



Pontificia Universidad
JAVERIANA
Cali

**Facultad de Ingeniería
y Ciencias**
Ingeniería Electrónica

MONOGRAFÍA DE TRABAJO DE GRADO

CoMo: Sistema de Control de Consumo de Energía para
Equipos en las Aulas de la Pontificia Universidad
Javeriana Cali

Diego Alejandro Ardila Penagos
Daniel Alejandro Chilito Arcila
Santiago Colorado Ochoa

Director

Dr. Eugenio Tamura Morimitsu

Codirector

Dr. Manuel Vicente Valencia Díaz

11 de febrero de 2026

Nota de Aceptación

Aprobado por el Comité de Trabajo de Grado en cumplimiento de los requisitos exigidos por la Pontificia Universidad Javeriana para optar al título de Ingeniero Electrónico.

Dr. Mateo López Victoria
Decano Facultad de Ingeniería y Ciencias

Dr. Luis Eduardo Tobón Llano
Director Carrera Ingeniería Electrónica



Dr. Eugenio Tamura Morimitsu
Director Trabajo de Grado

Dr. Manuel Vicente Valencia Díaz
Co-Director Trabajo de Grado

Dra. Ana Victoria Prados Arboleda
Jurado 1

Dr. Jaime Alberto Aguilar Zambrano
Jurado 2

Santiago de Cali, 11 de febrero de 2026

Señores
Pontificia Universidad Javeriana – Cali
Dr. Mateo López Victoria
Decano
Facultad de Ingeniería y Ciencias
Ciudad

Cordial Saludo.

Por medio de la presente nos permitimos presentarle el Trabajo de Grado titulado “CoMo: Sistema de Control de Consumo de Energía para Equipos en las Aulas de la Pontificia Universidad Javeriana Cali”.

Esperamos que este trabajo reúna todos los requisitos académicos, cumpla el propósito para el cual fue creado y sirva de apoyo para futuros proyectos relacionados con la materia.

Atentamente,

Diego Ardila
Diego Alejandro Ardila Penagos

Daniel Chilito
Daniel Alejandro Chilito Arcila

Santiago Colorado
Santiago Colorado Ochoa

Santiago de Cali, 11 de febrero de 2026

Señores

Pontificia Universidad Javeriana – Cali

Dr. Mateo López Victoria

Decano

Facultad de Ingeniería y Ciencias

Ciudad

Cordial Saludo.

Certificamos que el presente Trabajo de Grado titulado “CoMo: Sistema de Control de Consumo de Energía para Equipos en las Aulas de la Pontificia Universidad Javeriana Cali”, realizado por Diego Alejandro Ardila Penagos, Daniel Alejandro Chilito Arcila y Santiago Colorado Ochoa, estudiantes de Ingeniería Electrónica, se encuentra terminado y puede ser presentado para su sustentación.

Atentamente,



Dr. Eugenio Tamura Morimitsu
Director Trabajo de Grado

Dr. Manuel Vicente Valencia Díaz
Co-Director Trabajo de Grado

Resumen

Resumen

Actualmente, en la Pontificia Universidad Javeriana Cali, el consumo innecesario de energía en las aulas representa un desafío económico y ambiental. Esto se debe a la ausencia de un sistema de control que habilite el uso de los equipos (computador, proyector, iluminación, etc.) únicamente en los horarios programados; en consecuencia, los dispositivos permanecen encendidos cuando no se requieren o se emplean en actividades no académicas.

En este trabajo se diseñó, implementó y evaluó CoMo, un sistema IoT que controla el encendido y apagado de cargas en aula de acuerdo con las reservas académicas institucionales, incorporando autenticación mediante RFID, actuación mediante relés y registro continuo de variables eléctricas a través de nodos ESP8266 y una base de datos MySQL. La evaluación se realizó mediante un diseño antes–después, consolidando un mes de mediciones de línea base (*Before*) y un mes posterior a la implementación del sistema (*After*), con trazabilidad temporal a nivel de dispositivo y aula.

Los resultados evidenciaron una reducción del consumo energético asociado a periodos sin reserva, siendo la energía fuera de reservas la métrica principal para cuantificar el impacto del sistema. Adicionalmente, el sistema registró eventos de acceso y operación coherentes con la programación académica, mejorando la supervisión del uso de los equipos y habilitando análisis reproducibles en Power BI para apoyar la gestión energética.

Se concluye que CoMo es técnicamente viable y efectivo para reducir el consumo no programado en aulas, al tiempo que fortalece la trazabilidad del uso de equipos. Los hallazgos sugieren que su adopción a mayor escala puede contribuir a la eficiencia operativa y a los objetivos institucionales de sostenibilidad.

Abstract

Currently, at the Pontificia Universidad Javeriana Cali, unnecessary energy consumption in classrooms represents an economic and environmental challenge. This situation arises from the absence of a control system that enables the use of classroom equipment (computer, projector, lighting, etc.) exclusively during scheduled academic periods; as a result, devices remain powered on when they are not required or are used for non-academic activities.

In this work, was designed, implemented, and evaluated as an IoT-based system that controls the switching of classroom electrical loads according to institutional academic reservations. The system integrates RFID-based authentication, relay-based actuation, and continuous electrical variable monitoring through ESP8266 nodes and a MySQL database. The evaluation followed a before–after experimental design, consolidating one month of baseline measurements (*Before*) and one month after system deployment (*After*), with temporal traceability at the device and classroom levels.

The results showed a reduction in energy consumption associated with periods without active reservations, with off-reservation energy identified as the primary metric to quantify the system impact. Additionally, the system recorded access and operation events consistent with the academic schedule, improving equipment usage supervision and enabling reproducible analyses in Power BI to support energy management.

It is concluded that is technically viable and effective for reducing unscheduled energy consumption in classrooms, while strengthening equipment usage traceability. These findings suggest that its adoption at a larger scale could contribute to operational efficiency and institutional sustainability objectives.

Índice general

1. Introducción	1
2. Planteamiento del Problema	3
2.1. Formulación	3
2.2. Sistematización	3
3. Justificación	5
3.1. Delimitaciones	5
3.2. Alcances	6
3.3. Entregables	6
4. Objetivos	7
4.1. Objetivo General	7
4.2. Objetivos Específicos	7
5. Marco de Referencia	9
5.1. Áreas Temáticas	9
5.2. Marco Teórico	9
5.2.1. Sistemas de Control para el Ahorro de Energía	9
5.2.2. RS-232	10
5.2.3. Base de Datos y Servidores	10
5.2.4. Redes Inalámbricas	11
5.2.5. RFID	11
5.2.6. Microcontrolador	14
5.2.7. Resistencia <i>pull-up</i>	15
5.2.8. Relés	16
5.2.9. Sensor de Efecto Hall	16
5.2.10. Protocolos HTTP y servicios web	17
5.2.11. Servidor web Apache, XAMPP y MySQL	18
5.2.12. Redes locales virtuales (VLAN)	19
5.3. Normas y Estándares Relevantes	20
5.3.1. IEC 60950-1	20
5.3.2. IEC 60364	20
5.4. Trabajos Relacionados	20

6. Materiales y Métodos	23
6.1. Diseño Metodológico	23
6.1.1. Ámbito, población y muestra	23
6.1.2. Criterios de inclusión y exclusión	24
6.1.3. Arquitectura general del sistema Iot CoMo	24
6.1.4. Subsistemas de hardware	28
6.1.5. Consumo eléctrico de los módulos electrónicos	47
6.1.6. Backend web, base de datos y APIs	49
6.1.7. Procedimiento	56
6.1.8. Plan de pruebas	59
6.1.9. Procesamiento de datos y cálculo de energía	61
6.1.10. Variables e indicadores	63
6.1.11. Plan de análisis	65
6.1.12. Gestión de datos, análisis y reproducibilidad	66
6.1.13. Consideraciones éticas y permisos	68
7. Resultados y Discusión	71
7.1. Resultados y discusión	71
7.1.1. Descripción general del conjunto de datos	71
7.1.2. Análisis global del consumo energético antes y después del sistema CoMo	74
7.1.3. Análisis desagregado por aula y por dispositivo	77
7.1.4. Descomposición del consumo energético durante y fuera de reservas (métrica principal)	89
7.1.5. Porcentaje de energía fuera de reservas y contribución por tipo de carga	94
8. Conclusiones	97
8.1. Conclusiones	97
9. Anexos	99
9.1. Esquema de escalabilidad del sistema CoMo	99
9.2. Documentación del Proyecto de Integración Profesional (PIP) “CoMo: Consumo Moderado”	100
9.3. Visualización interactiva de datos	101
Bibliografía	103

Índice de figuras

5.1. Terminales RS-232. [1]	10
5.2. Arquitectura WiFi. [2]	11
5.3. Esquema de comunicación RFID. [3]	12
5.4. Transpondedor y lector. [3]	12
5.5. Esquema RFID activo y semipasivo. [3]	13
5.6. Esquema RFID pasivo. [3]	13
5.7. ESP8266 (Wemos D1 Mini).	15
5.8. Esquema típico de entrada digital con resistencia <i>pull-up</i> y pulsador/final de carrera (contacto normalmente abierto) hacia GND [4].	15
5.9. Relé magnético. [5]	16
5.10. Sensor de corriente simple. [6]	17
5.11. Esquema básico de comunicación HTTP entre cliente y servidor [7].	18
5.12. Esquema de interacción entre Apache–PHP–MySQL. [8]	19
5.13. Ejemplo de segmentación lógica de una red física mediante VLANs.[9]	19
6.1. Diagrama de flujo del ciclo principal de autenticación RFID y control de relés en el aula.	27
6.2. Esquema eléctrico del nodo de autenticación RFID basado en un microcontrolador ESP8266, lector MFRC522, pantalla OLED y buzzer.	29
6.3. Esquemático de la versión inicial del módulo RFID, donde se evidencian las conexiones originales del final de carrera (<i>Carrera</i>) y del buzzer.	30
6.4. PCB en su versión inicial, tal como se recibió del servicio de fabricación.	31
6.5. PCB con modificaciones aplicadas mediante retrabajo (<i>rework</i>).	32
6.6. Render del diseño inicial del PCB.	33
6.7. Diseño mecánico del encapsulado del nodo RFID (vista explotada): 1. Carcasa del dispositivo. 2. Soporte para PCB del lector. 3. Apertura para la pantalla OLED. 4. Ranura para el sensor final de carrera. 5. Tapa de la carcasa. 6. Ranura para tarjeta RFID. 7. Soporte módulo RFID RC522. 8. Soporte para el sensor final de carrera. 9. “Rampa” para el sensor final de carrera.	34
6.8. Nodo RFID ensamblado en su encapsulado final (fotografía real).	35
6.9. Vista interna del encapsulado y disposición de módulos (ESP8266, RC522, OLED y cableado) (fotografía real).	36
6.11. Esquema eléctrico del nodo de medición de corriente basado en un ESP8266 y el sensor de efecto Hall ACS712-20A–20A, conectado en serie con la carga.	36
6.10. Ubicación del nodo RFID en el aula y condición de montaje durante operación (fotografía real).	37

6.12. Nodo de medición de corriente con sensor ACS712-20A instalado en el aula (fotografía real).	38
6.13. Esquema eléctrico del nodo de actuación: microcontrolador ESP8266, módulo de relé y conexión de la carga a la red de 120 V.	41
6.14. Módulo de actuación basado en ESP8266 y relés, ensamblado e instalado en aula (fotografía real).	42
6.15. Diagrama de flujo del servicio local de apagado coordinado entre el PC y el video-beam, basado en la comunicación serial con el nodo ESP8266.	46
6.16. Arquitectura general de comunicación entre los nodos IoT instalados en el aula y el servidor XAMPP.	50
6.17. Interfaz web para el control centralizado de los dispositivos en cada salón.	56
7.1. Energía total agregada (kWh) por tipo de dispositivo para los escenarios <i>Before</i> y <i>After</i> (todas las aulas).	75
7.2. Consumo energético promedio diario (kWh) por día de la semana para los escenarios <i>Before</i> y <i>After</i> (todas las aulas).	76
7.3. Perfil de consumo del lunes en el escenario <i>Before</i> (CR4.1).	79
7.4. Perfil de consumo del lunes en el escenario <i>After</i> (CR4.1).	80
7.5. Perfil de consumo del martes en el escenario <i>Before</i> (CR4.2).	81
7.6. Perfil de consumo del martes en el escenario <i>After</i> (CR4.2).	82
7.7. Perfil de consumo del miércoles en el escenario <i>Before</i> (CR4.2).	83
7.8. Perfil de consumo del miércoles en el escenario <i>After</i> (CR4.2).	84
7.9. Perfil de consumo del jueves en el escenario <i>Before</i> (CR4.1).	86
7.10. Perfil de consumo del jueves en el escenario <i>After</i> (CR4.3).	87
7.11. Perfil de consumo del viernes en el escenario <i>Before</i> (CR4.3).	88
7.12. Perfil de consumo del viernes en el escenario <i>After</i> (CR4.3).	89
7.13. Consumo energético total (kWh) desagregado en periodos <i>durante</i> y <i>fuera</i> de reservas para los escenarios <i>Before</i> y <i>After</i> (todas las aulas y dispositivos).	90
7.14. Indicadores de consumo fuera de reservas para el escenario <i>Before</i> : porcentaje fuera de reservas, energía fuera de reservas (kWh) y costo fuera de reservas (COP).	91
7.15. Indicadores de consumo fuera de reservas para el escenario <i>After</i> : porcentaje fuera de reservas, energía fuera de reservas (kWh) y costo fuera de reservas (COP).	92
7.16. Porcentaje de energía consumida fuera de reservas respecto al consumo total, para los escenarios <i>Before</i> y <i>After</i>	94
7.17. Energía consumida fuera de reservas (kWh) por tipo de carga (PC, video-beam e iluminación) para los escenarios <i>Before</i> y <i>After</i>	95

Índice de cuadros

6.1. Consumo típico de corriente de los dispositivos usados en CoMo.	48
6.2. Ejemplo de tabla de consumo eléctrico almacenada en la base de datos del sistema. .	52
6.3. Estructura de la tabla de reservas académicas institucionales	53
6.4. Registros del sistema RFID almacenados en la base de datos.	54
6.5. Operacionalización conceptual de las variables e indicadores del estudio.	64
7.1. Programación académica del aula CR4.1 en un día representativo del escenario <i>Before</i> .	72
7.2. Programación académica del aula CR4.1 en un día representativo del escenario <i>After</i> .	72
7.3. Programación académica del aula CR4.2 en un día representativo del escenario <i>Before</i> .	73
7.4. Programación académica del aula CR4.2 en un día representativo del escenario <i>After</i> .	73
7.5. Programación académica del aula CR4.3 en un día representativo del escenario <i>Before</i> .	73
7.6. Programación académica del aula CR4.3 en un día representativo del escenario <i>After</i> .	74
7.7. Reservas académicas del lunes en el escenario <i>Before</i> (CR4.1).	77
7.8. Reservas académicas del lunes en el escenario <i>After</i> (CR4.1).	78
7.9. Reservas académicas del martes en el escenario <i>Before</i> (CR4.2).	80
7.10. Reservas académicas del martes en el escenario <i>After</i> (CR4.2).	81
7.11. Reservas académicas del miércoles en el escenario <i>Before</i> (CR4.2).	82
7.12. Reservas académicas del miércoles en el escenario <i>After</i> (CR4.2).	83
7.13. Reservas académicas del jueves en el escenario <i>Before</i> (CR4.1).	85
7.14. Reservas académicas del jueves en el escenario <i>After</i> (CR4.3).	85
7.15. Reservas académicas del viernes en el escenario <i>Before</i> (CR4.3).	87
7.16. Reservas académicas del viernes en el escenario <i>After</i> (CR4.3).	88

Introducción

En la actualidad, el uso eficiente de la energía es una preocupación global, especialmente en entornos de alto consumo como el sector educativo. En la Pontificia Universidad Javeriana Cali, dispositivos como proyectores, computadores, iluminación y climatización permanecen encendidos fuera de los horarios académicos, lo que incrementa los costos operativos y afecta los objetivos institucionales de sostenibilidad.

El problema que aborda este proyecto es evitar el consumo innecesario de energía en aulas debido a la ausencia de un sistema automatizado que gestione el encendido y apagado de los equipos según las reservas de uso de los espacios.

Como antecedente institucional, el Centro de Servicios Informáticos (CSI) implementó previamente una iniciativa de ahorro energético en el edificio Cedro Rosado orientada al control de dispositivos en aulas. Aunque se dispuso infraestructura física asociada a automatización, la iniciativa no se mantuvo operativa en el tiempo, en parte por limitaciones de documentación y lineamientos de operación y mantenimiento. En este contexto, el presente trabajo retoma aprendizajes de dicha experiencia y aprovecha elementos de infraestructura existente para implementar una nueva solución.

Adicionalmente, en el Proyecto de Integración Profesional “CoMo: Consumo Moderado” se desarrolló un prototipo inicial para controlar estos dispositivos en un aula piloto. Los entregables y documentación complementaria de dicho proyecto se encuentran disponibles para consulta en el Anexo 9.2. No obstante, se requiere optimizar y escalar el sistema para integrarlo con la infraestructura institucional y permitir su implementación en múltiples aulas.

La relevancia de resolver este problema es tanto económica como ambiental. Los avances en automatización permiten desarrollar soluciones prácticas para optimizar el consumo energético en espacios educativos, reduciendo costos operativos y contribuyendo a la sostenibilidad. Asimismo, el proyecto puede impactar a la comunidad educativa al promover el uso responsable de la energía y mejorar la gestión de los recursos.

Este trabajo propone la implementación de un sistema automatizado, diseñado a partir del prototipo inicial y adaptado para operar en múltiples aulas, integrando tecnologías IoT con la infraestructura de la universidad. Además, el sistema recopila datos de consumo energético que podrán utilizarse en análisis posteriores y en el diseño de estrategias institucionales de eficiencia energética.

Planteamiento del Problema

La Oficina de Recursos Físicos de la Pontificia Universidad Javeriana Cali, identificó un problema con el consumo innecesario de energía en las aulas de clase. El problema se manifiesta particularmente en el consumo desmedido de dispositivos como proyectores, computadores, luces y sistemas de climatización los cuales presentan un uso inadecuado, permanecen encendidos en las aulas incluso cuando no hay actividades académicas o culturales. Esta situación no solo genera costos elevados relacionados al consumo eléctrico, sino que también impacta negativamente en la sostenibilidad de la universidad.

Esta problemática se abordó en el Proyecto de Integración Profesional titulado “CoMo: Consumo Moderado”[10]. En este proyecto se seleccionó un aula para pruebas piloto, se identificaron patrones de uso que se extienden más allá del horario de clases programado, y que de ser corregidos se estima un ahorro representativo en el consumo de energía.

2.1. Formulación

¿Cómo implementar un sistema automatizado de control de dispositivos electrónicos en las aulas de clase de la Pontificia Universidad Javeriana Cali mientras se realiza el almacenamiento y análisis de datos para evaluar el consumo energético antes y después de su instalación?

2.2. Sistematización

- ¿Cómo se puede recopilar y analizar los datos de consumo energético actuales en las aulas?
- ¿Cómo se puede implementar una base de datos que permita gestionar las reservas de las aulas y su integración con el sistema de control automatizado?
- ¿Cómo se puede controlar el acceso y uso de los dispositivos electrónicos en las aulas?
- ¿Cómo se puede recopilar y analizar los datos de consumo energético posteriores a la instalación del sistema?
- ¿Cómo se puede escalar el sistema a otros salones y edificios dentro de la universidad?

Justificación

El proyecto “CoMo” (**Consumo Moderado**) se plantea como una solución innovadora para abordar el consumo innecesario de energía en las aulas de la *Pontificia Universidad Javeriana Cali*. Este problema no solo incrementa los costos operativos de la institución, sino que también afecta negativamente sus esfuerzos por adoptar prácticas sostenibles, esenciales en un contexto global donde la eficiencia energética y la sostenibilidad son prioridades.

El control automatizado del consumo energético podría no solo disminuir los costos, sino que también podría contribuir a los objetivos de sostenibilidad ambiental de la universidad, alineándose con metas globales como los Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS), específicamente el ODS 11 (Ciudades y Comunidades Sostenibles).

El sistema propuesto tiene como objetivo automatizar el control de dispositivos electrónicos en las aulas, permitiendo el apagado de equipos en momentos en los que no estén siendo utilizados. Además, el proyecto permitirá evaluar cómo una gestión automatizada podría influir en el uso más eficiente de los recursos académicos y tecnológicos de la universidad.

