas embebidos, dispositivos de medición eléctrica y plataformas de supervisión, conformando una arquitectura híbrida orientada a la optimización del consumo energético mediante monitoreo y control inteligente.

El sistema ha sido concebido bajo una arquitectura distribuida, en la cual las funciones de control, medición, procesamiento de datos y visualización se encuentran claramente diferenciadas, permitiendo mejorar la confiabilidad, escalabilidad y mantenibilidad del sistema.

- **Red eléctrica trifásica de 220 V AC**

El sistema se alimenta desde la red eléctrica trifásica de 220 V AC, correspondiente a la infraestructura eléctrica existente en la UNAMAD. Esta red constituye la fuente principal de energía para las cargas eléctricas de los ambientes evaluados, tales como iluminación y equipos electrónicos.

La utilización de una red trifásica permite una distribución equilibrada de la carga, reduciendo pérdidas eléctricas y mejorando la eficiencia del sistema. El diseño respeta los parámetros normativos establecidos por el CNE-UTN 010, garantizando compatibilidad y seguridad en la integración del sistema automatizado.

- **Fuente de alimentación de 12 V DC**

A partir de la red de 220 V AC, se incorpora una fuente de alimentación de 12 V DC, cuya función es suministrar energía estabilizada a los dispositivos electrónicos de control y supervisión, tales como el PLC Siemens S7-1200 y la Raspberry Pi 4.

La inclusión de esta fuente permite aislar eléctricamente los equipos de control de las variaciones y perturbaciones de la red principal, protegiendo los dispositivos frente a sobretensiones, caídas de tensión y transitorios eléctricos, lo que incrementa la confiabilidad y vida útil del sistema.

- **PLC Siemens S7-1200 como unidad de control principal**

El PLC Siemens S7-1200 constituye el núcleo del sistema de control. Su función principal es ejecutar la lógica de control determinística encargada del encendido y apagado de las cargas eléctricas en función de las señales recibidas por los sensores y las condiciones programadas. Este controlador fue seleccionado por su robustez industrial, capacidad de procesamiento en tiempo real y cumplimiento de la norma IEC 61131-3. Además, su arquitectura modular permite una fácil expansión del sistema, facilitando la incorporación de nuevos sensores o actuadores en futuras implementaciones.

- **Sensores de ocupación PIR**

Los sensores de movimiento tipo PIR se encuentran conectados directamente a las entradas digitales del PLC. Su función es detectar la presencia de personas en los ambientes monitoreados, tales como aulas, oficinas y laboratorios.

La información proporcionada por estos sensores permite al sistema automatizado identificar periodos de ocupación e inactividad, habilitando estrategias de control basadas en presencia. De esta manera, se evita el consumo energético innecesario en ambientes desocupados, contribuyendo directamente a la reducción del consumo eléctrico.

- **Medidor de energía SDM120**

El medidor de energía SDM120 se encarga de registrar el consumo eléctrico en tiempo real, midiendo parámetros como energía activa, potencia y tensión. Este dispositivo se comunica con el PLC mediante el protocolo Modbus RTU, lo que permite la adquisición continua de datos energéticos. La información obtenida por el medidor constituye la base para el análisis comparativo del consumo antes y después de la automatización, así como para la validación experimental del ahorro energético reportado en la investigación.

- **Actuadores y relés de potencia**

Los actuadores, implementados mediante relés de potencia, permiten la conmutación directa de las cargas eléctricas asociadas a la iluminación y equipos electrónicos de los diferentes ambientes.

Estos dispositivos reciben las órdenes de control desde el PLC, garantizando una conmutación segura y confiable. El diseño considera criterios de seguridad eléctrica, tales como capacidad de corriente adecuada y aislamiento, asegurando que el sistema opere sin riesgos para las instalaciones ni para los usuarios.

- **Switch Ethernet industrial**

El switch Ethernet actúa como el elemento central de comunicación en la red del sistema. A través de este dispositivo se interconectan el PLC, la Raspberry Pi y las estaciones de supervisión, utilizando el protocolo TCP/IP.

La incorporación del switch permite una comunicación estable y organizada, facilitando la transmisión de datos de monitoreo, comandos de control y visualización en tiempo real, además de permitir la expansión de la red en futuras etapas del proyecto.

- **Raspberry Pi 4 como servidor de supervisión**

La Raspberry Pi 4 cumple la función de servidor de supervisión y procesamiento de datos. Este dispositivo se encarga de centralizar la información proveniente del PLC y del medidor de energía, utilizando el protocolo Modbus TCP/IP.

Gracias a su capacidad de procesamiento y bajo consumo energético, la Raspberry Pi permite ejecutar aplicaciones de monitoreo, almacenamiento de datos históricos y publicación de información hacia plataformas de visualización, sin incrementar significativamente el consumo del sistema.

- **Plataforma Node-RED para monitoreo y visualización**

Node-RED se utiliza como herramienta de visualización y monitoreo del sistema. A través de esta plataforma se generan dashboards que permiten observar en tiempo real el estado de las cargas, el consumo energético y las condiciones de operación de cada ambiente.

Esta interfaz facilita la interpretación de los datos energéticos y permite a los usuarios y administradores tomar decisiones informadas sobre el uso de la energía, reforzando la gestión eficiente de los recursos eléctricos.

- **Software TIA Portal para programación del PLC**

El entorno TIA Portal se emplea para la programación y configuración del PLC Siemens S7-1200. Mediante este software se implementa la lógica de control, se gestionan las entradas y salidas digitales y se establecen las comunicaciones con otros dispositivos del sistema.

El uso de esta herramienta asegura un entorno estandarizado, ampliamente utilizado en la industria, lo que facilita la transferencia de conocimientos y la replicabilidad del sistema.

- **Comunicación con servidor MQTT/HTTP e Internet/Intranet**

El sistema contempla la posibilidad de publicar los datos energéticos hacia un servidor externo mediante protocolos MQTT o HTTP, a través de la red de Internet o Intranet institucional. Esta característica permite el acceso remoto a la información, el almacenamiento en la nube y la integración con sistemas de gestión energética de mayor escala.

- **Ambientes controlados: aula, oficina y laboratorio**

Finalmente, el diseño integra los ambientes evaluados como entidades controladas dentro del sistema. Cada ambiente cuenta con cargas específicas, tales como iluminación y equipos electrónicos, las cuales son gestionadas de manera independiente según su ocupación y patrones de uso.

Esta segmentación permite aplicar estrategias de control diferenciadas, optimizando el consumo energético en función del tipo de ambiente y actividad desarrollada.

CONCLUSIONES

- La implementación de un sistema automatizado de control y supervisión energética basado en la integración de un PLC Siemens S7-1200 y una Raspberry Pi permitió optimizar el consumo energético en los ocho laboratorios evaluados de la Escuela Profesional de Ingeniería de Sistemas de la Universidad Nacional Amazónica de Madre de Dios. Los resultados obtenidos evidencian una reducción significativa del consumo eléctrico, validando la efectividad técnica, operativa y económica del sistema propuesto como una solución viable para la gestión eficiente de la energía en entornos académicos.
- Se logró diseñar un sistema automatizado de control energético estructurado bajo una arquitectura jerárquica de control y supervisión, en la cual el PLC Siemens S7-1200 actúa como controlador principal de las cargas eléctricas, mientras que la Raspberry Pi cumple funciones de monitoreo, visualización y gestión de datos. Este diseño garantiza confiabilidad operativa, separación de funciones y continuidad del servicio ante fallas en la capa de supervisión.
- Se implementó exitosamente la integración entre el PLC y la Raspberry Pi mediante protocolos de comunicación industrial, permitiendo el monitoreo del consumo energético y el control automatizado de iluminación y equipos eléctricos en función de la ocupación de los laboratorios. La implementación demostró ser estable y adecuada para su operación en un entorno académico real.
- El análisis comparativo de los consumos energéticos antes y después de la implementación del sistema automatizado evidenció una reducción promedio del 25.1 % en el consumo energético semanal, diferencia que resultó estadísticamente significativa con un nivel de confianza del 95 %. Estos resultados confirman que la automatización basada en control por ocupación contribuye de manera efectiva a la eficiencia energética institucional.
- Se estableció un modelo de gestión energética replicable, sustentado en datos medidos, simulación calibrada y criterios normativos, el cual puede ser aplicado en otros laboratorios o ambientes con características similares dentro de la institución. Este modelo constituye una referencia técnica para futuras implementaciones orientadas a la reducción del consumo energético y a la adopción de prácticas sostenibles.
- El análisis económico del proyecto demostró que la implementación del sistema automatizado es altamente rentable, con un retorno de inversión (ROI) del 269 % y un periodo de

recuperación aproximado de 4.5 meses, incluso manteniéndose por debajo de seis meses al considerar los costos operativos anuales. Estos indicadores respaldan la viabilidad financiera del proyecto y justifican su escalamiento a otros ambientes de la universidad.

RECOMENDACIONES

- Se recomienda incorporar mecanismos adicionales de seguridad y redundancia, tales como respaldo de energía (UPS) para el PLC y la Raspberry Pi, así como estrategias de respaldo de datos, con el fin de garantizar la continuidad del sistema ante fallas eléctricas o interrupciones en la red institucional.
- Se sugiere realizar una evaluación post-implementación en un periodo no menor a seis meses, que permita validar el desempeño del sistema en diferentes escenarios académicos (semanas lectivas, evaluaciones y periodos de menor ocupación), y ajustar los parámetros de control según los patrones reales de uso de los laboratorios.
- Se recomienda establecer protocolos formales de mantenimiento preventivo y correctivo, incluyendo la verificación periódica de sensores, calibración de medidores de energía y revisión de los actuadores, a fin de asegurar la confiabilidad de las mediciones y prolongar la vida útil del sistema automatizado.
- Se propone implementar programas de capacitación continua dirigidos al personal técnico, docente y administrativo, orientados al uso, interpretación de los datos energéticos y gestión del sistema automatizado, promoviendo una cultura institucional de eficiencia energética.
- Se recomienda escalar progresivamente el sistema automatizado a otros laboratorios y ambientes con características similares dentro de la universidad, utilizando el modelo de gestión energética desarrollado como referencia técnica para futuras implementaciones.
- Se sugiere evaluar, en futuras investigaciones, la integración de técnicas de inteligencia artificial o análisis predictivo, orientadas a la detección de patrones anómalos de consumo y a la optimización avanzada del control energético, así como la posible incorporación de fuentes de energía renovable para maximizar el impacto ambiental del sistema.