Finalmente, la iniciativa refuerza el compromiso institucional de la Pontificia Universidad Javeriana Cali con la sostenibilidad y la tecnología. En un entorno educativo, proyectos como CoMo demuestran liderazgo en la adopción de tecnologías verdes

3.1. Delimitaciones

- **Ámbito de Implementación:** El sistema automatizado de control de energía se implementará inicialmente en tres aulas del edificio Cedro Rosado de la Pontificia Universidad Javeriana Cali. La expansión a otros edificios o campus no será parte de la fase inicial del proyecto.
- **Alcance Tecnológico:** El proyecto se centrará en la automatización del control de equipos eléctricos específicos, como proyectores, computadoras, luces y sistemas de climatización. No se abordará el control de otros dispositivos o sistemas externos a estos equipos, como redes de suministro eléctrico a gran escala.
- **Identificación de Usuarios:** La identificación de usuarios mediante carnets será la principal tecnología utilizada. No se incluirán en esta fase otras tecnologías de identificación, como usuario universitario.
- **Recursos Financieros y Humanos:** El proyecto estará restringido por el presupuesto y los recursos humanos disponibles dentro de la universidad. No se prevé la contratación de personal externo ni la adquisición de equipos o tecnologías que excedan los recursos asignados para esta fase del proyecto.

- **Estudio de Consumo Energético:** El análisis del consumo energético se realizará con el propósito de comparar los datos previos y posteriores a la implementación del sistema. Sin embargo, el objetivo principal del proyecto no es reducir el consumo energético, sino automatizar el control de los dispositivos y generar datos que permitan evaluar su viabilidad y posible impacto en el futuro.

3.2. Alcances

- **Automatización del Control de Dispositivos:** El proyecto se enfocará en diseñar e implementar un sistema automatizado que permita gestionar el encendido y apagado de dispositivos electrónicos en las aulas seleccionadas.
- **Pruebas Piloto:** Se realizarán pruebas piloto en las aulas de un edificio de la Pontificia Universidad Javeriana Cali para evaluar la efectividad del sistema y ajustar su funcionamiento.
- **Esquema de escalabilidad:** Aunque la implementación inicial está limitada a un solo edificio, se considerarán recomendaciones para realizar un esquema de escalabilidad futura del sistema a otros edificios del campus.
- **Recopilación y análisis de Datos:** Se recopilarán y analizarán datos energéticos antes y después de la implementación del sistema para evaluar su desempeño, sin que esto implique un compromiso con la reducción del consumo energético.
- **Evaluación y Ajustes:** Se establecerán métricas para evaluar el desempeño del sistema durante las pruebas piloto, permitiendo realizar ajustes y optimizaciones basadas en los resultados obtenidos.

3.3. Entregables

- **Sistema Automatizado de Control de Energía Operativo:** Un sistema funcional implementado en las aulas de un edificio de la Pontificia Universidad Javeriana Cali, capaz de gestionar el encendido y apagado de dispositivos electrónicos de manera automatizada, basado en la identificación de usuarios y la base de datos de reservas de cada salón.

Los elementos a continuación estarán incluidos en el documento de trabajo de grado.

- **Informe Técnico:** Especificación del diseño, desarrollo e implementación del sistema. Diagramas de arquitectura y configuraciones utilizadas
- **Resultados de las Pruebas Piloto:** Informe que presenta los datos obtenidos durante las pruebas piloto, incluyendo análisis del consumo energético antes y después de la implementación, con el objetivo de evaluar el desempeño del sistema.
- **Esquema de Escalabilidad:** Esquema que describa cómo el sistema puede ser escalado a otros salones y edificios dentro de la universidad.

Objetivos

4.1. Objetivo General

Desarrollar un sistema automatizado de control de dispositivos electrónicos en las aulas de clase de la Pontificia Universidad Javeriana Cali, acompañado de un proceso de almacenamiento y análisis de datos que permita evaluar el consumo energético antes y después de su instalación.

4.2. Objetivos Específicos

- Recopilar y analizar datos de consumo energético actuales en las aulas seleccionadas.
- Crear e integrar una base de datos que permita gestionar las reservas de las aulas y sincronizar esta información con el sistema.
- Diseñar un mecanismo de control para gestionar el acceso y uso de los dispositivos electrónicos en las aulas, garantizando la autorización de los usuarios y el cumplimiento de los horarios establecidos.
- Recolectar y analizar datos de consumo energético posteriores a la instalación del sistema, para estimar su viabilidad en la reducción del consumo energético.
- Establecer un esquema de escalabilidad que permita adaptar e implementar el sistema en otros salones y edificios de la universidad, considerando las necesidades y recursos disponibles.

Marco de Referencia

5.1. Áreas Temáticas

De acuerdo con la taxonomía IEEE, el proyecto se relaciona con las siguientes áreas temáticas:

- Computers and information processing – Software – Embedded software
- Computers and information processing – Communications – Wireless communication
- Communications, networking, and broadcasting – Internet of Things – IoT applications
- Signal processing and analysis – Data analysis – Data processing
- Computers and information processing – Cloud computing – Cloud services
- Power, energy, and industry applications – Energy efficiency – Power management
- Automation and control systems – Control applications – Building automation
- Computers and information processing – Human-computer interaction – User interfaces
- Components, circuits, devices, and systems – Sensors – Sensor applications
- Computers and information processing – Software – Application software

5.2. Marco Teórico

5.2.1. Sistemas de Control para el Ahorro de Energía

Un sistema de control es un conjunto de componentes que regulan y gestionan el comportamiento de otros sistemas mediante la manipulación de sus variables de entrada para lograr un estado deseado en sus salidas. En el contexto del ahorro energético, estos sistemas se diseñan específicamente para reducir el consumo de energía sin comprometer el rendimiento o la funcionalidad de los dispositivos controlados, ya sea cortando la alimentación de los equipos o evitando condiciones de operación que impliquen pérdidas innecesarias.

Los sistemas de control pueden clasificarse en sistemas de lazo abierto, que no utilizan retroalimentación, y sistemas de lazo cerrado, que emplean retroalimentación para ajustar continuamente sus operaciones. Un **sistema de lazo abierto** es aquel en el que la salida no se utiliza para influir

en la entrada; el sistema opera con base en una secuencia predefinida de acciones. Un **sistema de lazo cerrado**, por el contrario, utiliza información de la salida para comparar el estado actual con una referencia deseada y ajustar las entradas, de manera que se corrijan desviaciones y se mantenga el comportamiento especificado.

5.2.2. RS-232

EIA RS-232 es un conjunto de estándares del nivel físico de acuerdo con la terminología OSI (nivel 1) para la conexión entre dispositivos de terminal de datos (DTE) y dispositivos de comunicación de datos (DCE), con velocidades de hasta 20 kbit/s. Originalmente, este estándar fue desarrollado para enlazar un ordenador con un módem; sin embargo, su aceptación generalizada ha llevado a su implementación en una amplia variedad de dispositivos industriales y domésticos. A pesar de que este tipo de interfaz física ha caído en desuso debido a la aparición de nuevos estándares de alta velocidad, como USB y FireWire, los principios subyacentes de RS-232 siguen siendo relevantes en múltiples aplicaciones, entre ellas el control de proyectores y otros equipos audiovisuales. Esta norma permite la transmisión de datos de manera serie, tanto asíncrona como síncrona, entre diferentes equipos.[11]

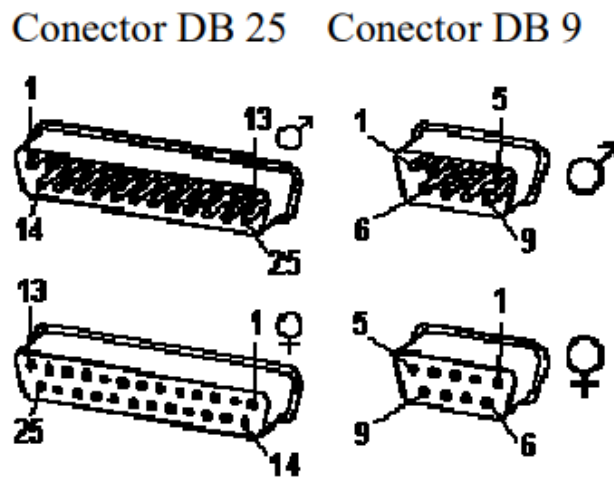


Figura 5.1: Terminales RS-232. [1]

5.2.3. Base de Datos y Servidores

Una base de datos es un conjunto de elementos de datos interrelacionados, administrados como una unidad lógica. Esta definición es intencionalmente amplia, ya que los enfoques de modelado, implementación y optimización varían entre los diferentes proveedores de software. En el contexto de bases de datos, un *servidor* se refiere a un sistema informático que proporciona servicios de almacenamiento, gestión y recuperación de datos a otros programas o dispositivos, conocidos como clientes. Este servidor ejecuta un sistema de gestión de bases de datos (*Database Management*

System, DBMS) y es responsable de manejar las solicitudes de acceso y manipulación de datos que provienen de los clientes.[12]

En el proyecto desarrollado, la base de datos se implementa en un servidor SQL alojado en una máquina virtual, donde se almacena la información asociada a reservas de aulas, eventos de encendido y apagado de equipos, y registros de consumo energético, lo que facilita su posterior análisis.

5.2.4. Redes Inalámbricas

Las redes inalámbricas son un pilar en la Industria 4.0 y en el Internet de las Cosas (IoT), al permitir la conexión de dispositivos sin la necesidad de cables físicos y facilitar la comunicación entre sensores, actuadores y sistemas centrales de monitoreo. Tecnologías como Wi-Fi, Bluetooth, Zigbee y LoRa son ampliamente utilizadas en entornos de IoT, cada una con características específicas en términos de alcance, consumo de energía, velocidad de transmisión y complejidad de implementación.

Wi-Fi

La expresión “Wi-Fi” es la abreviatura de “Wireless Fidelity”. Se emplea como un término genérico para referirse a dispositivos que utilizan alguna variante de la familia de normas inalámbricas IEEE 802.11, las cuales permiten establecer redes de área local inalámbricas (WLAN). Originalmente, “Wi-Fi” se aplicaba exclusivamente a los dispositivos que operaban con la tecnología 802.11b, que utiliza la banda de frecuencia de 2.4 GHz y permite la transmisión de datos a velocidades de hasta 11 Mbps. Para evitar confusiones sobre la compatibilidad de dispositivos y la interoperabilidad de las redes, el término se amplió para incluir todos los equipos que utilizan la familia de estándares IEEE 802.11, como 802.11a, 802.11b y 802.11g, entre otros.[13]

En el contexto de este proyecto, se emplea exclusivamente Wi-Fi conforme a la familia IEEE 802.11 para conectar los microcontroladores ESP8266 con el servidor institucional, aprovechando la infraestructura de red existente en el campus.

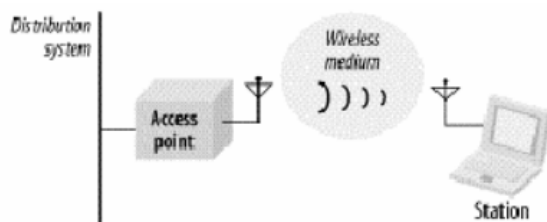


Figura 5.2: Arquitectura WiFi. [2]

5.2.5. RFID

La tecnología RFID (*Radio Frequency Identification*) es un método de identificación y seguimiento de objetos, animales o personas mediante el uso de ondas de radio. A diferencia de los códigos de barras, RFID no requiere contacto visual para la lectura, lo que la convierte en una herramienta robusta para aplicaciones de control de acceso y trazabilidad. Un sistema RFID consta siempre

de dos partes principales: el *transpondedor*, que se coloca en el objeto a identificar, y el *lector* o interrogador, que puede funcionar solo en modo lectura o en lectura/escritura según su diseño y la tecnología aplicada.[3]

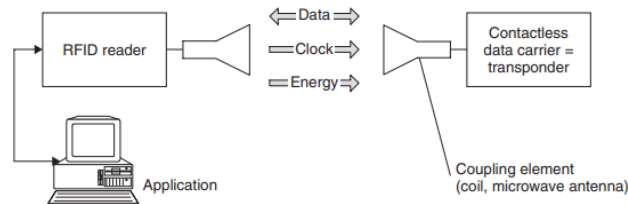


Figura 5.3: Esquema de comunicación RFID. [3]

El lector generalmente incluye un módulo de radiofrecuencia (transmisor y receptor), una unidad de control y un elemento de acoplamiento que se comunica con el transpondedor. Además, muchos lectores cuentan con una interfaz adicional (como RS-232, RS-485, etc.) que les permite transferir los datos recibidos a otro sistema, por ejemplo un computador personal o un sistema de control embebido.

Por otro lado, el transpondedor, que es el dispositivo que almacena los datos en un sistema RFID, suele estar compuesto por un elemento de acoplamiento y un microchip electrónico. Este dispositivo es normalmente pasivo, ya que no dispone de su propia fuente de alimentación (batería), y solo se activa cuando entra en la zona de alcance del lector. La energía necesaria para su activación, así como los pulsos de sincronización y los datos, llegan al transpondedor sin contacto, a través de la unidad de acoplamiento.[3]

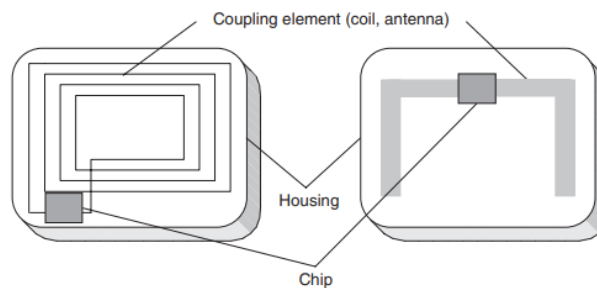


Figura 5.4: Transpondedor y lector. [3]

Tipos de etiquetas RFID

Las etiquetas RFID pueden ser activas o pasivas:

- **Etiquetas RFID activas:** contienen su propia fuente de energía, lo que les permite enviar datos a distancias superiores a los 100 metros.

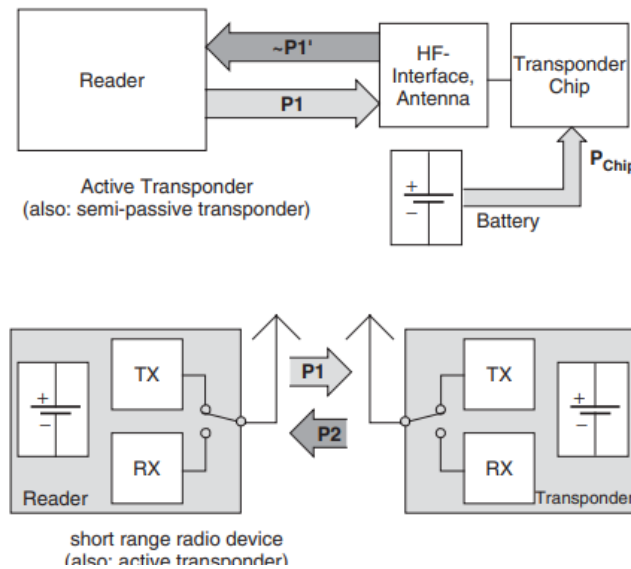


Figura 5.5: Esquema RFID activo y semipasivo. [3]

- **Etiquetas RFID pasivas:** no poseen fuente de energía propia; se alimentan de la energía electromagnética transmitida por el lector RFID. La energía transmitida debe ser lo suficientemente alta para alimentar las etiquetas, permitiéndoles enviar datos a una distancia de hasta aproximadamente 15 metros.

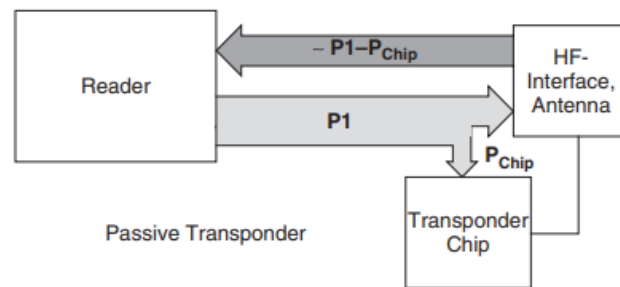


Figura 5.6: Esquema RFID pasivo. [3]

Rangos de frecuencia

Las etiquetas RFID pasivas operan principalmente en tres rangos de frecuencia:

- **Frecuencia baja (LF):** 125–134 kHz.
- **Frecuencia alta (HF):** 13.56 MHz.
- **Frecuencia ultra alta (UHF):** 856 a 960 MHz.

Mecanismo de acoplamiento RFID

El acoplamiento entre la etiqueta RFID y el lector se conoce como mecanismo de acoplamiento RFID. La forma de acoplamiento depende de la aplicación prevista y afecta la frecuencia del sistema. Las principales técnicas de acoplamiento son:

- **Acoplamiento por retrodispersión:** utiliza la energía de RF transmitida por el lector para energizar la etiqueta. La etiqueta refleja parte de la energía transmitida, modulando la reflexión para enviar información de vuelta al lector. Este tipo de acoplamiento suele utilizar bandas UHF.
- **Acoplamiento inductivo:** transfiere energía del lector a la etiqueta mediante la inductancia mutua entre ambas bobinas. Para utilizar este tipo de acoplamiento, tanto la etiqueta como el lector deben tener bobinas de inducción o antenas. Cuando la etiqueta se coloca lo suficientemente cerca del lector, el campo generado se acopla a la bobina de la etiqueta, induciendo un voltaje que se rectifica y se utiliza para alimentar los circuitos de la etiqueta. Este tipo de acoplamiento normalmente utiliza LF o HF.
- **Acoplamiento capacitivo:** utiliza efectos capacitivos para proporcionar el acoplamiento entre la etiqueta y el lector. Este sistema se emplea a menudo en tarjetas inteligentes de contacto, donde la tarjeta se inserta en un lector y ambos elementos se encuentran en proximidad muy cercana.

5.2.6. Microcontrolador

Un microcontrolador es un circuito integrado programable que contiene un procesador, memoria y periféricos de entrada/salida en un solo chip. Se considera una computadora de propósito específico integrada en un único circuito, capaz de ejecutar instrucciones grabadas en su memoria no volátil.

ESP8266 (Wemos D1 Mini): es un microcontrolador con conectividad Wi-Fi integrada, desarrollado por Espressif Systems, ampliamente utilizado en aplicaciones de IoT debido a su bajo costo, tamaño reducido y facilidad de programación. En este proyecto se utiliza la placa Wemos D1 Mini basada en el ESP8266 para realizar tareas de lectura de tarjetas RFID, comunicación con el servidor mediante HTTP y activación de relés de potencia para el control de cargas.

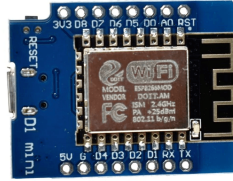
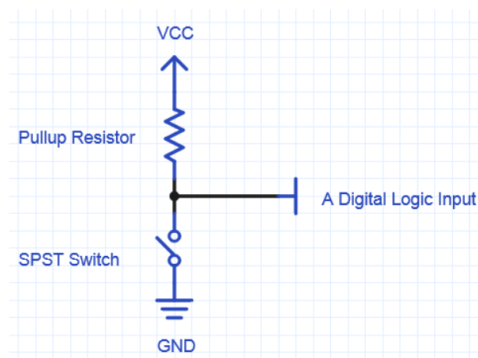


Figura 5.7: ESP8266 (Wemos D1 Mini).

5.2.7. Resistencia *pull-up*

En sistemas digitales, las entradas de un microcontrolador suelen presentar una impedancia alta; por tanto, si un pin queda sin una referencia eléctrica definida, puede adoptar estados indeterminados (“flotantes”) y producir lecturas erráticas. Para evitarlo se emplea la **resistencia *pull-up***, que conecta la línea de señal a una tensión positiva (V_{CC}) con un valor resistivo relativamente alto, imponiendo un estado lógico por defecto cuando no existe un elemento que fuerce la señal a otro nivel.

En aplicaciones típicas con pulsadores, la resistencia *pull-up* mantiene el pin en nivel alto cuando el interruptor está abierto, y al cerrar el interruptor hacia tierra (GND) el pin cambia a nivel bajo. De forma análoga, en señales con salidas de tipo *open-drain* u *open-collector* (comunes en buses como I²C), la resistencia *pull-up* es necesaria para obtener el nivel alto cuando ningún dispositivo está conduciendo la línea [14, 15].

Figura 5.8: Esquema típico de entrada digital con resistencia *pull-up* y pulsador/final de carrera (contacto normalmente abierto) hacia GND [4].

5.2.8. Relés

Un relé es un tipo de interruptor controlado mediante un campo magnético. Este dispositivo electromagnético se emplea para abrir o cerrar un interruptor que afecta a otro circuito de mayor potencia. En un circuito típico de relé, la bobina se modela como un circuito RL, donde R y L representan la resistencia y la inductancia de la bobina, respectivamente. Al cerrar el interruptor de control, el circuito de la bobina se activa y la corriente en la bobina aumenta gradualmente, generando un campo magnético. Cuando este campo magnético alcanza una intensidad suficiente, atrae un contacto móvil en otro circuito, cerrando el interruptor de potencia. En este momento, se considera que el relé está activado.