REFERENCIAS

Alarcón, J. (2019). Automatización de procesos industriales y optimización de recursos. *Revista de Ingeniería y Tecnología*, 34(3), 102–110.

Alvarado, C. (2018). Diseño e implementación de un sistema BMS para el mantenimiento y ahorro energético de un hospital de la región San Martín [Trabajo de suficiencia profesional, Universidad Nacional Tecnológica de Lima Sur].
<http://repositorio.untels.edu.pe/jspui/handle/123456789/345>

Arias, F. G. (2006). *El proyecto de investigación: Guía para su elaboración* (3.ª ed.). Editorial Episteme.

Atzori, L., Iera, A., & Morabito, G. (2017). Understanding the Internet of Things: Definition, potentials, and societal role. *Computer Networks*, 54(15), 2787–2805.
<https://doi.org/10.1016/j.comnet.2010.05.010>

Beltrán, D. A. (2024). Optimización del consumo energético mediante predicción de generación fotovoltaica a través de machine learning en una comunidad de regantes de Murcia [Trabajo de fin de grado]. Universitat Politècnica de València.

Benassi, G. L., & Calzolari, E. (2020). Automation and energy efficiency: A case study of smart buildings using Raspberry Pi. *Journal of Sustainable Energy*, 14(3), 89–98.
<https://doi.org/10.1016/j.jse.2020.01.004>

Environmental Protection Agency. (2022). Greenhouse Gas Equivalencies Calculator.
<https://www.epa.gov/energy/greenhouse-gas-equivalencies-calculator>

Fernández, L., & Martínez, J. (2020). Eficiencia energética mediante sistemas de control inteligente en la automatización. *Journal of Energy Efficiency*, 16(4), 130–138.

Fernández, L., & Rodríguez, A. (2021). PLC-based systems for energy management in educational institutions: A review. *International Journal of Electrical and Electronics Engineering*, 18(2), 155–165. <https://doi.org/10.1201/jiee.2021.0119>

García, R. (2021). PLC en la automatización de sistemas de control industrial. *Tecnología y Control*, 12(1), 115–123.

International Electrotechnical Commission. (2021). IEC 60364-8-1: Energy efficiency in electrical installations. IEC.

International Organization for Standardization. (2018). ISO 50001: Energy management systems — Requirements with guidance for use. ISO.

Martínez, J. P., & Torres, C. A. (2019). Energy consumption in academic institutions: Approaches and solutions for energy efficiency. *Journal of Environmental Management*, 48(7), 312–321. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2019.03.021>

Ministerio de Energía y Minas. (2023). Reporte de emisiones del sistema eléctrico peruano. MINEM.

Ministerio de Energía y Minas. (2023). Reporte tarifario y factores de emisión del sistema eléctrico peruano. MINEM.

Pal, P., Parvathy, A. K., Devabalaji, K. R., Antony, S. J., Ocheme, S., Babu, T. S., Alhelou, H. H., & Yuvaraj, T. (2021). IoT-based real-time energy management of virtual power plant using PLC for transactive energy framework. *IEEE Access*, 9, 97643–97660.
<https://doi.org/10.1109/ACCESS.2021.3093111>

Rathee, S., Goyal, A., & Shukla, A. (2020). Designing prepaid smart energy meter and deployment in a network. En *2020 IEEE 4th Information Technology, Networking, Electronic and Automation Control Conference (ITNEC)* (pp. 1208–1211). IEEE.
<https://doi.org/10.1109/ITNEC48623.2020.9084833>

Rodríguez, L. M., & Sánchez, M. D. (2020). Smart energy systems and the role of automation in energy savings. *Automation in Energy Systems*, 22(5), 76–82.
<https://doi.org/10.1109/ase.2020.0324>

Rodríguez, P. (2021). Integración de Raspberry Pi y PLC para la optimización energética en sistemas automatizados. *Revista de Ingeniería y Automatización*, 7(1), 80–88.

Rodríguez, P., & Sánchez, M. D. (2022). Integración de plataformas IoT en sistemas SCADA para entornos educativos. *Revista de Ingeniería y Automatización*, 8(2), 90–98.

Salodkar, P., Acharya, V., & Nabira, K. (2024). Implementation of a wireless energy monitoring and databasing system using PLC. En *2024 IEEE Third International Conference on Power Electronics, Intelligent Control and Energy Systems (ICPEICES)* (pp. 1041–1044). IEEE.
<https://doi.org/10.1109/ICPEICES62430.2024.10718865>

Sánchez, M. (2020). Aplicaciones de Raspberry Pi en sistemas de automatización industrial. *Journal of Industrial Automation*, 8(2), 90–98.

Vázquez, S., & Pérez, J. (2018). Raspberry Pi: A versatile tool for automation in sustainable energy projects. *IEEE Transactions on Industrial Applications*, 25(4), 66–74.
<https://doi.org/10.1109/IA.2018.1020207>

ANEXOS

Anexo 1. Cuestionario de recolección de datos

Objetivo: Recopilar información sobre el uso energético y ocupación de ambientes en la Escuela Profesional de Ingeniería de Sistemas – UNAMAD.

Sección A: Datos del Ambiente

- Nombre del ambiente: _____
- Tipo de uso: Aula Laboratorio Oficina Otro: _____
- Horario de funcionamiento: _____
- Número promedio de usuarios por día: _____

Sección B: Uso de Equipos Eléctricos

- ¿Qué dispositivos eléctricos se utilizan regularmente?
 Iluminación
 Ventilación
 Computadoras
 Proyectores
 Otros: _____
- ¿Se apagan los dispositivos al finalizar la jornada?
 Siempre A veces Nunca

Sección C: Percepción del Consumo Energético

- ¿Considera que el ambiente consume mucha energía?
 Sí No No sabe
- ¿Cree que un sistema automatizado podría mejorar el uso energético?
 Sí No No sabe

Anexo 2. Control de energía - Rapsberry

```
#!/usr/bin/env python3
import RPi.GPIO as GPIO
import minimalmodbus
import time
from pymodbus.client import ModbusTcpClient

# Configuración GPIO
GPIO.setmode(GPIO.BCM)
PIR_PIN = 17 # Pin GPIO para sensor PIR
GPIO.setup(PIR_PIN, GPIO.IN)

# Configuración Medidor de Energía SDM120 (Modbus RTU)
instrument = minimalmodbus.Instrument('/dev/ttyUSB0', 1)
instrument.serial.baudrate = 9600
instrument.serial.timeout = 1

# Conexión Modbus TCP al PLC Siemens S7-1200
plc_client = ModbusTcpClient('192.168.1.10')

def leer_energia():
    try:
        voltaje = instrument.read_float(0, functioncode=4)
        corriente = instrument.read_float(6, functioncode=4)
        potencia = instrument.read_float(12, functioncode=4)
        return voltaje, corriente, potencia
    except Exception as e:
        print(f"Error lectura Modbus: {e}")
        return 0, 0, 0
```

try:

while True:

Leer sensor PIR

ocupacion = GPIO.input(PIR_PIN)

Leer datos de energía

v, i, p = leer_energia()

Enviar comandos al PLC

plc_client.write_coil(0, ocupacion) # Dirección Q0.0 control luces

plc_client.write_register(1, int(p)) # Almacenar potencia en MW1

print(f"Ocupación: {ocupacion} | Potencia: {p:.2f} W")

time.sleep(1)

except KeyboardInterrupt:

print("\nDeteniendo sistema...")

finally:

GPIO.cleanup()

plc_client.close()

Anexo 3. Control iluminación – PLC

(Programa SCL para control de iluminación con TON *)*

VAR

LuzSalida : BOOL;

Pulsador : BOOL;

Temporizador : TON;

END_VAR

Temporizador(IN := Pulsador, PT := T#10s);