El tiempo que transcurre entre la activación del circuito de la bobina y el cierre de los contactos se conoce como tiempo de retardo del relé. Aunque los relés fueron ampliamente utilizados en los primeros circuitos digitales, aún tienen aplicaciones relevantes en la conmutación de circuitos de alta potencia y en aislamiento galvánico entre etapas de control y potencia.[5]

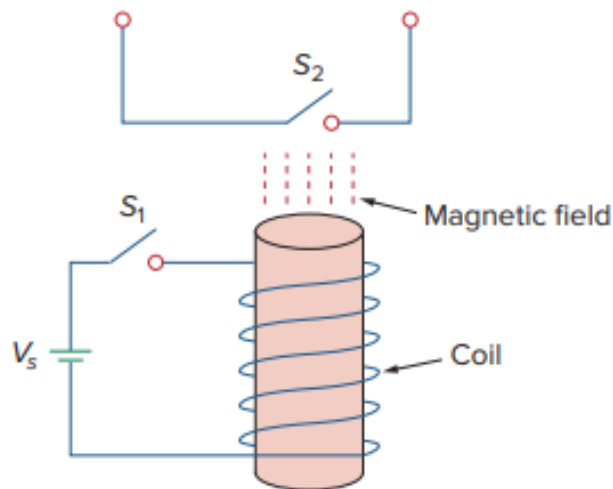


Figura 5.9: Relé magnético. [5]

5.2.9. Sensor de Efecto Hall

Un sensor de efecto Hall es un dispositivo semiconductor que opera bajo el principio del efecto Hall, el cual consiste en la generación de una diferencia de potencial en un material conductor o semiconductor cuando se somete a un campo magnético perpendicular al flujo de corriente. Este tipo de sensor es capaz de transducir campos magnéticos en señales eléctricas con un alto grado de precisión, consistencia y confiabilidad.

Entre sus características más destacadas se encuentran su alta sensibilidad, que permite detectar campos magnéticos de baja intensidad; un amplio rango operativo de voltaje, que puede abarcar desde aplicaciones de baja potencia hasta escenarios de mayor demanda; y una elevada capacidad de respuesta, adecuada para aplicaciones de alta frecuencia. Estos sensores tienen aplicaciones en

monitoreo en tiempo real, detección de proximidad, codificación rotativa de alta velocidad y conversión de la intensidad del campo magnético a parámetros de posición o corriente eléctrica, entre otras.[16]

En el contexto de medición de consumo eléctrico, módulos basados en efecto Hall, como el ACS712, permiten medir la corriente que atraviesa una carga sin necesidad de interrumpir el conductor, manteniendo aislamiento galvánico y mejorando la seguridad del sistema.[6]

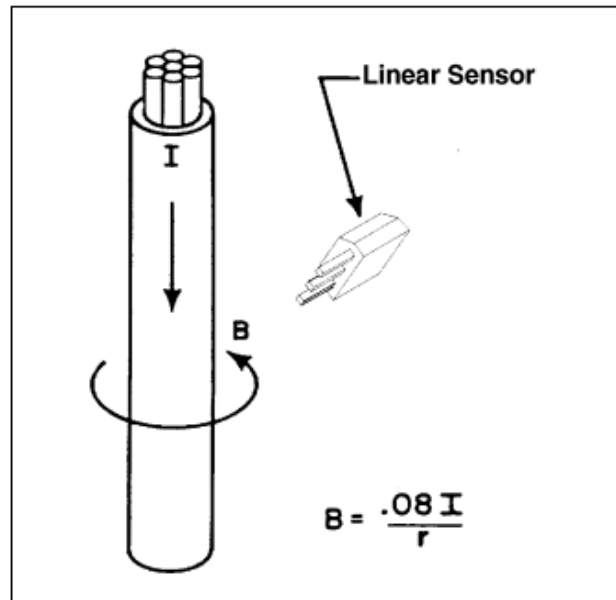


Figura 5.10: Sensor de corriente simple. [6]

5.2.10. Protocolos HTTP y servicios web

El Protocolo de Transferencia de Hipertexto (HTTP, por sus siglas en inglés) es el mecanismo estándar utilizado en la web para el intercambio de información entre clientes y servidores. Se trata de un protocolo de la capa de aplicación basado en mensajes de petición y respuesta, en el que un cliente envía una solicitud a un servidor y este devuelve una respuesta con un código de estado, cabeceras y, de ser necesario, un cuerpo de datos.[17]

HTTP define un conjunto de *métodos* o *verbos* que describen la operación que el cliente desea realizar sobre un recurso. Entre los más utilizados se encuentran:

- **HTTP GET:** se utiliza para solicitar información al servidor sin modificar el estado de los datos. Es el método típico para la consulta de recursos, páginas web o servicios que sólo leen información.
- **HTTP POST:** está pensado para enviar datos al servidor y producir cambios en la base de datos o en el estado de la aplicación. Se emplea, por ejemplo, en el envío de formularios, el registro de eventos o la creación de nuevos recursos en aplicaciones web.

En general, HTTP proporciona una base sencilla y extensible sobre la cual se construyen servicios web, APIs y aplicaciones distribuidas, tanto en entornos clásicos de computación como en escenarios de Internet de las Cosas (IoT), donde dispositivos con recursos limitados pueden comunicarse con servidores remotos utilizando este mismo protocolo.

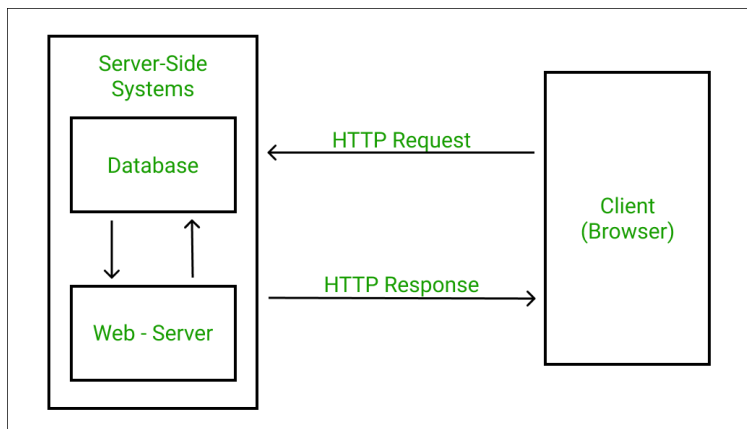


Figura 5.11: Esquema básico de comunicación HTTP entre cliente y servidor [7].

5.2.11. Servidor web Apache, XAMPP y MySQL

El servidor web Apache es uno de los servidores HTTP más utilizados a nivel mundial para alojar aplicaciones web dinámicas. Apache se encarga de recibir las peticiones HTTP de los clientes, interpretar las cabeceras de la solicitud y, en función de la configuración del sitio, ejecutar scripts del lado del servidor (por ejemplo, en PHP) o entregar archivos estáticos al cliente.[18] Gracias a su arquitectura modular, permite añadir funcionalidades mediante extensiones, como mecanismos de autenticación, compresión de contenido o soporte para distintos lenguajes de programación del lado del servidor.

Para simplificar la instalación y administración de este tipo de entornos, existen paquetes integrados como XAMPP, que reúnen en una sola distribución los componentes necesarios para montar un servidor web local: Apache como servidor HTTP, PHP como lenguaje de programación del lado del servidor y MySQL como sistema gestor de bases de datos.[19] Este tipo de paquetes permite disponer rápidamente de una pila de desarrollo tipo LAMP (*Linux-Apache-MySQL-PHP*) o equivalente en otros sistemas operativos, facilitando la creación y prueba de aplicaciones web.

MySQL es un sistema gestor de bases de datos relacional (RDBMS) ampliamente utilizado en aplicaciones web, caracterizado por su soporte para el lenguaje SQL, su alto rendimiento y su modelo cliente-servidor.[20] En una arquitectura web típica, el servidor Apache recibe la petición, ejecuta un script (por ejemplo, en PHP) que procesa los datos de entrada y, cuando es necesario, se comunica con MySQL para realizar consultas (`SELECT`), inserciones (`INSERT`), actualizaciones (`UPDATE`) o eliminaciones (`DELETE`) sobre las tablas definidas. La combinación Apache-PHP-MySQL, ya sea instalada de manera independiente o mediante distribuciones como XAMPP, constituye una

solución estándar para aplicaciones web y servicios de backend en múltiples dominios, incluidos sistemas de monitoreo, automatización e IoT.

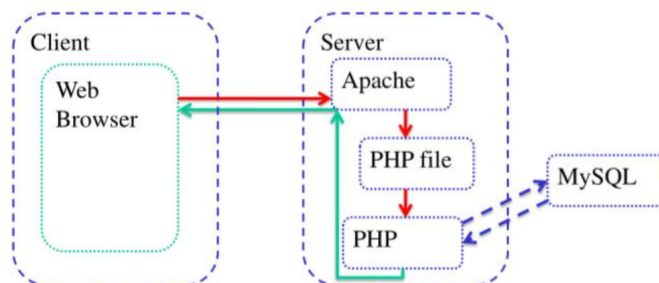


Figura 5.12: Esquema de interacción entre Apache-PHP-MySQL. [8]

5.2.12. Redes locales virtuales (VLAN)

Una red local virtual (VLAN, por sus siglas en inglés) es un mecanismo de segmentación lógica que permite agrupar dispositivos dentro de una misma red física como si pertenecieran a redes independientes. Esta separación se realiza configurando los switches gestionables de la infraestructura de red, de modo que el tráfico de cada VLAN se mantenga aislado del resto, incluso cuando se comparte el mismo medio físico.[21]

El uso de VLANs ofrece varias ventajas: mejora la seguridad al limitar el alcance del tráfico de difusión, reduce la congestión al segmentar dominios de broadcast, y facilita la administración de la red al agrupar dispositivos por función, área organizacional o requisitos de servicio. En entornos corporativos, educativos e industriales, las VLANs se emplean habitualmente para separar el tráfico de usuarios, servidores, laboratorios, dispositivos de voz sobre IP o nodos IoT, permitiendo aplicar políticas de calidad de servicio y de seguridad diferenciadas para cada segmento lógico.

Desde el punto de vista del diseño de redes, las VLANs constituyen una herramienta clave para implementar arquitecturas escalables, seguras y fáciles de gestionar, independientemente de la topología física subyacente.

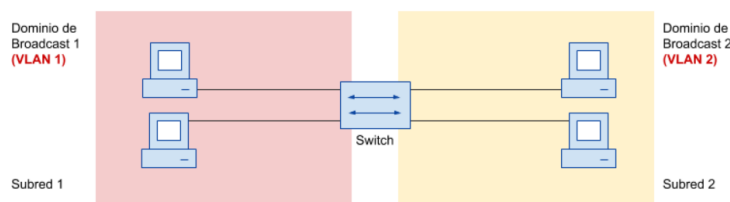


Figura 5.13: Ejemplo de segmentación lógica de una red física mediante VLANs.[9]

5.3. Normas y Estándares Relevantes

5.3.1. IEC 60950-1

La norma **IEC 60950-1** establece los requisitos de seguridad para equipos de tecnología de la información, abarcando dispositivos eléctricos y electrónicos utilizados en oficinas y entornos similares. Su objetivo es prevenir riesgos como descargas eléctricas, temperaturas extremas, incendios y peligros mecánicos. Este estándar incluye directrices para el aislamiento eléctrico, el diseño orientado a evitar sobrecalentamientos y la mitigación de fallos tanto en condiciones normales de operación como ante fallas previsibles. Aunque ha sido reemplazada en gran parte por la norma *IEC 62368-1*, sigue siendo una referencia importante para equipos existentes y para el diseño seguro de sistemas que integran electrónica de baja tensión.[22]

5.3.2. IEC 60364

La **IEC 60364** es un conjunto de normas que abordan la instalación eléctrica de baja tensión, con énfasis en la protección contra descargas eléctricas, incendios y fallos del sistema. Este estándar define criterios para el diseño, instalación y mantenimiento de sistemas eléctricos en edificios residenciales, comerciales e industriales, incluyendo directrices para sistemas de puesta a tierra, protección diferencial, dimensionamiento de conductores y dispositivos de protección. La integración de sensores de corriente y relés de potencia en aulas debe considerar estas directrices para garantizar la seguridad de los usuarios y la confiabilidad del sistema.[23]

5.4. Trabajos Relacionados

Sistemas de control IoT para reducir el consumo energético

Los sistemas de control basados en IoT han demostrado un alto potencial para la gestión eficiente del consumo energético en diversos contextos. En aulas de clase, estos sistemas utilizan una combinación de sensores, actuadores y plataformas de comunicación para monitorear y controlar dispositivos como luminarias, sistemas HVAC (calefacción, ventilación y aire acondicionado) y equipos de cómputo. Investigaciones como las de Granados [24] y Rosete [25] destacan cómo la automatización de la iluminación y la climatización, en función de la ocupación y las condiciones ambientales, puede reducir de forma significativa el consumo de energía y mejorar el confort de los usuarios.

Granados [24] implementa un sistema de control de luminarias, aires acondicionados y monitoreo de energía eléctrica y temperatura en aulas de un edificio de posgrados, evidenciando el impacto positivo de la automatización sobre el consumo energético. De manera complementaria, Rosete [25] desarrolla una plataforma IoT para el control y monitoreo de salones de clase y laboratorios de innovación, que permite visualizar parámetros de operación en tiempo real, registrar históricos de uso y apoyar la gestión de la infraestructura académica.

En el ámbito internacional, Noor et al. [26] proponen un sistema de aula inteligente (*smart classroom*) orientado a la conservación de energía, basado en tecnologías IoT para la supervisión y control de cargas. Su trabajo introduce un modelo de consumo y costos que permite cuantificar

el impacto de la automatización en el dominio educativo, integrando sensores, actuadores y una plataforma de monitoreo que facilita la toma de decisiones sobre el uso de los recursos energéticos.

Desde la perspectiva de las tecnologías de comunicación, Pocero et al. [27] presentan una comparación experimental entre LoRa e IEEE 802.15.4 en despliegues IoT dentro de edificios escolares, orientados a la eficiencia energética. Sus resultados muestran que ambas tecnologías pueden ser viables para este tipo de aplicaciones, y que LoRa ofrece ventajas en robustez y cobertura para entornos interiores con requisitos de bajo ancho de banda. Aunque el presente proyecto emplea Wi-Fi y se apoya en la infraestructura existente del campus, estos trabajos resaltan la diversidad de opciones tecnológicas disponibles para la implementación de soluciones IoT en entornos educativos.

Por otra parte, Prasetya et al. [28] realizan una revisión sistemática de la implementación de IoT en educación, identificando tendencias, arquitecturas típicas y desafíos recurrentes en este tipo de sistemas. Entre sus hallazgos, destacan la relevancia de las aulas inteligentes, los laboratorios conectados y los sistemas de monitoreo de recursos físicos (incluida la energía eléctrica) como líneas de aplicación consolidadas. Este marco conceptual sitúa al proyecto CoMo dentro de una corriente de investigación y desarrollo que busca integrar IoT en la gestión cotidiana de los espacios educativos.

El estudio de Jaimes Chacón [29] muestra, en el contexto residencial, cómo la implementación de sistemas inteligentes para el control del consumo de energía puede adaptarse a otros entornos, como el educativo, optimizando el uso de recursos y mejorando la comodidad de los usuarios. El enfoque de medición, control automático de cargas y visualización de datos de consumo es análogo al adoptado en CoMo.

En síntesis, las aplicaciones IoT para el control del consumo energético en aulas de clase demuestran que es posible alcanzar una mayor eficiencia mediante la integración de sensores, actuadores, plataformas de comunicación y sistemas de análisis de datos. Los trabajos revisados subrayan la importancia de la automatización basada en condiciones reales de ocupación, el monitoreo en tiempo real y la integración con sistemas de información institucionales, así como la necesidad de considerar aspectos de seguridad eléctrica, ciberseguridad y protección de datos en entornos educativos basados en IoT.

Materiales y Métodos

En esta sección se describen los materiales, herramientas y métodos empleados para el desarrollo y evaluación del sistema COMO. Se presenta el contexto de aplicación del estudio, la selección de las aulas instrumentadas y los criterios técnicos considerados para la intervención sobre la infraestructura existente.

Asimismo, se expone de forma general la implementación del sistema, abarcando los componentes de hardware y software utilizados, la integración con los servicios institucionales y los procedimientos seguidos para la recolección, almacenamiento y procesamiento de la información. Finalmente, se establece el procedimiento adoptado para analizar los datos obtenidos y evaluar el comportamiento energético de las aulas bajo las condiciones definidas en el estudio, asegurando la coherencia entre los objetivos planteados y los métodos empleados.

6.1. Diseño Metodológico

6.1.1. Ámbito, población y muestra

El proyecto se llevó a cabo en aulas de docencia de la Pontificia Universidad Javeriana Cali ubicadas en el bloque Cedro Rosado, las cuales cuentan con computador de escritorio, video-beam fijo y luminarias controlables mediante interruptores eléctricos convencionales. Estas aulas disponen, además, de conectividad Wi-Fi institucional y se encuentran registradas en la base de datos de reservas académicas de la Universidad, condición necesaria para la integración con el sistema **CoMo**.

La **población** de referencia está constituida por todas las aulas de docencia del campus que presentan características técnicas compatibles con el sistema propuesto, es decir, aquellas en las que es posible: (i) instalar sensores de corriente en las líneas de alimentación de computador, video-beam e iluminación; (ii) intercalar módulos de relé para la conmutación de estas cargas; y (iii) garantizar la comunicación inalámbrica entre los nodos IoT y el servidor local.

La **muestra** estuvo conformada por 3 aulas seleccionadas por conveniencia, en coordinación con la Oficina de Recursos Físicos y Ambientales y la Oficina de Registro Académico y Admisiones, teniendo en cuenta la disponibilidad de los espacios, la estabilidad de la conectividad y la posibilidad de intervenir la infraestructura eléctrica sin afectar el uso normal de los salones. En cada aula seleccionada se instrumentaron de manera diferenciada tres tipos de dispositivos: computador, video-beam e iluminación, de forma que el sistema pudiera medir y controlar el consumo de cada carga por separado.

6.1.2. Criterios de inclusión y exclusión

Criterios de inclusión

Se consideraron para la muestra únicamente las aulas que cumplían simultáneamente las siguientes condiciones:

- Contar con red eléctrica accesible en canaletas, tableros o puntos de conexión que permitieran la instalación de sensores de corriente y módulos de relé sin modificaciones estructurales mayores.
- Disponer de conectividad Wi-Fi estable durante la jornada académica, con intensidad de señal suficiente en el interior del salón para garantizar la comunicación entre los microcontroladores ESP8266 y el servidor basado en XAMPP.
- Estar registradas en la base de datos institucional de reservas académicas y contar con un histórico de programación de al menos tres meses, lo cual permite contrastar el uso real del salón con los horarios oficiales.

Criterios de exclusión

Se excluyeron del estudio aquellas aulas que presentaban alguna de las siguientes condiciones:

- Estar programadas para mantenimiento, adecuaciones locativas o cambios de dotación durante el periodo de medición, lo que hubiese introducido cambios abruptos en las cargas conectadas o en la disponibilidad del salón.
- Presentar modificaciones frecuentes en la configuración eléctrica (por ejemplo, cambio de luminarias, reemplazo de equipos o redistribución de tomas) que dificultaran la comparación entre la línea base y la etapa con automatización.
- Tener problemas recurrentes de conectividad inalámbrica o ausencia de cobertura Wi-Fi estable, lo que comprometería la transmisión continua de datos hacia la base de datos del sistema.

6.1.3. Arquitectura general del sistema Iot CoMo

El sistema CoMo se concibe como una plataforma IoT distribuida que integra sensores, actuadores, dispositivos de usuario y un backend web centralizado para registrar, procesar y analizar el comportamiento energético de las aulas. La arquitectura se organiza en cuatro capas principales: *capa de campo*, *capa de comunicación*, *capa de servicios (backend)* y *capa de análisis y visualización*.

En la **capa de campo** se encuentran los dispositivos físicos instalados en cada aula: (i) los nodos de medición de corriente basados en ACS712-20A acoplados a las líneas de alimentación del computador, el video-beam e iluminación; (ii) los módulos de relé que permiten conmutar la alimentación de estos dispositivos; y (iii) el módulo de identificación formado por un lector RFID RC522 y un microcontrolador ESP8266, encargado de leer el UID del carnet del docente.

Adicionalmente, el computador del aula y el video-beam actúan como elementos finales cuyo estado es controlado de manera indirecta por el sistema.

La **capa de comunicación** está constituida por la red Wi-Fi institucional, a través de la cual los microcontroladores ESP8266 se conectan al servidor local. Cada nodo IoT establece una conexión inalámbrica con el punto de acceso del edificio y se comunica con el backend mediante solicitudes HTTP dirigidas a scripts PHP específicos. Esta capa abstrae la infraestructura física de red y permite que las aulas sean tratadas como nodos independientes dentro de un mismo dominio lógico de aplicación.

Sobre la **capa de servicios** se implementa el servidor local basado en XAMPP, que integra Apache, PHP y MySQL. En esta capa residen: (i) los scripts PHP que reciben los datos de corriente enviados por los ESP8266 y los almacenan en las tablas de consumo eléctrico; (ii) los servicios que procesan los eventos provenientes del sistema RFID, consultan la tabla de reservas académicas y clasifican los accesos como autorizados o no autorizados; y (iii) la interfaz web que permite el control manual de los dispositivos de aula. La Figura 6.16 muestra el flujo de información entre los nodos IoT, el servidor Apache/PHP y la base de datos MySQL, así como la interacción con la interfaz web y con Power BI.

Finalmente, la **capa de análisis y visualización** está compuesta por el entorno de Power BI, desde el cual se conectan las tablas almacenadas en MySQL para construir modelos de datos y reportes interactivos. En esta capa se calculan los indicadores definidos en la Sección 6.1.10, tales como el consumo energético total, las horas de uso fuera del horario académico, el porcentaje de uso no autorizado y el costo económico asociado al consumo eléctrico. Asimismo, se generan visualizaciones que permiten comparar el comportamiento energético de las aulas antes y después de la implementación del sistema CoMo, desagregando el análisis por aula, dispositivo y franja horaria.

Desde el punto de vista funcional, el flujo típico de operación del sistema es el siguiente:.

- 1) El docente presenta su carnet en el lector RFID RC522 del aula. El ESP8266 asociado lee el UID y envía una solicitud HTTP al servidor, donde un script PHP consulta la tabla de reservas académicas para determinar si el acceso es válido en ese salón y horario.
- 2) Si el acceso es autorizado, el servidor devuelve la respuesta correspondiente y el módulo de identificación ordena a los nodos de relé, mediante peticiones HTTP, habilitar la alimentación del computador, el video-beam y las luminarias. De forma simultánea, el evento RFID se registra en la base de datos.
- 3) Mientras los dispositivos están activos, los nodos ESP8266 de medición de corriente muestrean periódicamente la señal del ACS712-20A y envían cada 20 segundos los valores de corriente eficaz al backend, que los almacena junto con una marca de tiempo generada en el servidor.
- 4) Cuando el docente retira su carnet o finaliza la reserva, el sistema registra el evento correspondiente y envía la orden de desactivar los relés asociados, interrumpiendo el suministro de energía a los equipos. El conjunto de registros de consumo, estados de relé y eventos RFID permite reconstruir el uso real del aula.

- 5) Periódicamente, los datos almacenados en MySQL se consultan desde Power BI para generar indicadores agregados y visualizaciones que soportan el análisis comparativo entre la fase de línea base y la fase con el sistema COMO activo.

Esta arquitectura modular facilita la ampliación del sistema a nuevos salones o edificios, pues la adición de nuevas aulas solo requiere replicar los nodos de campo (sensores, relés y lectores RFID) y registrar la nueva configuración en la base de datos y en los paneles de análisis.

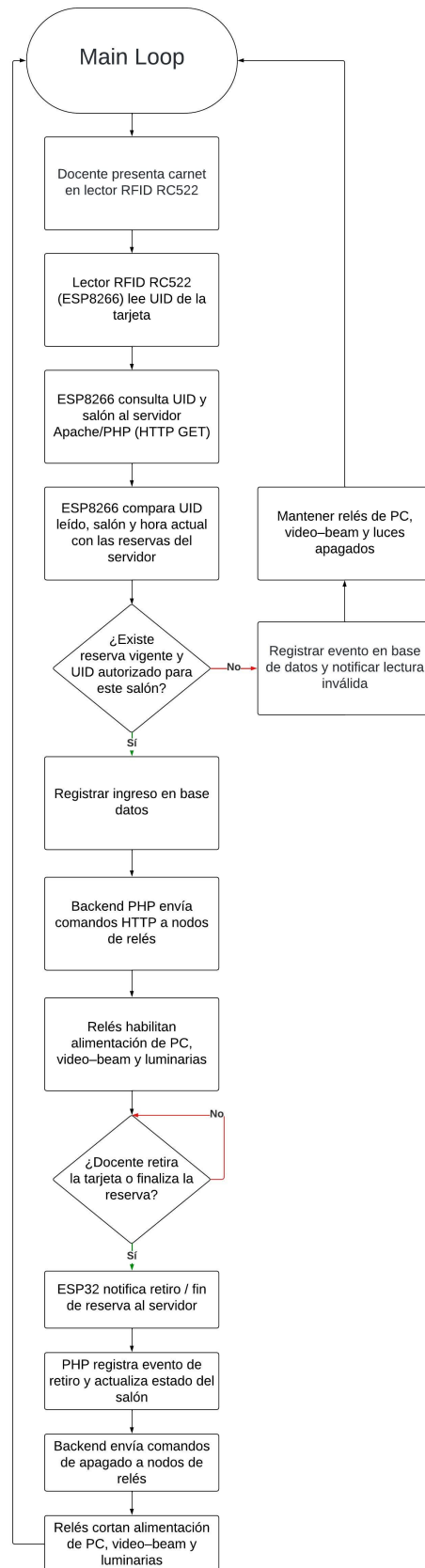


Figura 6.1: Diagrama de flujo del ciclo principal de autenticación RFID y control de relés en el aula.

6.1.4. Subsistemas de hardware

6.1.4.1. Subsistema de autenticación RFID

El subsistema de autenticación se encarga de habilitar o denegar el uso de los dispositivos del aula a partir de la identificación del docente mediante su carnet institucional. Para ello se implementó un nodo dedicado compuesto por un microcontrolador *ESP8266*, un lector RFID basado en el módulo *MFRC522*, una pantalla OLED, un sensor final de carrera, un buzzer y una fuente de alimentación de 5 V.

Desde el punto de vista funcional, este subsistema cumple dos objetivos principales:

- Identificar al usuario mediante el UID de su tarjeta RFID.
- Enviar esta información al servidor para que sea validada contra la base de datos de reservas y registrar el evento de acceso, desencadenando las acciones de encendido/apagado coordinadas con el subsistema de relés.

Arquitectura de hardware. El nodo de autenticación se diseñó como un dispositivo compacto que el docente puede utilizar al ingresar al aula. Sus componentes principales son:

- **Microcontrolador ESP8266:** encargado del control general del subsistema, la comunicación Wi-Fi con el servidor institucional y la gestión de la interfaz de usuario (pantalla y buzzer).
- **Lector RFID MFRC522:** conectado al ESP8266 mediante la interfaz SPI (líneas SCK, MOSI, MISO, SDA/SS y RST). Este módulo opera a 13,56 MHz y permite leer etiquetas RFID pasivas tipo MIFARE utilizadas en los carnets de la universidad.
- **Pantalla OLED:** conectada por I²C al ESP8266, utilizada para mostrar mensajes de estado al usuario (*“Conectando a Wi-Fi”, “Acceso Permitido”, “Acceso Denegado”, etc.*).
- **Buzzer y señalización visual:** un buzzer piezoeléctrico conectado a pines digitales del ESP8266 para proporcionar confirmación acústica/visual rápida de los eventos de autenticación.
- **Switch final de carrera:** se cierra cuando se inserta una tarjeta en el lector, habilitando la lectura del UID.
- **Alimentación:** una fuente de 5 V (por ejemplo, un adaptador de corriente o puerto USB) que permite la operación autónoma del dispositivo durante una jornada típica de clases.

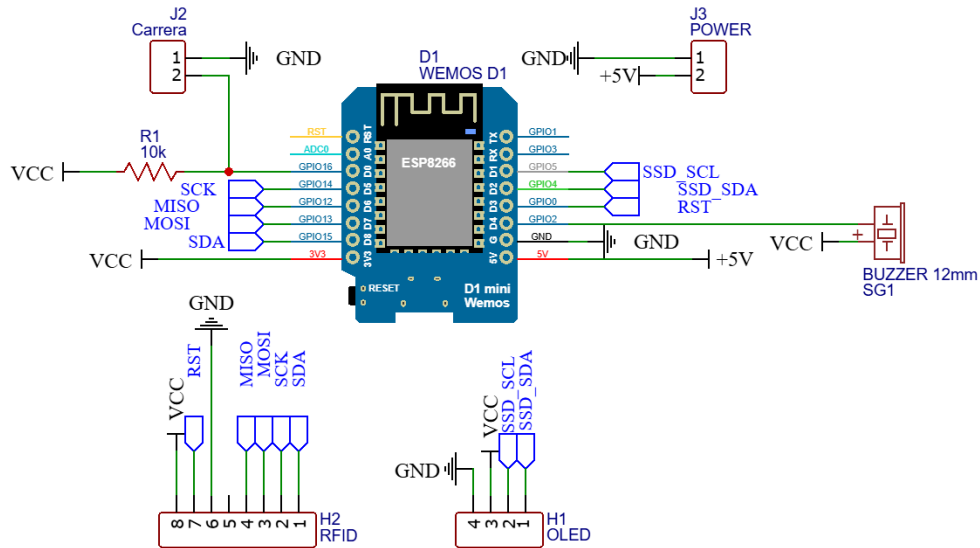


Figura 6.2: Esquema eléctrico del nodo de autenticación RFID basado en un microcontrolador ESP8266, lector MFRC522, pantalla OLED y buzzer.

La Fig. 6.2 presenta el esquema eléctrico del nodo de autenticación RFID, en el cual el *Wemos D1 mini* (ESP8266) actúa como núcleo de procesamiento y comunicación, integrando el lector RC522 por SPI, la pantalla OLED por I²C, el final de carrera para detección física del carnet y el buzzer como retroalimentación acústica. El núcleo del circuito está constituido por un microcontrolador *Wemos D1 mini* (ESP8266), alimentado a 5 VDC desde un conector de potencia dedicado. A este microcontrolador se conectan, mediante un bus SPI, el lector RFID basado en el circuito integrado MFRC522 y, mediante un bus I²C, la pantalla OLED que actúa como interfaz de usuario. Adicionalmente, se incorpora un interruptor de final de carrera montado en el soporte del carnet, cuya señal es acondicionada por una resistencia de *pull-up* a V_{CC} y leída por una entrada digital del ESP8266, permitiendo detectar la inserción o retirada física de la tarjeta. El módulo se complementa con un buzzer activo de 5 V, controlado desde otro pin digital, que proporciona retroalimentación acústica en eventos de acceso permitido, denegado o de tiempo de uso. En operación, cuando el usuario inserta su carnet institucional, el final de carrera cambia de estado y el ESP8266 interroga al lector RFID para obtener el identificador único (UID) de la tarjeta. Este UID, junto con la información de aula y sello temporal, se envía al servidor mediante WiFi para ser validado frente a la base de datos de reservas. Según la respuesta del backend, el módulo actualiza la información mostrada en la pantalla OLED, genera las señales acústicas correspondientes y envía las órdenes HTTP a los módulos de relé asociados, habilitando o bloqueando el uso de los equipos del aula conforme a la programación académica establecida.

Iteración del diseño: cambios aplicados a la PCB del módulo RFID. Durante el desarrollo del subsistema de autenticación se realizó una iteración del diseño del módulo RFID, pasando de

una versión inicial (Fig. 6.3 y Fig. 6.4) a la versión final empleada en el despliegue (Fig. 6.5). Esta iteración se enfocó en corregir comportamientos intermitentes observados en pruebas de campo, particularmente en (i) la detección del estado del sensor final de carrera (inserción/retiro del carnet) y (ii) la activación del buzzer como retroalimentación al usuario. En la práctica, se aplicaron dos cambios principales:

- **Corrección de la señal del final de carrera (detección de inserción de tarjeta).** En la versión inicial, la señal *Carrera* quedó asociada a un pin no coherente con el definido en el firmware (y sin una polarización eléctrica explícita), lo cual hacía la lectura susceptible a estados flotantes y disparos espurios. En la versión final, la señal se reasignó al pin utilizado por el firmware (D0 / GPIO16) y se incorporó una resistencia *pull-up* de 10 k Ω hacia V_{CC} , asegurando un nivel lógico estable en reposo y reduciendo falsos eventos de inserción/retiro.
- **Reconexión del buzzer para control desde el microcontrolador.** En la versión *inicial* el buzzer no quedaba ruteado de forma funcional para ser accionado desde el ESP8266. En la versión final se corrigió el ruteo para habilitar su control desde el pin digital definido en el firmware (D4 / GPIO2), proporcionando una retroalimentación acústica consistente ante eventos de acceso permitido, acceso denegado y retiro del carnet.

Para contextualizar la causa raíz de los fallos, la Fig. 6.3 presenta el esquemático de la versión inicial, donde se observan las conexiones originales del final de carrera (*Carrera*) y el buzzer antes de aplicar los ajustes.

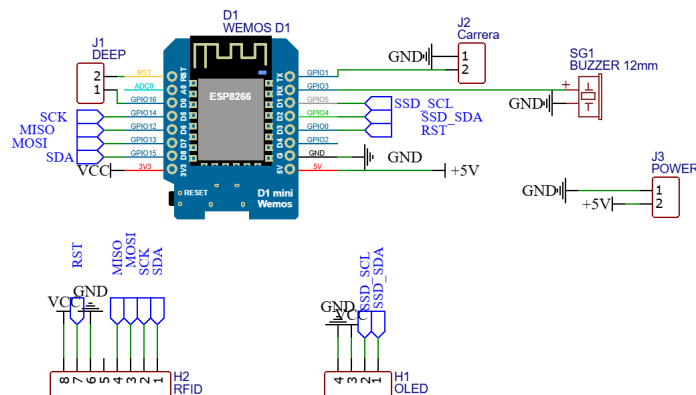


Figura 6.3: Esquemático de la versión inicial del módulo RFID, donde se evidencian las conexiones originales del final de carrera (*Carrera*) y del buzzer.

Desde el punto de vista físico, la Fig. 6.4 muestra la tarjeta recibida del servicio de fabricación. Esta referencia se incluye para comparar el estado original del ensamble con la tarjeta tras el retrabajo aplicado.



Figura 6.4: PCB en su versión inicial, tal como se recibió del servicio de fabricación.

Cabe resaltar que estos ajustes se implementaron como retrabajo (*rework*) sobre las tarjetas ya fabricadas, dado que no requerían una reestructuración completa del PCB y permitían aprovechar los materiales disponibles en ese momento. El resultado del retrabajo (puentes, reasignación de pin y *pull-up*) se documenta en la Fig. 6.5.

Finalmente, como apoyo a la trazabilidad del proceso de diseño, la Fig. 6.6 presenta el render del layout inicial previo a fabricación, el cual permite identificar la disposición y ruteo planeados antes de las correcciones aplicadas en campo.

Diseño mecánico, encapsulado y montaje. Con el fin de facilitar la instalación en aula y proteger la electrónica frente a manipulación y polvo, el nodo de autenticación se integró en una carcasa dedicada. El diseño del encapsulado se orientó a: (i) alojar de forma estable la tarjeta *Wemos D1 mini* y los módulos periféricos, (ii) exponer únicamente las interfaces necesarias para el usuario (zona de lectura del carnet y pantalla OLED), y (iii) enrutar el cableado de alimentación y periféricos. Adicionalmente, el diseño contempla puntos de fijación internos para evitar movimiento de los módulos durante el uso cotidiano y aberturas específicas para los elementos de interfaz (ventana de la OLED y paso del soporte/mecanismo asociado al final de carrera).

La Fig. 6.7 ilustra el diseño mecánico propuesto del encapsulado, incluyendo las piezas principales y los puntos de sujeción previstos para garantizar estabilidad durante la operación.

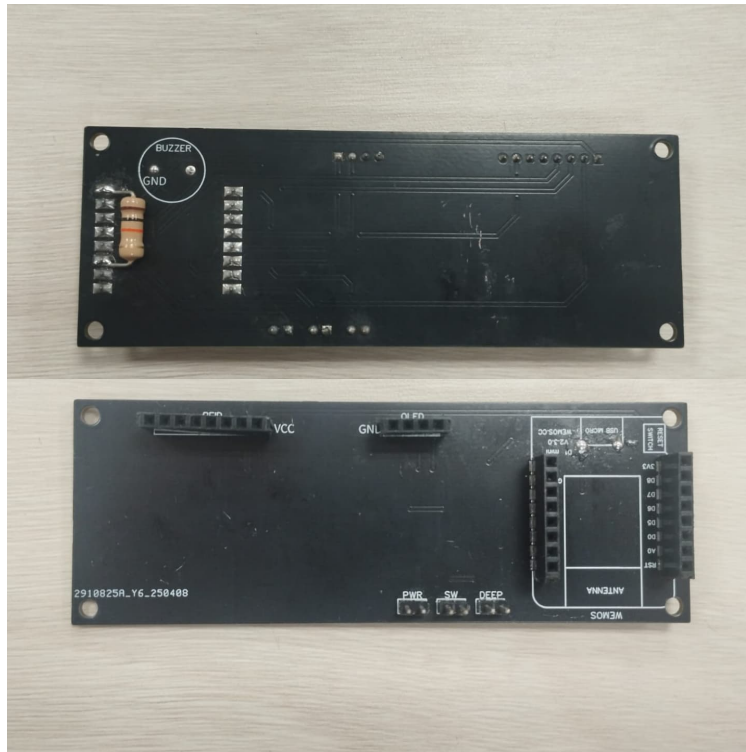


Figura 6.5: PCB con modificaciones aplicadas mediante retrabajo (*rework*).

Evidencia fotográfica del prototipo e instalación. Con el propósito de documentar la implementación real en campo, se incluyen fotografías del prototipo final y su instalación en aula. En primer lugar, la Fig. 6.8 muestra el nodo ensamblado y listo para operación, con las interfaces de usuario accesibles.

A continuación, la Fig. 6.9 documenta la disposición interna de los módulos y el cableado, útil para evidenciar el montaje, la sujeción y la mantenibilidad del sistema.

Por último, la Fig. 6.10 muestra la ubicación del nodo en el aula y su condición de montaje durante operación, verificando su integración con el entorno real de uso.

Lógica de funcionamiento local. El firmware del ESP8266 implementa un ciclo de operación basado en estados, que puede resumirse de la siguiente manera:

1. **Inicialización y conexión a la red.** Tras el arranque, el ESP8266 configura las interfaces SPI e I²C, inicializa el lector MFRC522 y la pantalla OLED, y establece la conexión Wi-Fi utilizando las credenciales configuradas. Mientras no haya conexión, la pantalla muestra un mensaje de espera y se realizan reintentos periódicos.
2. **Espera de tarjeta.** Una vez conectado a la red, el sistema entra en modo de espera. El lector MFRC522 escanea continuamente el campo cercano una vez se acciona el switch de final de

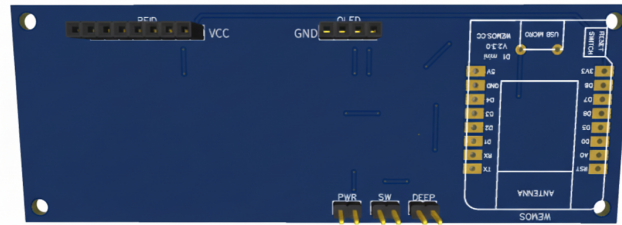


Figura 6.6: Render del diseño inicial del PCB.

carrera; cuando detecta una tarjeta, se lee el UID y se formatea como una cadena de texto (por ejemplo, en hexadecimal).

3. **Envío del UID al servidor.** Cada vez que se detecta o retira una tarjeta, el ESP8266 construye una petición HTTP (de tipo `GET` o `POST`, según el script PHP) hacia el servidor Apache. En dicha petición se envían, como parámetros, el UID leído, el identificador del salón y el tipo de evento detectado (presencia o retiro de tarjeta).
4. **Recepción de la respuesta.** El script PHP dedicado al sistema RFID procesa la solicitud, registra el evento en la tabla `tarjetas_detectadas` y consulta la tabla `classes_database` para determinar si:
 - existe una reserva activa para ese salón en el instante actual, y
 - el UID corresponde al docente asignado a dicha reserva.

El servidor responde al ESP8266 con un código simplificado (por ejemplo: `ingreso`, `retiro`, `no_auth`).

5. **Acciones locales y coordinación con el sistema.** En función de la respuesta:
 - Si la respuesta indica `ingreso` con reserva válida, el nodo muestra “*Acceso Permitido*” en la pantalla.
 - Si la respuesta corresponde a `no_auth` (usuario no autorizado o sin reserva activa), se muestra un mensaje de rechazo “*Acceso Denegado*”, se emite un patrón sonoro diferenciado y no se habilita el uso de los dispositivos.
 - Si la respuesta es `retiro`, el sistema registra que el docente ha retirado su tarjeta. Esta información será utilizada por el subsistema de actuación para decidir el apagado de los equipos, en combinación con la tabla de reservas.