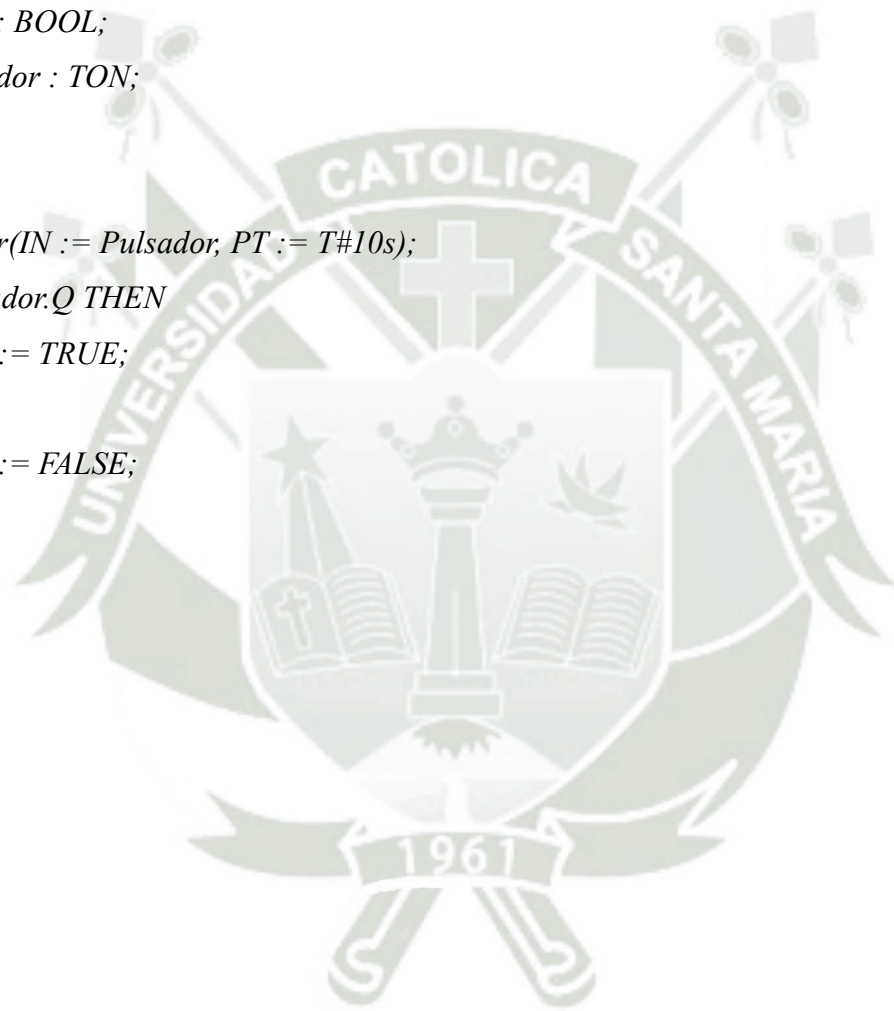
IF Temporizador.Q THEN

LuzSalida := TRUE;

ELSE

LuzSalida := FALSE;

END_IF;



Anexo 4. Control ventilación – PLC

(* Programa SCL para control de ventilación con temperatura *)

VAR

Temperatura : REAL;

PWM_Salida : INT;

END_VAR

IF Temperatura < 25.0 THEN

PWM_Salida := 0;

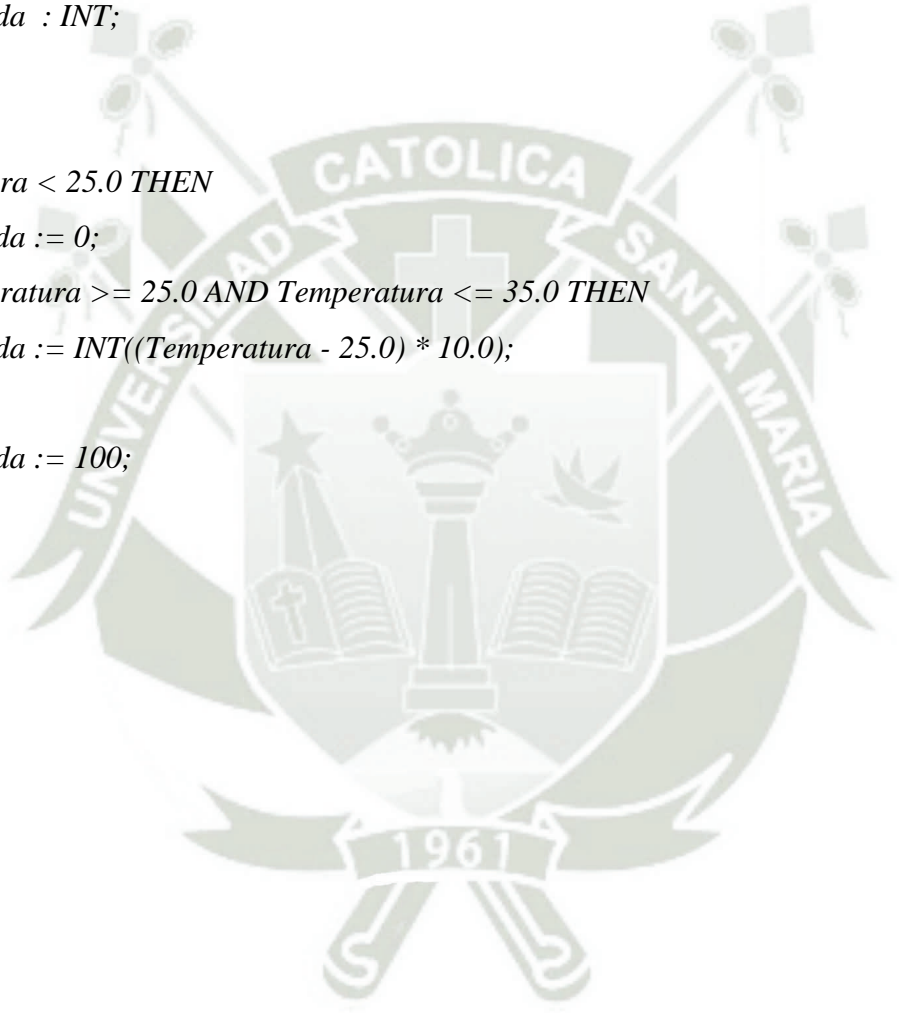
ELSIF Temperatura >= 25.0 AND Temperatura <= 35.0 THEN

PWM_Salida := INT((Temperatura - 25.0) * 10.0);