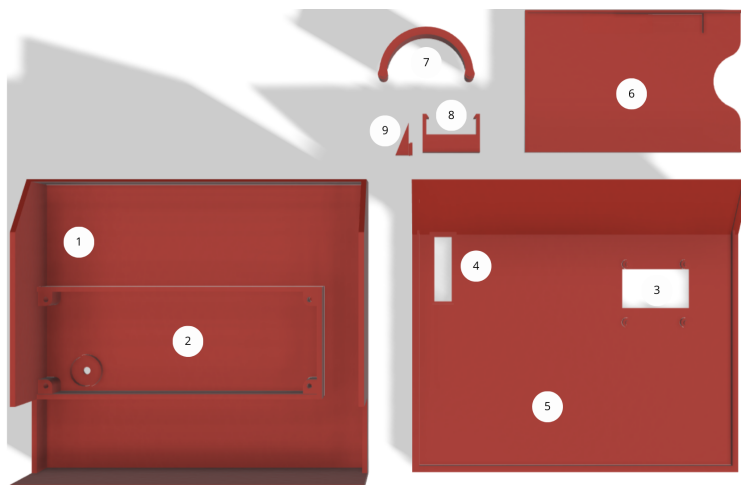


Figura 6.7: Diseño mecánico del encapsulado del nodo RFID (vista explotada): 1. Carcasa del dispositivo. 2. Soporte para PCB del lector. 3. Apertura para la pantalla OLED. 4. Ranura para el sensor final de carrera. 5. Tapa de la carcasa. 6. Ranura para tarjeta RFID. 7. Soporte módulo RFID RC522. 8. Soporte para el sensor final de carrera. 9. “Rampa” para el sensor final de carrera.

Integración con la base de datos y el subsistema de relés. Una característica clave del diseño es que el nodo RFID no conmuta directamente las cargas eléctricas; en su lugar, actúa como *identificador* de quién está autorizado a usar el salón en cada instante y como fuente de eventos para la base de datos. La lógica de integración se resume así:

- Cada evento de tarjeta (detección o retiro) se almacena en la tabla `tarjetas_detectadas`, junto con su marca temporal, el salón y el estado asignado (*ingreso*, *retiro*, *no_autorizado*). La estructura de esta tabla se describe en la subsección *Estructuración del sistema de bases de datos*, dentro del *Diseño de la base de datos MySQL*.
- La tabla `classes_database` mantiene el calendario de reservas académicas y el mapeo entre cada reserva y el UID del docente responsable. Cuando el ESP8266 de autenticación detecta una tarjeta, envía una petición HTTP al servidor Apache/PHP para solicitar la información de reserva vigente para ese salón y ese instante (incluyendo el UID esperado, en caso de existir).
- Con la información recibida desde el servidor, el firmware del ESP8266 compara localmente el UID leído por el lector MFRC522 con el UID esperado según `classes_database` y determina si el evento corresponde a un *ingreso* autorizado, un *retiro* o un acceso *no_autorizado*. El resultado de esta decisión se envía nuevamente al servidor para ser registrado en `tarjetas_detectadas` y utilizado posteriormente por la lógica de control sobre las cargas, descrita en la subsección de actuación sobre relés.

Este desacoplamiento entre autenticación y conmutación de potencia, mediado por la base de datos y los scripts PHP, mejora la escalabilidad y mantenibilidad del sistema: es posible añadir



Figura 6.8: Nodo RFID ensamblado en su encapsulado final (fotografía real).

nuevos lectores RFID o cambiar la política de acceso (por ejemplo, incluir asistentes o monitores) sin modificar el hardware de relés, limitando los cambios al firmware del ESP8266 de autenticación y a la lógica implementada en las tablas y servicios de base de datos descritos en la sección de diseño de la base de datos MySQL.

6.1.4.2. Subsistema de medición de consumo eléctrico

El subsistema de medición de consumo eléctrico tiene como propósito cuantificar, de manera continua y diferenciada, la corriente consumida por el computador, el video-beam y las luminarias de cada aula. Esta información constituye la base para el cálculo de la energía diaria y de los indicadores de uso definidos en la sección de variables e indicadores, y se integra directamente con la base de datos MySQL utilizada por el sistema COMO.

Arquitectura de hardware y despliegue en aula. En cada salón de la muestra se instalaron tres nodos de medición, uno por cada tipo de dispositivo monitorizado: computador, video-beam e iluminación. Cada nodo está compuesto por un microcontrolador ESP8266 y un sensor de corriente de efecto Hall ACS712-20A-20A, cableado en serie con la carga correspondiente. La salida analógica del sensor se conecta a la entrada A0 del ESP8266 (`sensorPin = A0`), desde donde se digitaliza la señal para su procesamiento.

El módulo ACS712-20A entrega una tensión proporcional a la corriente que circula por la carga, con un *offset* cercano a $V_{CC}/2$ en ausencia de corriente y una sensibilidad nominal del orden de $S \approx 0,066 \text{ V/A}$, valor que se parametriza en el firmware (`sensibilidad = 0.066`). La alimentación analógica del microcontrolador se modela como $V_{CC} = 3,3 \text{ V}$ y el convertidor analógico-digital

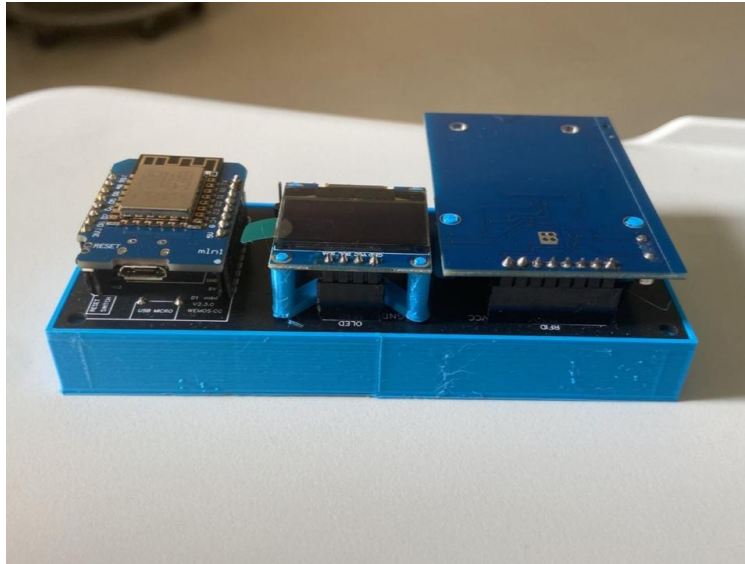


Figura 6.9: Vista interna del encapsulado y disposición de módulos (ESP8266, RC522, OLED y cableado) (fotografía real).

(ADC) tiene una resolución de 10 bits ($0 \leq \text{ADC} \leq 1023$).

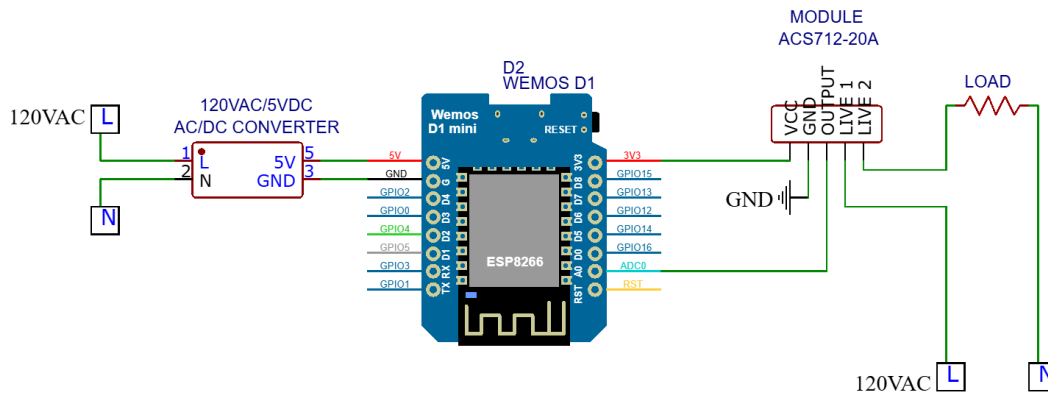


Figura 6.11: Esquema eléctrico del nodo de medición de corriente basado en un ESP8266 y el sensor de efecto Hall ACS712-20A-20A, conectado en serie con la carga.

El circuito mostrado en la Fig. 6.11 corresponde al nodo dedicado a la medición de corriente alterna de cada carga del aula. La alimentación del sistema se obtiene a partir de un convertidor AC/DC que transforma la tensión de red de 120 VAC a 5 VDC. Esta tensión regulada se utiliza para energizar el microcontrolador *Wemos D1 mini*, basado en el ESP8266, así como el módulo de sensado de corriente. La línea de fase de la red de 120 VAC se hace pasar en serie a través del sensor de efecto Hall *ACS712-20A*, de manera que la corriente de carga circula exclusivamente por el



Figura 6.10: Ubicación del nodo RFID en el aula y condición de montaje durante operación (fotografía real).

conductor de potencia integrado en el módulo, manteniendo aislamiento galvánico entre el circuito de alta tensión y la electrónica de control de baja tensión. El ACS712-20A entrega en su pin de salida una señal analógica proporcional a la corriente instantánea que atraviesa el sensor, centrada alrededor de la mitad de la tensión de alimentación. Dicha señal se conecta a la entrada analógica A0 del ESP8266, que la digitaliza y procesa para estimar la corriente eficaz consumida por la carga. Periódicamente, el nodo de medición envía los valores calculados al servidor mediante una petición HTTP *POST*, lo que permite registrar en la base de datos el comportamiento temporal del consumo eléctrico de cada equipo monitorizado.

La instalación se realizó en las canaletas o cajas de conexión de cada aula, procurando que los sensores quedaran protegidos y que el cableado de baja señal se mantuviera separado de los conductores de potencia para reducir el ruido electromagnético. Cada ESP8266 se configuró con credenciales de la red Wi-Fi institucional para poder transmitir las mediciones al servidor local.

La Fig. 6.12 documenta la instalación real del nodo de medición con el sensor ACS712-20A, evidenciando su montaje en la infraestructura eléctrica del aula y el enrutamiento del cableado de potencia y señal.



Figura 6.12: Nodo de medición de corriente con sensor ACS712-20A instalado en el aula (fotografía real).

Verificación con cargas conocidas. Antes de la operación continua, se verificó el orden de magnitud de la conversión tensión–corriente y se ajustó la ganancia global del sistema mediante ensayos con cargas resistivas conocidas. Se emplearon dos cargas de 50 W y 100 W conectadas a la red de 120 V/60 Hz; para cada carga se midió la corriente real con una pinza amperimétrica y se comparó con la corriente eficaz estimada por el ESP8266 a partir de las lecturas del ACS712-20A.

Asumiendo una relación lineal coherente con la sensibilidad nominal del sensor, se ajustó el factor de conversión implementado en el código (basado en la constante *sensibilidad*) hasta obtener una concordancia adecuada entre la lectura de la pinza amperimétrica y la corriente calculada por el sistema en el rango de operación de interés. De este modo, la corrección de error quedó integrada en los parámetros del firmware, sin requerir posteriores ajustes manuales durante la campaña de medición.

Calibración dinámica y cálculo de corriente eficaz en el ESP8266. Durante la operación normal, cada ESP8266 ejecuta periódicamente un ciclo de medida que consta de tres etapas principales: estimación del *offset* de referencia, cálculo del valor eficaz de corriente y envío de los datos al servidor.

- 1) **Estimación del offset de referencia.** En primer lugar se toman $N_{\text{off}} = \text{numOffsetMuestras} = 500$ lecturas consecutivas del ADC, con un retardo de $500 \mu\text{s}$ entre muestras. Cada lectura ADC_k se convierte a tensión mediante

$$v_k = \frac{\text{ADC}_k}{1023} V_{\text{CC}}, \quad (6.1)$$

y se calcula el voltaje de referencia como promedio:

$$V_{\text{off}} = \frac{1}{N_{\text{off}}} \sum_{k=1}^{N_{\text{off}}} v_k. \quad (6.2)$$

Este valor representa el punto de reposo del sensor (aproximadamente $V_{CC}/2$) y permite compensar variaciones lentas debidas a deriva térmica o tolerancias del circuito. La compensación se realiza automáticamente en cada ciclo de medida.

- 2) **Cálculo de la corriente instantánea y del valor eficaz.** A continuación se adquieren $N = \text{numMuestras} = 1000$ muestras adicionales de la señal, con un retardo de $100 \mu\text{s}$ entre lecturas, lo que implica una frecuencia de muestreo del orden de 10 kHz y cubre varios ciclos de la red de 60 Hz. Para cada muestra se calcula:

$$v_k = \frac{\text{ADC}_k}{1023} V_{CC}, \quad (6.3)$$

$$i_k = \frac{v_k - V_{\text{off}}}{S}, \quad (6.4)$$

donde S es la sensibilidad efectiva del ACS712-20A (ajustada en la etapa de verificación con cargas conocidas). La corriente eficaz se obtiene como

$$I_{\text{RMS}} = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{k=1}^N i_k^2}, \quad (6.5)$$

que corresponde a la definición discreta del valor eficaz, una vez eliminado el componente de continua. El uso de una ventana de 1000 muestras garantiza que el cálculo incluya múltiples ciclos de la señal de red y atenúe fluctuaciones puntuales.

- 3) **Envío de datos al servidor.** Finalmente, el microcontrolador construye una URL de tipo HTTP POST con dos parámetros principales: el voltaje de referencia `VOLTAGE_REF` y la corriente eficaz `AMPERAGE`. Estos valores se envían al servidor Apache utilizando la conexión Wi-Fi configurada en el dispositivo, invocando el script PHP correspondiente al salón y tipo de dispositivo (por ejemplo, `data_pc_cr41.php`, `data_vb_cr41.php` o `data_light_cr41.php`). El ciclo completo se repite cada 20000 ms , de modo que se obtiene una muestra de I_{RMS} aproximadamente cada 20 s para cada dispositivo monitorizado.

Este procedimiento, basado en la corrección automática de *offset* y en un ajuste previo del factor de conversión, permite que cada valor de corriente almacenado en la base de datos se obtenga a partir de una ventana de muestreo suficientemente larga y con una precisión adecuada para los análisis de consumo energético planteados en este trabajo.

Trazabilidad temporal e integración con la base de datos. El ESP8266 no dispone de un reloj en tiempo real dedicado; por ello, la trazabilidad temporal de las mediciones se asegura en el servidor. Cada paquete recibido por el script PHP asociado a la base de datos se almacena junto con una marca de tiempo generada en el servidor institucional, sincronizado mediante NTP. De esta forma, cada valor de I_{RMS} queda asociado a una fecha y hora oficiales, lo que permite:

- correlacionar el consumo de corriente con las reservas de cada aula y con los eventos de acceso mediante RFID;
- reconstruir series temporales de consumo por dispositivo, salón y franja horaria;
- comparar de manera consistente datos tomados en diferentes días y en diferentes aulas instrumentadas.

Los registros de corriente almacenados en las tablas de consumo eléctrico de MySQL son posteriormente consultados desde Power BI para el cálculo de energía diaria, tiempos de uso y detección de eventos fuera de reserva, integrándose con la información proveniente del subsistema RFID y de la base de datos de reservas académicas.

Consideración del consumo propio del nodo. Durante el despliegue se tuvo en cuenta que el nodo de medición también demanda energía para su operación (convertidor AC/DC, ESP8266 y el módulo ACS712-20A). Por la forma de instalación, la fuente que energiza la electrónica quedó conectada del mismo lado del sensor que la carga; en consecuencia, la corriente medida por el ACS712-20A incorpora no solo la corriente del dispositivo monitorizado, sino también el consumo propio del nodo.

6.1.4.3. Subsistema de actuación sobre cargas (relés para PC, video-beam y luminarias)

El subsistema de actuación tiene como finalidad controlar de manera remota el suministro eléctrico al computador, al video-beam y a las luminarias de cada aula, de forma coherente con los eventos de autenticación RFID y con la programación académica institucional. Para ello se emplean módulos basados en microcontroladores ESP8266, cada uno asociado a un módulo de relé que conmuta la alimentación de un único dispositivo. Cabe resaltar que estos módulos de relé pertenecen a la Pontificia Universidad Javeriana Cali: fueron adquiridos y ensamblados como parte de un proyecto IoT institucional previo que no alcanzó su fase de despliegue, por lo que permanecieron almacenados en bodega. En el marco de este trabajo, dichos dispositivos fueron facilitados temporalmente para darles un uso operativo y se integraron con el sistema COMO, tanto a nivel de conectividad (Wi-Fi) como de lógica de control mediante servicios web.

Arquitectura de hardware y despliegue. En cada salón se instalaron tres módulos de actuación, uno por cada tipo de carga monitorizada:

- Módulo para el computador de escritorio,
- Módulo para el video-beam, y
- Módulo para el circuito de iluminación del aula.

Cada módulo está conformado por:

- **Microcontrolador ESP8266:** configurado como cliente Wi-Fi y como servidor HTTP embebido, encargado de recibir comandos de encendido/apagado y traducirlos a señales digitales para el módulo de relé.
- **Módulo de relé:** de uno o varios canales, con aislamiento entre la electrónica de control de baja tensión y el circuito de potencia. Sus contactos se conectan en serie con la línea de alimentación de la carga, de manera que el estado del relé determina si el dispositivo recibe o no energía.
- **Elementos auxiliares:** indicadores luminosos y la fuente de alimentación necesaria para alimentar el ESP8266 y el módulo de relé desde la red de 120 V.

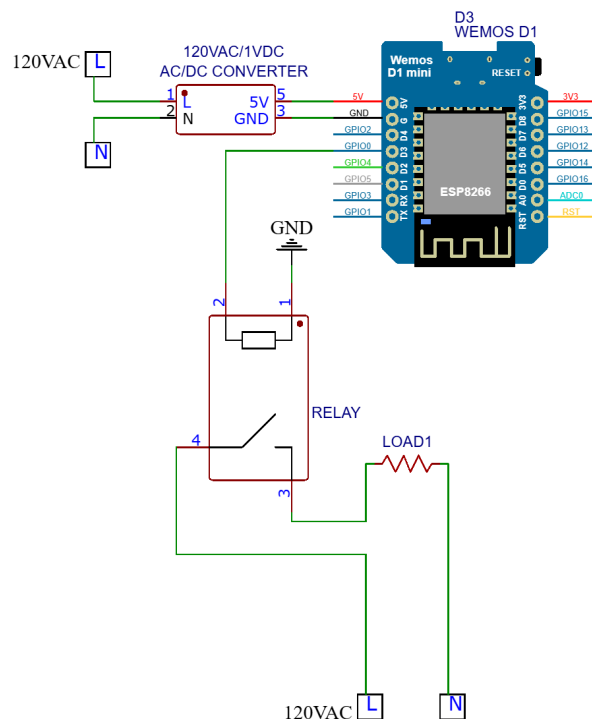


Figura 6.13: Esquema eléctrico del nodo de actuación: microcontrolador ESP8266, módulo de relé y conexión de la carga a la red de 120 V.

El circuito de la Fig. 6.13 representa el módulo de actuación encargado de conmutar el suministro eléctrico hacia una carga de 120 VAC (por ejemplo, el computador, el videobeam o el circuito de iluminación del aula). Al igual que en el módulo de medición, se emplea un convertidor AC/DC que entrega 5 VDC a partir de la red de 120 VAC; esta tensión se utiliza para alimentar el microcontrolador *Wemos D1 mini* y la etapa de mando del relé. La bobina del relé se acciona desde uno de los pines digitales del ESP8266, a través de la electrónica de interfaz incluida en el propio módulo, de modo que el microcontrolador controla indirectamente el estado de los contactos de potencia. La línea de fase de la red se cablea a través de los contactos del relé, mientras que el neutro se conecta directamente a la carga, garantizando así una conmutación segura del conductor activo. Cuando el sistema de autenticación y el backend autorizan el uso del aula, el ESP8266 recibe la orden correspondiente mediante una petición HTTP y cierra el relé, habilitando la alimentación de la carga. De forma análoga, al finalizar la sesión o ante condiciones de uso no autorizadas, el microcontrolador abre el relé y desenergiza el dispositivo, contribuyendo a la gestión eficiente de la energía y a la protección de los equipos.

Los módulos se ubicaron en cajas de paso o canaletas cercanas a los tomacorrientes o puntos de conexión de los dispositivos, de forma que el cableado de potencia pudiera interrumpirse con el relé sin cambios estructurales significativos en la instalación eléctrica del aula. Cada ESP8266 se configuró con una dirección IP estática dentro de la red del edificio, lo que permite direccionar individualmente el módulo asociado al computador, al video-beam o a las luminarias de cada salón.

La Fig. 6.14 muestra el módulo de relés que se implementó para la conmutación de cargas del aula, integrando el ESP8266 y el módulo de potencia dentro de una carcasa protectora para su instalación en las aulas.



Figura 6.14: Módulo de actuación basado en ESP8266 y relés, ensamblado e instalado en aula (fotografía real).

Interfaz de control mediante HTTP. El firmware de los ESP8266 implementa un pequeño servidor web utilizando la librería `ESP8266WebServer`. Cada módulo expone una ruta HTTP principal del tipo `/activar`, a la cual se accede mediante peticiones GET desde el backend en PHP. El comando de encendido o apagado se transmite a través de un parámetro de consulta (`activacion`) que toma valores 1 (encender) o 0 (apagar), por ejemplo:

```
http://172.31.0.111/activar?activacion=1
```

para activar el módulo asociado al computador del salón CR 4.1.

Al recibir una petición en la ruta `/activar`, el ESP8266:

1. Lee el valor del parámetro `activacion`.
2. Actualiza el estado interno del módulo (`lastState`) y conmuta el relé correspondiente mediante `digitalWrite()`.
3. Genera la respuesta HTTP confirmando la operación, que es utilizada por el script PHP para mostrar al usuario el resultado (“OK” o “Fallo”) en la interfaz web de control.

La lógica del servidor embebido incluye además mecanismos básicos de tolerancia a fallos: si el módulo pierde la conexión Wi-Fi durante la operación, se desactiva el servidor HTTP y se fuerza el paso a un estado seguro predefinido en los relés mediante la función `activarRelesPorDefecto()`, reintentando posteriormente la reconexión. Esto evita que un fallo de comunicación deje las cargas en un estado indeterminado.

Integración con la interfaz web y el sistema RFID. Desde el punto de vista del *backend*, la actuación sobre los dispositivos puede producirse por dos vías complementarias:

- **Acción manual desde la interfaz web.** El panel de control desarrollado en PHP y alojado en Apache presenta, para cada salón, botones de *Encendido* y *Apagado* asociados a las tres cargas principales (PC, video-beam e iluminación). Al pulsar uno de estos botones, el servidor ejecuta la función `enviarComando()`, que construye la URL correspondiente al módulo de relé (por ejemplo, `http://172.31.0.111/activar?activacion=1`) y envía el comando mediante *cURL*. La respuesta del módulo se muestra en pantalla como “OK” o “Fallo”, lo que permite al operador validar el resultado.
- **Acción automática condicionada por reservas y autenticación.** En operación automática, cada módulo de relé consulta periódicamente al servidor XAMPP, mediante una petición HTTP, el *estado lógico* que le corresponde (por ejemplo, `encender` o `apagar`) en función de la información almacenada en la base de datos. El script PHP que atiende esta petición combina la programación académica registrada en la tabla `classes_database` con los eventos de acceso provenientes del sistema RFID (almacenados en `tarjetas_detectadas`) y devuelve al módulo un valor simplificado (1 para encender, 0 para apagar). El firmware del ESP8266 de actuación interpreta esta respuesta y conmuta el relé correspondiente, de manera que el computador, el video-beam o las luminarias solo permanezcan alimentados cuando exista una reserva vigente y un ingreso válido reciente en el aula.

Gracias a esta integración, el estado de las cargas queda determinado por la combinación de la programación académica, los eventos de autenticación registrados en la base de datos y, en caso necesario, las acciones manuales realizadas desde el panel de control. El registro de los cambios de estado de los relés, junto con las mediciones de corriente del subsistema de sensado, permite reconstruir el patrón real de uso de cada dispositivo en las aulas.

Pruebas funcionales y coherencia con las mediciones. Durante la etapa de puesta en marcha se realizaron pruebas específicas para verificar la coherencia entre el estado lógico de los relés y las mediciones de corriente:

- En *estado ON*, se comprobó que la corriente medida por el sensor ACS712-20A se encontraba dentro del rango esperado para cada dispositivo (computador, video-beam e iluminación), considerando su potencia nominal y las variaciones propias de la carga.
- En *estado OFF*, se verificó que la corriente registrada se reducía a valores cercanos al nivel de ruido de medida, lo que indica la ausencia de corrientes de fuga significativas a través de los contactos del relé.
- Adicionalmente, se contrastó el estado de los relés reportado por el sistema de control con la presencia o ausencia de consumo en las series de corriente, descartando fallos de cableado o contactos trabados en los módulos de potencia.

Estas pruebas garantizaron que los comandos enviados desde el backend (ya fuera a través de la interfaz web o del flujo automático basado en RFID) se tradujeran de forma fiable en acciones sobre las cargas y que las mediciones de corriente reflejaran correctamente el resultado de dichas acciones, aspecto fundamental para la validez de los análisis de consumo energético desarrollados en este trabajo.

6.1.4.4. Mecanismo local de apagado coordinado de PC y video-beam

Con el fin de evitar cortes abruptos de energía en el computador y el video-beam del aula, se implementó un *servicio local* ejecutado en el propio PC del salón mediante un script en Python. Este componente actúa como puente entre el nodo IoT basado en ESP8266 y las interfaces de control del hardware del aula, de modo que el apagado de los equipos se realice primero por software, permitiendo que tanto el computador como el proyector completen su secuencia apropiada de cierre, y solo posteriormente se interrumpa la alimentación eléctrica mediante los relés del sistema CoMo.

Para poder instalar el intérprete de Python, las librerías necesarias y el propio script en los computadores institucionales, fue necesario contar con permisos de administrador sobre el sistema operativo. En coordinación con el área responsable, se habilitaron temporalmente dichos permisos para la cuenta utilizada en el proyecto y se desactivó de manera controlada el *software de congelamiento* con el que están configurados los equipos, el cual restaura el estado del sistema en cada reinicio. Esta desactivación temporal permitió realizar la instalación y la configuración del servicio de apagado coordinado.

El script, implementado en el archivo `sheetsAccess.py`, hace uso de las librerías `serial` (comunicación por puerto COM), `time` (temporización), `datetime` (marcas de tiempo para registro de eventos) y `subprocess` (ejecución de comandos del sistema operativo). En la inicialización se configura un puerto serial asociado al ESP8266 del aula (por ejemplo, COM4 a 115200 bps), desde el cual se reciben códigos numéricos simplificados que representan el estado de la sesión.

El script implementa un bucle de escucha continua: lee el dato enviado por el ESP8266, descarta líneas vacías o inválidas y, cuando obtiene un valor entero, lo interpreta como una señal de control.

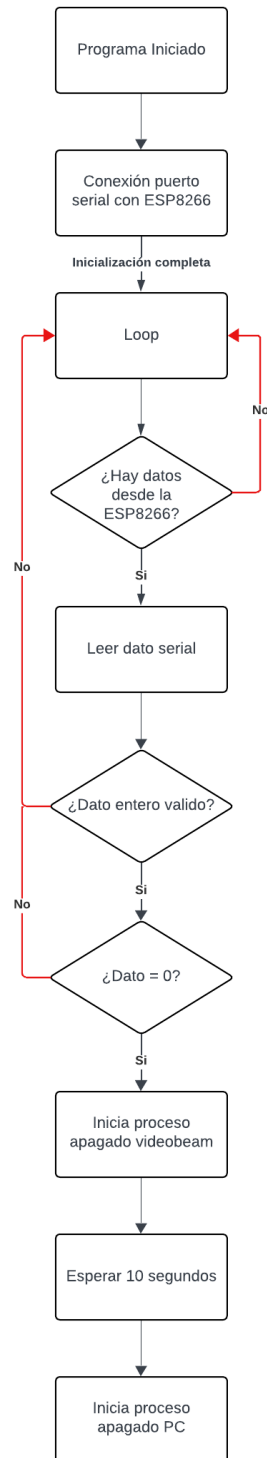


Figura 6.15: Diagrama de flujo del servicio local de apagado coordinado entre el PC y el video-beam, basado en la comunicación serial con el nodo ESP8266.

En la Figura 6.15 se presenta el diagrama de flujo que resume el funcionamiento general del servicio local de apagado coordinado, desde la inicialización del script hasta la ejecución de la secuencia de apagado de los equipos.

El valor 0 se utiliza como condición de apagado, asociada a eventos como el retiro definitivo de la tarjeta RFID o la finalización de la reserva, de acuerdo con la lógica descrita en el subsistema de autenticación.

Cuando se detecta el código de apagado, el programa ejecuta una secuencia ordenada de acciones orientada a garantizar un cierre correcto de los equipos antes de retirarles la energía. En primer lugar, abre un puerto serial dedicado al video-beam (por ejemplo, COM1 a 9600 bps) y envía el comando `PWR OFF°`, que indica al proyector que inicie su rutina interna de apagado. A continuación, el script espera un intervalo de seguridad de aproximadamente 10 s para asegurar su correcta ejecución mediante la función `time.sleep()`. Transcurrido este intervalo, se invoca la función `shutdown_pc()`, que utiliza la librería `subprocess` para ejecutar un comando del sistema que apaga el computador de forma controlada.

Para evitar ejecuciones redundantes, el script mantiene un indicador lógico interno (*flag event_processed*) que se activa una vez se ha completado la secuencia de apagado. De este modo, lecturas posteriores del mismo código 0, debidas a rebotes o retransmisiones en el canal serial, no vuelven a disparar el proceso de apagado mientras el evento ya se encuentra atendido. Adicionalmente, el uso de bloques `try/except` alrededor del bucle principal protege al servicio frente a errores de conversión de datos o desconexiones momentáneas de los puertos COM, evitando que el script termine de forma inesperada.

Una vez completada la secuencia de apagado por software del video-beam y del computador, se mantiene la alimentación durante una ventana adicional de seguridad. En particular, se definió un retardo de **1 min**, dando tiempo a que el video-beam y el computador completen su proceso de enfriamiento y cierre controlado; transcurrido este tiempo, el sistema ordena el **corte de alimentación** mediante los relés del subsistema de actuación. Con ello, la interrupción eléctrica ocurre únicamente después de que ambos equipos hayan ejecutado su rutina apropiada de apagado.

Este mecanismo local de apagado coordinado complementa la lógica de control basada en reservas y autenticación RFID: una vez que el sistema ha determinado que debe cerrar la sesión, el ESP8266 envía la orden correspondiente al PC, el script en Python apaga primero el video-beam y el computador por software, y solo después, cumplida la ventana de seguridad de 1 min, los relés del subsistema de actuación cortan la alimentación de manera segura. Con ello se reduce el riesgo de daños en los equipos por cortes bruscos de energía y se asegura un cierre ordenado de cada sesión de uso del aula. Adicionalmente, el script puede configurarse para ejecutarse automáticamente al iniciar el sistema operativo del PC, de modo que el servicio de apagado coordinado permanezca activo durante toda la jornada académica sin intervención del usuario.

6.1.5. Consumo eléctrico de los módulos electrónicos

En la Tabla 6.1 se resume el consumo de corriente de los dispositivos empleados en (i) el módulo de medición de corriente (ESP8266 + ACS712-20A), (ii) el módulo de autenticación RFID (ESP8266

+ MFRC522 + OLED + buzzer) y (iii) el subsistema de actuación por relés (ESP8266 + módulo de relé de 4 canales). Los valores corresponden a consumos típicos reportados en hojas de datos y especificaciones de módulos comerciales; por tanto, pueden variar con el modo de operación (p. ej., transmisión Wi-Fi, intensidad del campo RF del lector, brillo/porcentaje de píxeles encendidos en la pantalla, y número de relés energizados).

Dispositivo	Corriente típica	Condición/nota
ESP8266 (SoC)	50–56 mA	Recepción Wi-Fi (Rx), $V_{DD} = 3,3V$
ESP8266 (SoC)	120–170 mA	Transmisión Wi-Fi (Tx), $V_{DD} = 3,3V$
ESP8266 (SoC)	15 mA	Modem-sleep (mantiene asociación), $V_{DD} = 3,3V$
ESP8266 (SoC)	10 μA	Deep-sleep, $V_{DD} = 3,3V$
ACS712-20A	10 mA	Corriente de alimentación, $V_{CC} = 5V$
MFRC522	6.5 mA (DVDD)	$V = 3V$ (lógica); el total en operación suele ser $< 100mA$
MFRC522	7 mA (AVDD)	$V = 3V$ (analógico); depende de la etapa TX/antena
OLED 0.96" (SSD1306)	≈ 20 mA	Depende de píxeles activos/brillo (módulo comercial)
Buzzer activo 12 mm	30 mA	A 5V cuando está activado
Relé SRD-05VDC-SL-C	72 mA	Por relé energizado a 5V

Cuadro 6.1: Consumo típico de corriente de los dispositivos usados en CoMo.

Consumo por módulo (orden de magnitud). Para contextualizar el presupuesto de potencia, se consideran tres conjuntos:

- **Módulo de medición de corriente (ESP8266 + ACS712).** En operación con Wi-Fi, el consumo se encuentra dominado por el ESP8266 (decenas a centenas de mA en ráfagas de Tx/Rx), mientras que el ACS712 aporta aproximadamente 10mA. En conjunto, el consumo típico se ubica en el orden de 0.09A a 0.20A, dependiendo del tráfico Wi-Fi.
- **Módulo RFID (ESP8266 + MFRC522 + OLED + buzzer).** El consumo base incluye el ESP8266 y el lector MFRC522; adicionalmente, la pantalla OLED incrementa el consumo alrededor de 20mA. Cuando el buzzer se activa, se adicionan cerca de 30mA. En conjunto, el consumo típico se sitúa en el orden de 0.12A a 0.25A, según el régimen de lectura RFID, actividad de pantalla y ráfagas Wi-Fi.
- **Subsistema de relés (ESP8266 + relé 4 canales).** El consumo del módulo de relés depende del número de canales energizados: con cuatro relés activos, la corriente de bobinas es aproximadamente $4 \times 72mA = 288mA$, a lo que se suma el consumo del ESP8266. Sin embargo, durante el desarrollo del proyecto solo se usó un relé.

Consumo energético acumulado durante el proyecto. Para dimensionar el impacto energético de la electrónica auxiliar, se estimó la energía consumida por operación continua usando $E = P \cdot t$, con t en horas y P en watts. Durante el proyecto, el **módulo de medición de corriente**

permaneció encendido durante **60 días** (1440 h), mientras que el **subsistema de relés** y el **módulo RFID** operaron durante **30 días** cada uno (720 h). Adicionalmente, se mantuvo **un (1) relé energizado** de forma continua durante todo el periodo de 30 días.

Bajo estas condiciones, el consumo acumulado fue:

- **Módulo de medición de corriente (60 días):** $E \approx 0,452kWh$.
- **Subsistema de relés (30 días, 1 relé ON):** $E \approx 0,478kWh$.
- **Módulo RFID (30 días):** $E \approx 0,378kWh$.

6.1.6. Backend web, base de datos y APIs

6.1.6.1. Diseño de la base de datos MySQL

La gestión y trazabilidad de los datos fue un componente central en el desarrollo del sistema de monitoreo y control del proyecto **CoMo**. Para garantizar consistencia, integridad y reproducibilidad, se diseñó una arquitectura basada en un servidor local implementado mediante **XAMPP**, el cual integra el servidor web Apache, el intérprete PHP y el motor de base de datos MySQL. Esta integración permitió alojar de manera centralizada los componentes de *backend* y disponer de un entorno unificado para la adquisición, almacenamiento y consulta de información proveniente de los nodos IoT y del sistema RFID.

El motor MySQL de XAMPP se configuró de manera local, almacenando las bases de datos del sistema en el directorio `mysql/data`. Gracias a esta configuración, los microcontroladores ESP8266 pueden enviar información mediante solicitudes HTTP hacia los scripts PHP alojados en Apache, los cuales procesan los datos y realizan inserciones o consultas en MySQL. De esta forma, XAMPP funciona como un servidor IoT autónomo, sin dependencia de servicios externos y con control total sobre el flujo de datos.

Para hacer viable esta arquitectura dentro de la infraestructura de la universidad, se aprovisionó una máquina virtual Citrix con dirección IP estática 192.168.128.77, sobre la cual se instaló el entorno XAMPP del proyecto. Dicha máquina fue configurada de manera que pudiera alcanzar la VLAN 913 (asociada al direccionamiento 172.31.0.0/24), donde se encontraban los dispositivos IoT. Paralelamente, se crearon reglas de *firewall* específicas que permiten que la máquina virtual acceda a ese segmento de red, de modo que el servidor XAMPP pueda recibir y responder las peticiones de los ESP8266 conectados a la red de aulas.

En la práctica, los nodos ESP8266 obtienen direcciones IP dentro de la VLAN 913 (172.31.0.0/24) y envían solicitudes HTTP a la IP 192.168.128.77, donde se ejecutan los servicios Apache/PHP y el motor MySQL. De este modo, aunque los dispositivos y el servidor residen en subredes distintas, la configuración de enrutamiento y *firewall* permite que se comporten como si estuvieran dentro de un mismo dominio lógico de aplicación.

Adicionalmente, la máquina virtual fue configurada con permisos de administrador, lo que permitió instalar y ajustar el entorno de ejecución según los requerimientos del proyecto (versiones de Apache, PHP y MySQL, configuración de XAMPP y de la base de datos). El acceso remoto a esta

máquina se realizaba a través del servicio institucional *Mi PC Virtual*, empleando las credenciales de uno de los usuarios del equipo de trabajo. Esta modalidad de acceso permitió administrar el servidor, actualizar los scripts PHP y utilizar el panel web de control desde cualquier equipo con conexión a Internet, sin necesidad de estar físicamente en el campus.

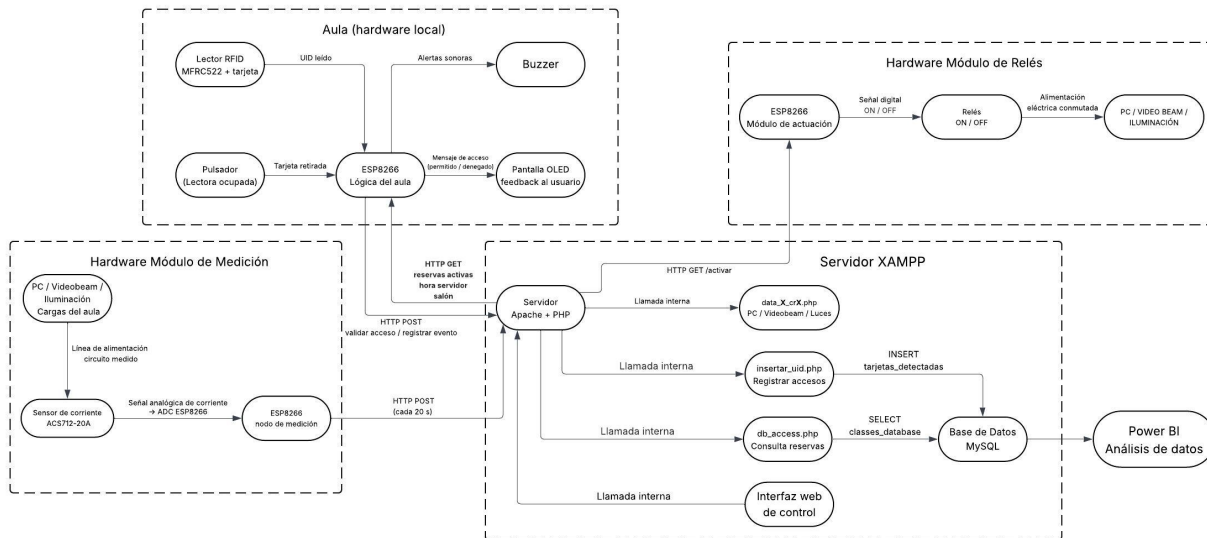


Figura 6.16: Arquitectura general de comunicación entre los nodos IoT instalados en el aula y el servidor XAMPP.

La Figura 6.16 resume el flujo de información del sistema: los dispositivos IoT en el aula envían datos de consumo y eventos de acceso al servidor Apache/PHP a través de la red dedicada de dispositivos; este registra la información en la base de datos MySQL y, posteriormente, los datos almacenados se utilizan tanto para el control de los dispositivos desde la interfaz web como para el análisis en Power BI.

6.1.6.2. Estructuración del sistema de bases de datos

El sistema se organizó en tres grupos principales de tablas, diseñadas para permitir el cruce entre consumo eléctrico, reservas académicas y eventos de acceso RFID.

1. Tablas de consumo eléctrico. Para cada salón intervenido (CR-4.1, CR-4.2 y CR-4.3) se crearon tres tablas independientes para registrar el comportamiento eléctrico del computador, el video-beam y la iluminación. Cada registro incluye:

- la marca temporal generada en el servidor al momento de recibir el dato;

DATE ▾ 1	AMPERAGE	POWER (W)
2025-10-27 07:11:32	1.842	221.04
2025-10-27 07:11:11	1.85	222
2025-10-27 07:10:51	1.844	221.28
2025-10-27 07:10:30	1.844	221.28
2025-10-27 07:10:09	1.86	223.2
2025-10-27 07:09:49	1.846	221.52
2025-10-27 07:09:28	1.842	221.04
2025-10-27 07:09:08	1.857	222.84
2025-10-27 07:08:47	1.849	221.88
2025-10-27 07:08:26	1.842	221.04
2025-10-27 07:08:06	1.845	221.4
2025-10-27 07:07:45	1.845	221.4
2025-10-27 07:07:25	1.853	222.36
2025-10-27 07:07:04	1.845	221.4
2025-10-27 07:06:43	1.844	221.28
2025-10-27 07:06:23	1.848	221.76
2025-10-27 07:06:02	1.846	221.52
2025-10-27 07:05:42	0.033	3.96
2025-10-27 07:05:21	0.14	16.8
2025-10-27 07:05:00	0.147	17.64
2025-10-27 07:04:40	0.034	4.08
2025-10-27 07:04:19	0.144	17.28
2025-10-27 07:03:59	0.033	3.96
2025-10-27 07:03:35	0.033	3.96
2025-10-27 07:03:15	0.037	4.44

Cuadro 6.2: Ejemplo de tabla de consumo eléctrico almacenada en la base de datos del sistema.