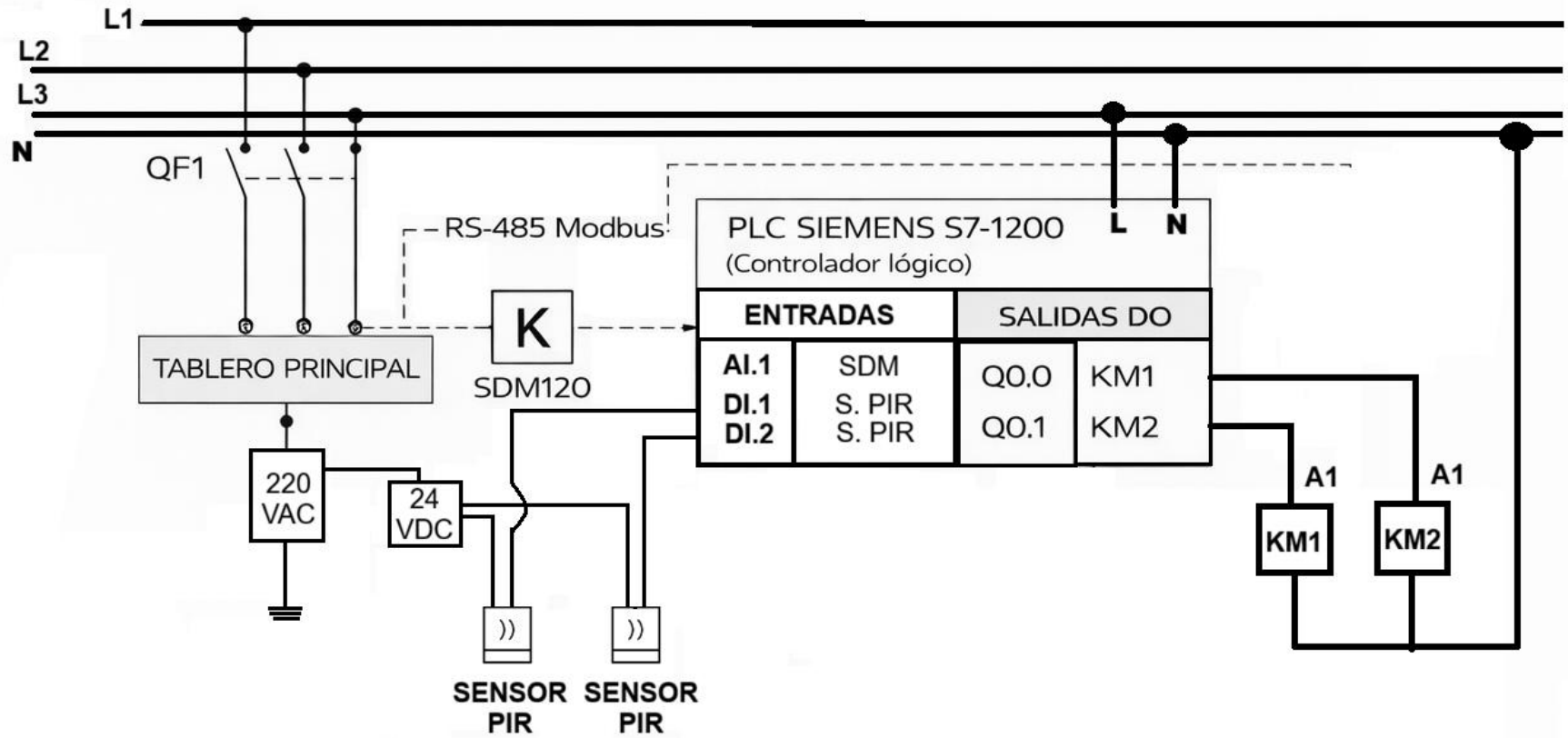
ELSE

PWM_Salida := 100;

END_I



Anexo 5. Diagrama multifilar de automatización energética



Anexo 7. Tablas de selección de componentes según VDI 2225

Matriz de enfrentamiento parte técnica

	C1	C2	C3	C8	C4	C7	C5	C6	C10	C9	Σ	Peso %
C1	–	1	1	1	1	1	1	1	1	1	9	20
C2	0	–	1	1	1	1	1	1	1	1	8	17.78
C3	0	0	–	1	1	1	1	1	1	1	7	15.56
C8	0	0	0	–	1	1	1	1	1	1	6	13.33
C4	0	0	0	0	–	1	1	1	1	1	5	11.11
C7	0	0	0	0	0	–	1	1	1	1	4	8.89
C5	0	0	0	0	0	0	–	1	1	1	3	6.67
C6	0	0	0	0	0	0	0	–	1	1	2	4.44
C10	0	0	0	0	0	0	0	0	–	1	1	2.22
C9	0	0	0	0	0	0	0	0	0	–	0	0

Matriz de enfrentamiento parte económica

	E1	E2	E3	E4	E5	Acumulado	Peso %
E1 Adquisición	—	0	0	1	1	2	20.00%
E2 Expansión	1	—	1	1	1	4	40.00%
E3 Integración	1	0	—	1	1	3	37.50%
E4 O&M	0	0	0	—	1	1	25.00%
E5 Riesgo	0	0	0	0	—	0	0.00%