Como se observa en el cuadro 6.2, cada dispositivo del salón registraba de forma independiente los valores de corriente y potencia aparente en intervalos constantes de 20 segundos. Esta visualización corresponde a un solo sensor y evidencia la estructura uniforme utilizada para cada dispositivo y salón. La continuidad en los registros permitió analizar variaciones de carga, identificar patrones de uso y reconstruir de manera precisa el comportamiento energético a lo largo del día académico.

2. Tabla de reservas académicas institucionales. La tabla `classes_database` almacenó las reservas oficiales suministradas por la institución. Entre sus campos se incluyen:

- fecha de la clase;
- hora de inicio y de fin;
- salón asignado;
- identificador del docente responsable;
- UID RFID asociado al carnet del docente.

DATE_	START_TIME	END_TIME	FACILITY_ID	FIRST_NAME	LAST_NAME	TAG
2025-08-07	10:00	13:00	CR-4.2	GUSTAVO	ARTEAGA BOTERO	6E3B16E5
2025-08-07	16:00	18:00	CR-4.1	Adriano	Padilla	
2025-08-07	14:00	16:00	CR-4.1	ARTURO	HERREÑO MARIN	3BE853C3
2025-08-07	11:00	13:00	CR-4.1	JAIRO	ACOSTA ESCOBAR	04D2F9724C5180
2025-08-07	9:00	11:00	CR-4.1	DANIEL	NUÑEZ LOPEZ	5BA05DC3
2025-08-07	7:00	9:00	CR-4.1	DANIEL	NUÑEZ LOPEZ	5BA05DC3
2025-08-08	14:00	16:00	CR-4.1	WILLIAM	JURADO VALLEJO	36920FB7
2025-08-08	16:00	18:00	CR-4.3	ROBINSON	FERNANDEZ ROMERO	FBF256C3
2025-08-08	14:00	16:00	CR-4.3	ROBINSON	FERNANDEZ ROMERO	FBF256C3
2025-08-08	14:00	16:00	CR-4.2	LUIS	MONTALVO VIDAL	7BD457C3
2025-08-08	10:00	13:00	CR-4.2	ANA	GOMEZ ARANGO	B2066099
2025-08-08	7:00	10:00	CR-4.2	JULIAN	ARCE SANCHEZ	045644724C5180
2025-08-08	7:00	8:00	CR-4.1			
2025-08-08	9:00	11:00	CR-4.1	YOLANDA	JIMENEZ LEMOS	924C1D79
2025-08-08	11:00	13:00	CR-4.1	KATHERIN	MANCILLA MOSQUERA	
2025-08-08	16:00	18:00	CR-4.1	WILLIAM	JURADO VALLEJO	36920FB7
2025-08-09	8:00	12:00	CR-4.1	CARL	STELLA MOLINA	DBC455C3
2025-08-09	8:00	12:00	CR-4.2	Eliana Maria	De la Cruz Villarejo	BB5A55C3
2025-08-11	16:00	18:00	CR-4.2	JOHN	GALINDO SALGUERO	461208B7
2025-08-11	14:00	16:00	CR-4.2	JOHN	GALINDO SALGUERO	461208B7
2025-08-11	11:00	13:00	CR-4.2	ANGELA	ECHEVERRY PORTELA	4B2958C3
2025-08-11	9:00	11:00	CR-4.2	JOSE	TOFIÑO PEÑA	E6520FB7
2025-08-11	7:00	9:00	CR-4.2	JOSE	TOFIÑO PEÑA	E6520FB7
2025-08-11	14:00	16:00	CR-4.1	CARL	STELLA MOLINA	DBC455C3

Cuadro 6.3: Estructura de la tabla de reservas académicas institucionales

El cuadro 6.3 muestra la estructura interna de la tabla de reservas académicas utilizada por el sistema. La presencia del código RFID del docente fue fundamental, pues permitió comparar el UID detectado en el aula con el docente asignado y validar automáticamente si el acceso correspondía a un usuario autorizado. Asimismo, esta tabla permitió relacionar cada registro de acceso con su salón correspondiente y verificar que los ingresos ocurrieran dentro del horario programado.

3. Tabla de eventos RFID. La tabla `tarjetas_detectadas` registró todos los accesos detectados por los lectores RC522 instalados en cada salón. El sistema clasificaba automáticamente los eventos de la siguiente manera:

- *Ingreso*: cuando el UID coincidía con el docente asignado,
- *Retiro*: cuando el docente retiraba su tarjeta del lector,
- *no_auth*: cuando el UID no estaba autorizado para ese salón.

id	uid	fecha	hora	facility_id	estado
346	B2066099	2025-10-17	12:34:00	CR-4.2	Retiro
345	924C1D79	2025-10-17	11:00:00	CR-4.1	Retiro
344	B2066099	2025-10-17	09:54:00	CR-4.2	Ingreso
343	045644724C5180	2025-10-17	09:44:00	CR-4.2	Retiro
342	924C1D79	2025-10-17	09:02:00	CR-4.1	Ingreso
341	924C1D79	2025-10-17	09:01:00	CR-4.1	Ingreso
340	924C1D79	2025-10-17	09:01:00	CR-4.1	Retiro
339	924C1D79	2025-10-17	09:00:00	CR-4.1	Ingreso
338	045644724C5180	2025-10-17	07:03:00	CR-4.2	Ingreso
337	045644724C5180	2025-10-17	06:43:00	CR-4.2	no auth
336	CB705FC3	2025-10-15	15:35:00	CR-4.1	Retiro
335	CB705FC3	2025-10-15	13:52:00	CR-4.1	Ingreso
334	CB705FC3	2025-10-15	13:00:00	CR-4.2	Retiro
333	AA8A6D80	2025-10-15	12:57:00	CR-4.1	Retiro
332	CB705FC3	2025-10-15	11:08:00	CR-4.2	Ingreso
331	AA8A6D80	2025-10-15	11:00:00	CR-4.1	Ingreso
330	F63E08B7	2025-10-15	10:59:00	CR-4.2	Retiro
329	CB705FC3	2025-10-15	10:44:00	CR-4.1	Retiro

Cuadro 6.4: Registros del sistema RFID almacenados en la base de datos.

En el cuadro 6.4 se presenta el historial de accesos capturado mediante el sistema RFID. Cada registro incluye el UID detectado, la hora y fecha del evento, el salón correspondiente y el estado asignado por el sistema. Esta información permitió reconstruir el flujo real de ocupación de los salones, identificar accesos válidos y detectar intentos de ingreso no autorizados. La comparación con la tabla de reservas permitió validar el cumplimiento de los horarios académicos.

La combinación de las tablas de consumo eléctrico, reservas académicas y eventos RFID proporciona la base de datos necesaria para el análisis posterior en Power BI, donde se calculan los indicadores de consumo, uso dentro de reserva, eventos fuera de reserva y disponibilidad del sistema descritos en la sección de variables e indicadores.

6.1.6.3. Servicios PHP para sensores y RFID

Para gestionar el flujo de datos entre los dispositivos IoT y la base de datos, se desarrolló una capa de backend modular en PHP, organizada en los siguientes componentes principales:

- **Módulo central de conexión a MySQL.** Un archivo de configuración encargado de establecer la conexión con MySQL, manejar errores de conexión y exponer funciones reutilizables para ejecutar consultas e inserciones de forma segura.
- **Manejadores de sensores de corriente.** Scripts independientes asociados a cada sensor y salón, que reciben los parámetros enviados por los ESP8266 mediante solicitudes HTTP GET, validan su formato (rango de valores y tipo de dato) e insertan los registros en las tablas de consumo eléctrico correspondientes.
- **Módulo dedicado al sistema RFID.** Un script específico responsable de procesar los UIDs recibidos desde el lector RC522, validar los parámetros, registrar el evento en la tabla `tarjetas_detectadas` y clasificarlo como ingreso, retiro o no autorizado tras consultar la tabla `classes_database`.

Cada uno de estos scripts comparte la misma lógica de conexión a MySQL y encapsula las operaciones sobre un subconjunto de tablas, lo que reduce el acoplamiento entre componentes. Gracias a esta modularidad, una falla en un módulo, por ejemplo un sensor desconectado o un ESP8266 sin comunicación, no compromete el funcionamiento global del sistema.

6.1.6.4. Interfaz web para el control centralizado de los dispositivos

Además de la operación automática basada en reservas e identificación RFID, se desarrolló una interfaz web alojada en Apache para controlar manualmente los dispositivos de cada aula. Desde esta plataforma se podían encender y apagar el computador, el video-beam y las luces, lo que resultó esencial en situaciones en las que:

- el docente no portaba su carnet RFID,
- el docente no tenía un carnet asignado,
- el salón era utilizado para reuniones o eventos no académicos en los que no existía una reserva formal en la base de datos institucional.

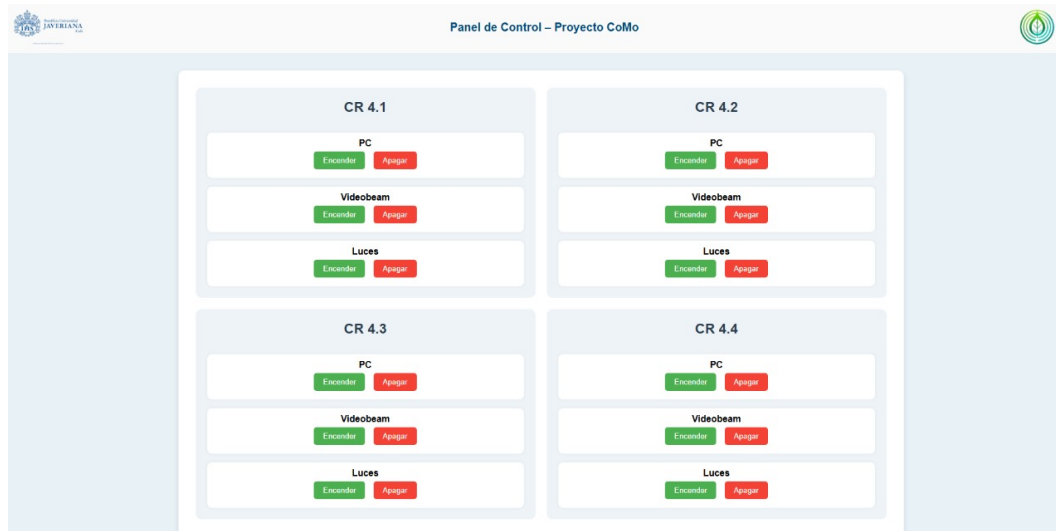


Figura 6.17: Interfaz web para el control centralizado de los dispositivos en cada salón.

La Figura 6.17 ilustra la interfaz desarrollada para el control de dispositivos. Para cada salón, se disponen botones de *Encendido* y *Apagado* asociados a las tres cargas principales (PC, video-beam e iluminación). Al activar uno de estos botones, el servidor ejecuta una función en PHP que construye la URL correspondiente al módulo ESP8266 (asociado al salón y dispositivo) y envía el comando mediante cURL a la ruta `/activar` del nodo de relés. La respuesta devuelta por el ESP8266 (por ejemplo, “OK” o “Fallo”) se muestra en la interfaz, permitiendo al usuario verificar el resultado de la operación.

Esta herramienta permitió operar los salones de manera flexible y garantizó el funcionamiento del sistema incluso en situaciones donde la automatización basada en reservas y RFID no era aplicable.

6.1.7. Procedimiento

El procedimiento seguido en este trabajo se estructuró en tres fases principales: una fase de línea base sin automatización, una fase de intervención en la que se diseñó e instaló el sistema CoMo y una fase de evaluación con el sistema ya operativo. En todas las fases se utilizó la misma estructura de tablas en MySQL, de modo que las variables e indicadores definidos en la Sección 6.5 pudieran calcularse de forma comparable antes y después de la intervención.

Fase 0: Pre-intervención (línea base)

El objetivo de esta fase fue caracterizar el comportamiento energético de las aulas sin automatización, de manera que sirviera como referencia para evaluar el impacto del sistema CoMo. En esta etapa los equipos se utilizaron de forma habitual por parte de los docentes y usuarios, sin restricciones adicionales.

- 1) **Instalación inicial de sensores de corriente.** Se instalaron los sensores ACS712-20A y los nodos ESP8266 en las líneas de alimentación del computador, el video-beam y las luminarias de cada aula de la muestra.
- 2) **Configuración del registro de datos.** Los ESP8266 se configuraron para medir la corriente eficaz de cada dispositivo y enviar una muestra cada 20 s al servidor local mediante solicitudes HTTP hacia los scripts PHP correspondientes. Cada registro se almacenó en MySQL con una marca de tiempo generada en el servidor, garantizando la trazabilidad temporal de las mediciones.
- 3) **Recolección de la línea base.** Durante 14 días consecutivos se registró de forma continua el consumo de cada dispositivo, sin modificar los hábitos de uso de los docentes ni la programación académica. En este periodo no se utilizaron lectores RFID ni controles automáticos; el encendido y apagado de los equipos se realizó de manera manual, como en la operación habitual del aula.
- 4) **Validación y depuración inicial de datos.** Al finalizar la recolección, se verificó la consistencia temporal de los registros (*timestamps*) y la continuidad de la serie de medición en el intervalo finalmente seleccionado para el análisis. En particular, para las fechas incluidas en el estudio no se identificaron huecos de datos ni fallos de registro que requirieran imputación o tratamiento correctivo. Por tanto, la depuración se concentró en delimitar el conjunto de datos al periodo de interés, acotándolo a dos meses de mediciones consecutivas: un mes correspondiente a la etapa de línea base (*Before*) y un mes posterior a la implementación del sistema (*After*). Los registros por fuera de este rango temporal se excluyeron del análisis con el fin de asegurar comparabilidad entre escenarios y homogeneidad en la ventana de observación.

Fase 1: Intervención (diseño y despliegue del sistema)

En esta fase se diseñó, implementó e integró el sistema COMO sobre las mismas aulas utilizadas en la línea base. El objetivo fue dotar a las aulas de mecanismos de identificación, control de cargas y registro de eventos que permitieran condicionar el uso de los dispositivos a las reservas académicas institucionales.

- 1) **Diseño detallado de la arquitectura IoT.** Se definió la arquitectura general del sistema, especificando los subsistemas de hardware (lectores RFID, módulos de relé, sensores de corriente y nodos ESP8266), el backend web basado en XAMPP (Apache, PHP, MySQL) y la capa de visualización en Power BI. Esta arquitectura se describe en detalle en la Sección 6.1.3.
- 2) **Instalación de módulos RFID y módulos de relé.** En cada aula se instaló el módulo RFID RC522, encargado de identificar el carnet del docente, y se configuraron los módulos de relé controlados por ESP8266 para conmutar la alimentación del computador, el video-beam y las luminarias. Se verificó el correcto funcionamiento eléctrico de los relés y la independencia entre los circuitos de control y de potencia.

- 3) **Integración con la base de datos de reservas.** Se importó la información institucional de reservas académicas a la tabla `classes_database` de MySQL y se estableció la asociación entre cada salón, cada franja horaria y el UID RFID del docente responsable. El firmware del lector RFID se programó para consultar en tiempo real esta base de datos a través de un script PHP, y así determinar si un acceso era autorizado o no.
- 4) **Implementación de reglas de control.** Se definieron y programaron las reglas que determinan el comportamiento del sistema: (i) al detectar un carnet válido dentro de una reserva vigente, el sistema habilita los relés de computador, video-beam e iluminación; (ii) al retirarse el carnet o finalizar la reserva, el sistema desactiva las cargas de forma controlada; (iii) los intentos de acceso con UIDs no autorizados se registran en la tabla de eventos RFID sin habilitar los dispositivos. Estas reglas se articulan con la lógica de los servicios PHP y de la base de datos descritos posteriormente.
- 5) **Integración con computador y video-beam.** Se configuró un mecanismo de apagado seguro del computador y de gestión del video-beam, de modo que, ante el retiro del carnet o la finalización de la reserva, el sistema pueda: (i) enviar el comando de apagado al PC mediante comandos CMD, y (ii) garantizar que el video-beam se apague de manera segura, mediante comandos por comunicación serial.
- 6) **Pruebas de integración y puesta en marcha.** Antes de iniciar la fase de evaluación, se realizaron pruebas en cada aula para verificar la cadena completa de funcionamiento: lectura de tarjetas, validación contra la base de datos de reservas, activación de relés, registro de eventos RFID y almacenamiento de las nuevas mediciones de corriente en MySQL. Una vez verificada la operación integral, el sistema se dejó funcionando en las aulas con uso académico real.

Fase 2: Post-intervención (evaluación con sistema activo)

La fase final tuvo como propósito observar el comportamiento de las aulas con el sistema COMO activo y comparar los resultados con la línea base obtenida en la Fase 0, utilizando las variables e indicadores definidos previamente.

- 1) **Operación en condiciones reales.** Durante 14 días consecutivos se mantuvo el sistema en funcionamiento en las aulas de la muestra. Los docentes utilizaron los salones de acuerdo con su programación habitual, accediendo mediante su carnet RFID o, en casos puntuales, mediante la interfaz web de control cuando la automatización basada en reservas no era aplicable.
- 2) **Monitoreo y registro de eventos.** En este periodo se registraron simultáneamente: (i) las mediciones de corriente de cada dispositivo, (ii) los cambios de estado de los relés, (iii) los eventos de acceso RFID (ingresos, retiros y accesos no autorizados), y (iv) la programación académica vigente. Toda esta información se almacenó en la base de datos MySQL con marcas de tiempo sincronizadas en el servidor.

- 3) **Consolidación de conjuntos de datos.** Finalizado el periodo de monitoreo, se exportaron los datos relevantes desde MySQL y se consolidaron en conjuntos de datos estructurados por aula, dispositivo y día de operación. Estos conjuntos de datos sirvieron de entrada a Power BI para el cálculo de las métricas definidas en la Sección de variables e indicadores, garantizando que la comparación entre la Fase 0 y la Fase 2 se realizara con la misma granularidad temporal y estructura de información.
- 4) **Preparación para el análisis estadístico.** Como paso previo al análisis, se verificó nuevamente la integridad de los datos (ausencia de huecos significativos, coherencia entre reservas y accesos, etc.) y se generaron las series agregadas necesarias (energía diaria, tiempos de uso, eventos fuera de reserva, *uptime* por nodo) que posteriormente se utilizaron en el plan de análisis descrito en la sección siguiente.

6.1.8. Plan de pruebas

Con el fin de verificar el funcionamiento correcto de cada uno de los componentes del sistema COMO y reducir el riesgo de fallos durante las campañas de medición en las aulas, se definió un plan de pruebas estructurado en tres niveles: (i) pruebas unitarias de cada subsistema de hardware y software, (ii) pruebas de integración por aula y (iii) pruebas de operación en condiciones reales. Siempre que fue posible, las pruebas en campo se realizaron en días sábado, aprovechando la baja ocupación de los salones para intervenir la infraestructura sin interferir con actividades académicas.

Pruebas unitarias de hardware y firmware

En primera instancia se comprobó el funcionamiento de cada subsistema por separado, en banco de pruebas y antes de la instalación definitiva en las aulas:

- **Nodo de autenticación RFID.** Se verificó la lectura estable del UID de las tarjetas mediante el lector MFRC522, la correcta actualización de los mensajes en la pantalla OLED y la generación de las tramas HTTP hacia el servidor XAMPP. Para ello se utilizaron tanto tarjetas autorizadas como no autorizadas, comprobando que el firmware distinguiera correctamente entre eventos de ingreso, retiro y acceso no permitido, y que el backend registrara los eventos en la base de datos correspondiente.
- **Nodos de medición de corriente.** Cada ESP8266 con sensor ACS712-20A se probó individualmente conectándolo a cargas resistivas conocidas y comparando el orden de magnitud de la corriente calculada con la lectura de una pinza amperimétrica. Sobre esta base se ajustaron los parámetros de conversión en el firmware y se comprobó el envío periódico de mediciones al servidor mediante solicitudes HTTP, así como su almacenamiento correcto en las tablas de consumo eléctrico.
- **Módulos de actuación (relés).** Se probó cada módulo ESP8266–relé de forma independiente, verificando que los comandos de encendido y apagado recibidos por HTTP se reflejaran

en la conmutación física de la carga (computador, video-beam o circuito de iluminación). Además, se comprobó que, en caso de pérdida de conexión WiFi o fallo de comunicación, el firmware llevara el relé a un estado seguro predefinido.