Tabla de Evaluación económica según VDI 2225

Criterio Económico	Peso %	p(A1) Siemens	PxP	p(A2) Allen- Bradley	PxP	p(A3) Schneider	PxP
E2 Expansión (≥24 DO)	40%	3	1.20	3	1.2	4	1.6
E3 Integración	30%	4	1.20	3	0.9	3	0.9
E1 Adquisición	20%	3	0.60	2	0.4	4	0.8
E4 O&M	10%	4	0.40	3	0.3	3	0.3
TOTAL Económico	100%		3.40		2.80		3.60
Porcentaje sobre el ideal			85.00%		70.00%		90.00%

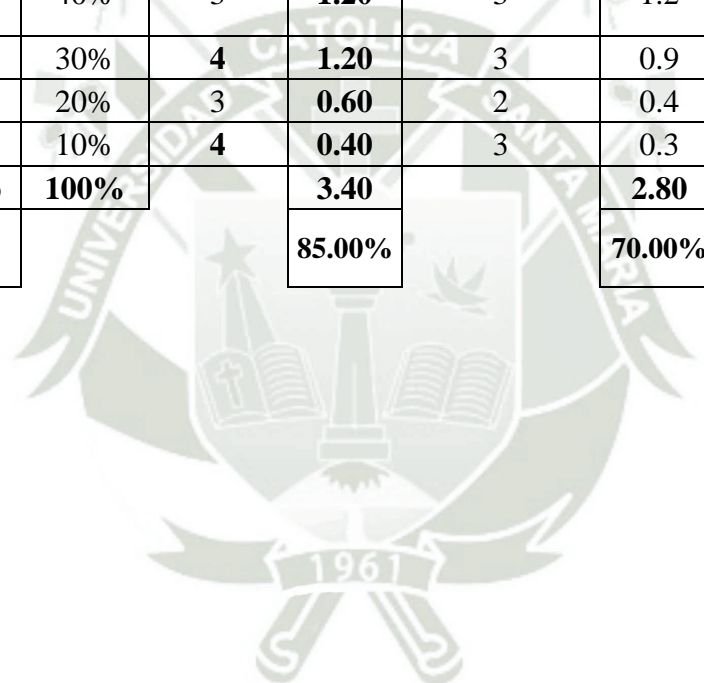
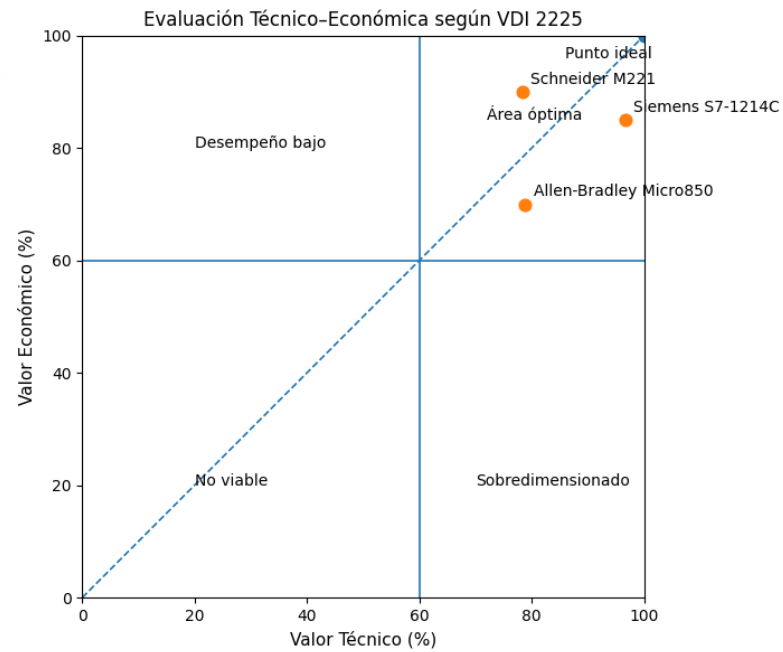


Tabla de Evaluación técnica según VDI 2225

Criterio	Peso %	Siemens S7-1214C	PxP	Allen-Bradley Micro850	PxP	Schneider M221	PxP
C1 Escalabilidad DI/DO	20.00%	4	0.8	3	0.6	3	0.6
C2 Comunicaciones	17.78%	4	0.7112	3	0.5334	3	0.5334
C3 Robustez 24/7	15.56%	4	0.6224	4	0.6224	3	0.4668
C8 Costo total (TCO)	13.33%	3	0.3999	3	0.3999	4	0.5332
C4 Diagnóstico	11.11%	4	0.4444	3	0.3333	3	0.3333
C7 Fail-safe	8.89%	4	0.3556	3	0.2667	3	0.2667
C5 Programación	6.67%	4	0.2668	3	0.2001	3	0.2001
C6 Integración supervisión	4.44%	4	0.1776	3	0.1332	3	0.1332
C10 Repuestos	2.22%	4	0.0888	3	0.0666	3	0.0666
TOTAL	100.00%		3.8667		3.1556		3.1333
Porcentaje sobre el ideal			96.67%		78.89%		78.33%

Tabla resumen

PLC	Técnico (%)	Económico (%)
Siemens S7-1214C	96.67%	85.00%
Allen-Bradley Micro850	78.89%	70.00%
Schneider M221	78.33%	90.00%



Anexo 8. Checklist instalación

Verificación	¿Cumple?	Observaciones
Tensión de operación 220 V		
Sistema de protección instalado (fusible + supresor)		
Raspberry Pi montada en caja estanca		
Conexión RS-485 correctamente cableada		
SDM120 entrega lectura válida en Node-RED		
MQTT envía notificación ante evento		
Personal capacitado recibió manual		



Anexo 9. Protocolo de replicación del sistema de automatización energética – UNAMAD

1. Evaluación Previa

Antes de replicar el sistema, es imprescindible realizar una **evaluación del sistema eléctrico existente** en la institución destino. Esta evaluación debe contemplar:

- **Tipo de red disponible:** monofásica / bifásica / trifásica.
- **Carga instalada** en kW.
- **Factor de potencia** (debe ser ≥ 0.9).
- **Nivel de pérdidas** en los circuitos (máx. 3% según CNE-UTN 010).
- **Disponibilidad de infraestructura de comunicación** (RS-485 o Ethernet TCP/IP).

2. Requerimientos Técnicos

Para implementar el sistema de manera estándar, se deben cumplir las siguientes condiciones mínimas:

Requisito	Valor mínimo	Normativa Aplicable
Tensión de operación	220 V AC $\pm 5\%$	CNE-UTN 010
Frecuencia	60 Hz	IEC 60038
Factor de potencia	≥ 0.9	IEEE 141
Cableado de señal	UTP STP CAT6 o equivalente	TIA/EIA-568-C.2
Protección eléctrica	Fusibles gG 10 A / Supresores II	IEC 60269 / IEC 61643-11
Acceso a red IP	IP fija o DHCP reservado	ISO/IEC 11801

3. Selección de Hardware

Se recomienda emplear los siguientes equipos, validados en la UNAMAD:

Componente	Modelo	Función principal
Controlador	Raspberry Pi 4B	Lógica de control y monitoreo vía Python
PLC	Siemens S7-1200	Control determinístico de cargas
Sensor de energía	SDM120 (Modbus RTU)	Medición activa de energía y corriente
Sensor de presencia	PIR HC-SR501	Activación inteligente de iluminación
Sensor térmico	Termopar Tipo K + MAX6675	Control proporcional de ventilación
Actuador	Relé SSR-40DA	Encendido/apagado de luminarias sin chispa
Variador	ABB ACS355	Control de velocidad de ventiladores
Comunicación	USB-RS485	Enlace Modbus RTU entre Pi ↔ PLC

4. Procedimiento de Instalación

4.1 Instalación del hardware

- Montaje de Raspberry Pi y PLC en rack DIN.
- Conexión del sensor SDM120 a red trifásica.
- Conexión de relés SSR a luminarias o ventiladores.
- Cableado según normas IEC 60364.

4.2 Configuración software

- Instalación de Node-RED, Python 3.9 y librerías (minimalmodbus, paho-mqtt).
- Configuración de dirección esclavo Modbus RTU.
- Carga del programa .scl al PLC desde TIA Portal V17.
- Prueba de comunicación con comandos básicos desde Raspberry.

5. Pruebas y Validación

Después de instalar el sistema, debe validarse su correcto funcionamiento con las siguientes pruebas:

Prueba realizada	Método de validación	Resultado Esperado
Comunicación Raspberry ↔ PLC	Lectura Modbus RTU con Python	Sin errores
Activación de relé por Node-RED	Salida digital activa	LED o luminaria enciende
Lectura de consumo desde SDM120	Registro Holding 0x0000	Valor numérico (>0)
Publicación MQTT	Mensaje MQTT recibido en broker local	"ALERTA: consumo elevado"
Corte programado de carga	Script Python con relé OFF	Carga se apaga

6. Documentación y Mantenimiento

Archivos a conservar:

- Código .py del sistema de control (control_energia.py)
- Programa del PLC en SCL (iluminacion.scl, ventilacion.scl)
- Flujos Node-RED (flows_monitoreo.json)
- Manual técnico (protocolo_replicacion.docx)
- Lista de verificación (checklist_instalacion.xlsx)

Mantenimiento sugerido:

Actividad	Frecuencia	Responsable
Limpieza de sensores	Trimestral	Técnico de planta
Verificación de relés	Semestral	Electricista calificado
Revisión de conexiones	Anual	Supervisión externa
Respaldo de scripts	Mensual	Técnico TIC

7. Normativa Aplicada

Este protocolo se basa en estándares reconocidos internacionalmente y lineamientos nacionales:

- **IEC 60364-8-1:** Eficiencia energética en instalaciones eléctricas.
- **IEEE 1459-2010:** Parámetros avanzados de calidad de energía.
- **ISO 50001:2018:** Sistemas de gestión energética.
- **CNE-UTN 010 (Perú):** Parámetros normativos de tensión, FP y pérdidas eléctricas.
- **TIA-485-A:** Especificaciones para redes RS-485 industriales