- **Servicio local de apagado en el PC del aula.** El script en Python ejecutado en el computador del salón se probó simulando las señales enviadas por el ESP8266 vía puerto serial. Se verificó que, al recibir la orden de apagado, el sistema ejecutara primero el comando de apagado controlado del video-beam y, tras un intervalo de seguridad, iniciara el apagado del computador, registrando los eventos para trazabilidad.

Estas pruebas unitarias se realizaron principalmente en laboratorio y en franjas horarias sin clases, validando el comportamiento básico de cada módulo antes de su integración con el resto del sistema.

Pruebas de integración por aula

Una vez verificado cada subsistema por separado, se llevaron a cabo pruebas de integración en cada una de las aulas instrumentadas. En estas pruebas se instaló el conjunto completo de dispositivos (nodo RFID, nodos de medición y módulos de relé para computador, video-beam e iluminación) y se comprobó el flujo de información extremo a extremo:

- lectura del carnet en el nodo RFID y envío del UID al servidor;
- validación del acceso contra la tabla de reservas académicas y clasificación del evento;
- activación o desactivación de los relés según la respuesta generada en el backend;
- registro de los eventos RFID y de los cambios de estado de los relés en la base de datos;
- envío periódico de mediciones de corriente desde los nodos de sensado y almacenamiento correcto en las tablas de consumo.

Estas pruebas se realizaron, simulando cuatro escenarios de uso bien definidos: (i) ingreso autorizado, (ii) intento de ingreso no autorizado, (iii) retiro del carnet durante la reserva y (iv) finalización de la franja horaria programada. En el periodo de una semana se llevaron a cabo exactamente tres sesiones completas de prueba por cada aula, ejecutando en cada sesión los cuatro escenarios anteriores. En total se realizaron 12 ejecuciones de escenario por aula (4 escenarios \times 3 repeticiones) y 36 ejecuciones para las tres aulas instrumentadas, verificando en cada una la coherencia entre el estado lógico esperado (según reservas y autenticación), el estado real de los dispositivos en el aula y las mediciones de corriente registradas.

Pruebas de operación en condiciones reales

Finalmente, se definieron periodos de operación extendida con el sistema instalado en las aulas y funcionando bajo las condiciones habituales de uso. Durante estos periodos:

- se monitoreó el comportamiento del sistema durante jornadas académicas completas, observando la respuesta ante el ingreso y retiro de los docentes, así como la transición entre clases consecutivas;
- se revisó periódicamente la integridad de los registros almacenados en la base de datos (mediciones de corriente, eventos RFID y estados de relés), identificando posibles huecos de datos o inconsistencias para su corrección;
- se validó que el sistema mantuviera su funcionamiento estable durante varias semanas, sin requerir reinicios manuales frecuentes de los nodos IoT ni del servidor XAMPP.

La combinación de pruebas unitarias, pruebas de integración por aula y pruebas de operación prolongada permitió depurar el firmware de los microcontroladores, ajustar parámetros de la base de datos y confirmar que cada dispositivo del sistema COMO cumpliera con el comportamiento esperado en condiciones reales de uso.

6.1.9. Procesamiento de datos y cálculo de energía

Los nodos de medición del sistema COMO registran de forma periódica la corriente eficaz (I_{RMS}) consumida por cada dispositivo del aula (computador, video-beam e iluminación), enviando una muestra aproximadamente cada 20 s al servidor. A partir de estas mediciones se realiza un procesamiento posterior con el fin de (i) estimar la potencia eléctrica asociada a cada muestra, (ii) integrar dicha potencia en el tiempo para obtener energía en kWh por intervalos y por día, y (iii) derivar métricas de impacto económico y de uso fuera del horario académico, coherentes con los indicadores definidos en la Sección 6.1.10.

6.1.9.1. Preparación y sincronización temporal de registros

Cada registro recibido por el backend se almacena en MySQL con una marca temporal (`REAL_TIME`) generada en el servidor, lo que permite disponer de una línea de tiempo consistente entre salones, dispositivos y días. Con base en esta marca temporal se ordena la serie de muestras de cada *salón-dispositivo* y se calcula el intervalo transcurrido entre mediciones consecutivas:

$$\Delta t_i = t_i - t_{i-1}, \quad (6.6)$$

donde t_i corresponde al sello temporal de la muestra i . Para efectos de cálculo de energía, el intervalo se expresa en segundos ($\Delta t_{i,s}$). Esta estrategia permite manejar pequeñas variaciones en la periodicidad de envío (por congestión de red o latencia del servidor) y evita asumir un muestreo estrictamente uniforme.

6.1.9.2. Estimación de potencia eléctrica por muestra

Dado que el sistema mide corriente eficaz y no realiza medición directa de potencia activa mediante tensión instantánea, la potencia eléctrica asociada a cada muestra se estima a partir de la

potencia aparente:

$$S_i \approx V_{\text{nom}} \cdot I_{\text{RMS},i}, \quad (6.7)$$

donde V_{nom} es la tensión nominal de alimentación del aula ($V_{\text{nom}} = 120 \text{ VAC}$) e $I_{\text{RMS},i}$ la corriente eficaz medida en la muestra i . Para aproximar la potencia activa se utiliza un factor de potencia constante FP :

$$P_i \approx S_i \cdot FP. \quad (6.8)$$

En este estudio se adoptó $FP = 0,93$, valor representativo de cargas típicas presentes en aulas (computadores, proyectores y luminarias), y suficiente para fines comparativos antes/después bajo el mismo supuesto técnico.

6.1.9.3. Cálculo de energía incremental e integración diaria

La energía incremental asociada al intervalo i se calcula mediante una integración discreta de la potencia en el tiempo:

$$\Delta E_i = P_i \cdot \Delta t_{i,s}. \quad (6.9)$$

Para expresar la energía en kWh se realiza la conversión correspondiente:

$$\Delta E_{i,\text{kWh}} = \frac{P_i \cdot \Delta t_{i,s}}{3600 \cdot 1000}. \quad (6.10)$$

En la implementación práctica dentro del modelo de Power BI, este cálculo se expresa como:

$$\Delta E_{i,\text{kWh}} = \frac{(S_i \cdot FP) \cdot \Delta t_{i,s}}{3600 \cdot 1000}, \quad (6.11)$$

lo que equivale a la medida computada en el modelo (`DELTA_KW/H`). La energía total en una ventana de análisis T (por ejemplo, un día) se obtiene como:

$$E_T = \sum_{i \in T} \Delta E_{i,\text{kWh}}, \quad (6.12)$$

correspondiente a la medida agregada (`Total_Energy_KW/H`) utilizada en el capítulo de resultados.

6.1.9.4. Agregación temporal para análisis y visualización

Con el fin de analizar patrones horarios y facilitar la comparación entre días, las series de corriente y energía se agregan en ventanas temporales (por ejemplo, por hora y por intervalos de 5 minutos). Para ello se construyen variables de agrupación a partir de la marca temporal (hora del día y bloques de minutos), lo cual permite calcular promedios de corriente y energía por franja horaria, además de visualizar el encendido de equipos en periodos nocturnos o sin actividad académica.

6.1.9.5. Conversión a costo económico

Para expresar el impacto del consumo energético en términos monetarios, la energía calculada se convierte a costo aplicando una tarifa de referencia C_{kWh} :

$$\text{Costo}_T = E_T \cdot C_{\text{kWh}}. \quad (6.13)$$

En el modelo se empleó una tarifa constante de $C_{\text{kWh}} = 620$ COP/kWh, (Este valor fue suministrado por el responsable del área de Recursos Físicos de la Pontificia Universidad Javeriana Cali y corresponde a una tarifa representativa del costo institucional de la energía eléctrica durante el periodo de estudio.) permitiendo estimar el costo diario total y el costo asociado específicamente al consumo fuera del horario académico. Esta conversión se utiliza para reportar resultados en unidades económicas y facilitar la interpretación del beneficio potencial del sistema CoMo.

6.1.10. Variables e indicadores

El diseño metodológico del proyecto **CoMo** requiere definir con claridad qué aspectos del comportamiento energético de las aulas se van a medir y cómo se van a cuantificar. En este contexto, las variables se organizan en torno a tres ejes principales: el *consumo energético*, el *uso efectivo de los dispositivos* y la *coherencia entre dicho uso y la programación académica institucional*. De manera complementaria, se considera el *impacto económico* asociado al consumo energético, con el fin de expresar los resultados en términos comprensibles para la toma de decisiones.

La Tabla 6.5 resume la operacionalización de las variables e indicadores definidos para el estudio, especificando su unidad de medida, frecuencia de análisis y el procedimiento conceptual de cálculo asociado a cada uno.

Variable	Indicador	Unidad	Frecuencia	Fuente / Cálculo conceptual
Consumo energético	Energía consumida por aula	kWh	Diario	Integración discreta de la potencia eléctrica a lo largo del tiempo: $E = \sum P(t) \cdot \Delta t$
Uso de dispositivos	Tiempo total de operación	min / h	Diario	Suma de los intervalos de tiempo en los que se registra operación de los dispositivos
Coherencia con la programación	Porcentaje de uso fuera del horario académico	%	Diario	$\%H_{\text{fuera}} = \frac{H_{\text{fuera}}}{H_{\text{no programado}}} \times 100$, donde $H_{\text{no programado}}$ corresponde al total de horas sin programación académica
Uso no autorizado	Consumo energético fuera de horario	kWh	Diario	Energía consumida durante intervalos en los que no existe programación académica vigente para el aula
Impacto económico	Costo del consumo energético	COP	Diario	Conversión del consumo energético a costo monetario mediante una tarifa eléctrica de referencia

Cuadro 6.5: Operacionalización conceptual de las variables e indicadores del estudio.

El **consumo energético** se cuantifica mediante la energía eléctrica consumida por cada aula en un periodo de análisis determinado. Este indicador se obtiene a partir de la integración de la potencia eléctrica a lo largo del tiempo y permite comparar el comportamiento energético antes y después de la implementación del sistema COMO.

La variable **uso de dispositivos** describe el tiempo efectivo durante el cual los equipos del aula (computador, video-beam e iluminación) permanecen en operación, independientemente de si dicho uso coincide o no con la programación académica. Esta variable se utiliza como base para la construcción de los indicadores energéticos y de coherencia definidos en el estudio.

La **coherencia con la programación académica** se evalúa mediante el *porcentaje de uso fuera del horario académico*, definido como la fracción del tiempo en el que se detecta operación de los dispositivos respecto al tiempo total en el que no debería existir uso del aula por ausencia de programación académica. Este indicador constituye la métrica central del estudio, dado que el objetivo del sistema COMO es reducir el consumo energético innecesario sin afectar el desarrollo normal de las actividades académicas.

El indicador de **consumo energético fuera de horario** complementa el análisis temporal al cuantificar la energía efectivamente consumida durante los periodos no autorizados. Esta variable permite establecer una relación directa entre el uso fuera de horario y su impacto energético real.

Finalmente, el **impacto económico** expresa el consumo energético en términos de costo monetario, mediante la aplicación de una tarifa eléctrica de referencia. Este indicador permite dimensionar el beneficio del sistema no solo desde el punto de vista técnico, sino también económico, facilitando la evaluación de su viabilidad y escalabilidad.

6.1.11. Plan de análisis

El análisis de los datos se orienta a evaluar el impacto del sistema COMO en la reducción del consumo energético no autorizado en las aulas, comparando el comportamiento previo y posterior a su implementación. El énfasis del análisis no se centra en la optimización del consumo durante el uso académico legítimo, sino en la disminución del consumo energético en periodos sin programación académica.

El plan de análisis combina técnicas de análisis descriptivo, agregación temporal y visualización comparativa, empleando los indicadores definidos en la Sección 6.1.10. Todas las métricas se calculan por aula y por tipo de dispositivo (computador, video-beam e iluminación), y se agrupan en ventanas diarias y horarias según corresponda.

Construcción de indicadores diarios. En una primera etapa, se calculan en Power BI los indicadores diarios a partir de los registros almacenados en la base de datos, entre los cuales se incluyen:

- Energía total consumida por aula y por dispositivo (kWh).
- Porcentaje de uso fuera del horario académico respecto al tiempo total no programado.
- Energía consumida fuera del horario académico (kWh).
- Costo económico asociado al consumo energético total y al consumo fuera de horario (COP).

Las variables temporales asociadas al tiempo de operación de los dispositivos se utilizan como insumo para el cálculo de estos indicadores, pero no constituyen métricas de análisis independientes.

Comparación entre días equivalentes. Con el fin de garantizar comparaciones justas, el análisis se realiza principalmente entre pares de días equivalentes, correspondientes al mismo día de la semana y con programación académica comparable, uno previo y otro posterior a la implementación del sistema. Esta estrategia permite aislar el efecto del sistema COMO de variaciones naturales en el uso del aula asociadas a cambios en la carga académica.

Métricas de impacto del sistema. Sobre los pares de días equivalentes se calculan métricas de diferencia antes/después, tales como:

- Reducción relativa del porcentaje de uso fuera del horario académico.
- Reducción de la energía consumida fuera de horario (kWh).
- Ahorro económico diario asociado a la disminución del consumo no autorizado.

Estas métricas permiten cuantificar de manera directa el efecto del sistema sobre el problema que motiva el estudio: el consumo energético de las aulas en ausencia de actividad académica.

Análisis temporal y visualización. Para facilitar la interpretación de los resultados, se emplean visualizaciones basadas en series temporales de corriente y energía, agregadas por hora y por intervalos de cinco minutos. Estas gráficas permiten identificar de forma clara la presencia de consumo energético durante periodos nocturnos o sin clase en la etapa previa, así como su disminución posterior a la implementación del sistema.

Adicionalmente, se utilizan gráficos comparativos (barras y tarjetas de resumen) para representar la energía total diaria, la energía fuera de horario y el costo económico asociado, permitiendo una comparación intuitiva entre los escenarios antes y después.

Análisis agregado por día de la semana y por dispositivo. Como complemento al análisis por días equivalentes, se realiza un análisis agregado por día de la semana y por tipo de dispositivo, con el objetivo de evaluar la consistencia del comportamiento observado y descartar que los resultados correspondan a un único día atípico. Este análisis permite identificar patrones recurrentes y validar la generalización del efecto del sistema COMO.

Los resultados obtenidos a partir de este plan de análisis se presentan y discuten en el capítulo de resultados, estableciendo su relación con los objetivos del proyecto y con el marco conceptual de control del consumo energético en entornos académicos.

6.1.12. Gestión de datos, análisis y reproducibilidad

6.1.12.1. Integración con Power BI

Para el análisis de la información, las tablas almacenadas en MySQL se integraron en Power BI mediante consultas estandarizadas y procesos de exportación en formato compatible. A partir de esta integración se construyó un modelo de datos que permite relacionar de manera consistente las mediciones de consumo eléctrico con los registros de programación académica y los eventos de acceso capturados por el sistema COMO, preservando la trazabilidad temporal mediante las marcas de tiempo generadas en el servidor.

Sobre este modelo se implementaron las métricas definidas en el plan de análisis, orientadas a la cuantificación del consumo energético, la identificación de uso fuera del horario académico y la estimación del impacto económico asociado. Las variables temporales derivadas del tiempo de operación de los dispositivos se utilizaron como insumo para el cálculo de estos indicadores, sin constituir métricas de análisis independientes.

Power BI facilitó la agregación temporal de las series de corriente y energía (por hora y por intervalos de minutos), permitiendo visualizar patrones de encendido, identificar consumos no asociados a actividad académica y sintetizar los resultados por aula y por tipo de dispositivo. Asimismo, se desarrollaron paneles interactivos que permitieron comparar la línea base con la etapa posterior a la implementación del sistema de automatización.

En síntesis, la integración con Power BI proporcionó un entorno reproducible para el procesamiento, la visualización y la consolidación de los datos experimentales, apoyando la identificación de tendencias de consumo y la elaboración de las figuras y resultados presentados en el capítulo correspondiente.

6.1.12.2. Estrategias de respaldo y replicabilidad

Las estrategias de respaldo y replicabilidad del sistema COMO se orientan a dos propósitos principales: conservar de forma segura la información recolectada y facilitar que la solución pueda volver a desplegarse en otro equipo o ampliarse a nuevos entornos. Para ello, se definieron prácticas mínimas de copia, organización y documentación de los datos y de la configuración del servidor, de manera que el sistema no dependa de una única máquina.

Además de los mecanismos de respaldo, el diseño del sistema COMO contempla un esquema de escalabilidad que permite adaptar e implementar la solución en otros salones y edificios de la universidad, manteniendo la misma lógica de funcionamiento. Este esquema se puede analizar en varios niveles:

- **Nivel de campo y nodos IoT.** En cada aula, la arquitectura se basa en la repetición de un patrón de nodos: un ESP8266 dedicado a la medición de corriente y un ESP8266 asociado a un módulo de relé por cada dispositivo a controlar (computador, video-beam e iluminación). Para extender el sistema a nuevos salones, basta con replicar este conjunto de nodos por carga, respetando el esquema de direccionamiento IP y la configuración de las peticiones HTTP hacia el servidor central.
- **Nivel de red y direccionamiento IP.** El despliegue actual utiliza una VLAN dedicada (VLAN 913, con direccionamiento 172.31.0.0/24) para los dispositivos IoT, lo que aísla su tráfico del resto de la red. El mismo enfoque se puede aplicar a otros pisos o edificios creando nuevas VLANs para sus nodos IoT (con rangos de direcciones análogos) y rutas específicas hacia el servidor o los servidores que ejecutan XAMPP. Mientras se mantenga un esquema de direccionamiento coherente y reglas de *firewall* que permitan el flujo de tráfico entre las VLANs de dispositivos y las máquinas virtuales, nuevos grupos de aulas pueden integrarse sin modificar la lógica interna de los nodos.
- **Nivel de servidor y servicios centrales.** El servidor virtual configurado en la IP 192.168.128.77, que ejecuta Apache, PHP y MySQL mediante XAMPP, puede actuar como nodo central para múltiples aulas siempre que la carga de trabajo (número de salones y frecuencia de envío de datos) se mantenga dentro de límites razonables para una máquina virtual de uso académico. En la práctica, esto implica que la cantidad de nodos ESP8266 (cada uno enviando mediciones cada 20 segundos y generando solicitudes HTTP de acceso RFID de forma esporádica) no debe saturar la capacidad de procesamiento del servidor (CPU), la memoria disponible (RAM) ni el espacio de almacenamiento asignado a la base de datos. Si se proyecta un crecimiento significativo en el número de aulas o en la frecuencia de muestreo, el sistema puede escalarse mediante la creación de nuevas máquinas virtuales que repliquen la configuración actual de XAMPP, distribuyendo los salones entre varios servidores lógicos. Mientras se mantenga un esquema coherente de direccionamiento, enrutamiento y estructura de base de datos, cada instancia adicional puede operar como un nodo central independiente dentro de la misma solución COMO.

- **Nivel de datos y configuración de software.** La estructura de tablas definida en MySQL (consumo eléctrico por salón y dispositivo, reservas académicas y eventos RFID), junto con los scripts PHP modulares, permite que la incorporación de nuevos salones se limite principalmente a la parametrización: creación de nuevas entradas o tablas siguiendo los mismos esquemas, actualización de las configuraciones de aula y registro de los nuevos nodos ESP8266. El uso de archivos de configuración documentados y de una convención clara para la definición de tablas y campos facilita replicar esta estructura en otras máquinas virtuales, manteniendo la consistencia de los datos y la lógica de procesamiento.

En conjunto, las estrategias de respaldo, la modularidad de los nodos IoT y la segmentación lógica de la red permiten que el sistema COMO no sólo pueda restaurarse ante fallos, sino también escalar progresivamente a nuevos espacios del campus, preservando su comportamiento funcional y la comparabilidad de los datos entre diferentes aulas y edificios. .

6.1.13. Consideraciones éticas y permisos

El sistema COMO fue diseñado y desplegado procurando minimizar el tratamiento de datos personales y evitando cualquier intervención directa sobre estudiantes. El foco del proyecto es el monitoreo y control del consumo energético de los dispositivos instalados en las aulas (computador, video-beam e iluminación), así como la evaluación de la coherencia entre el uso de estos equipos y la programación académica institucional.

Datos recolectados y seudonimización

Los datos almacenados en la base de datos se pueden agrupar en tres categorías:

- **Variables eléctricas:** corriente eficaz, potencia aparente y marcas de tiempo asociadas a cada dispositivo y salón. Estos registros describen el comportamiento energético de los equipos, sin incluir información identificable de personas.
- **Reservas académicas:** información de la tabla `classes_database`, que contiene fecha, horas de inicio y fin, salón asignado y el identificador del docente responsable. Para efectos de análisis, esta información se maneja a nivel de salón y franja horaria, sin necesidad de reportar nombres propios en los resultados.
- **Eventos RFID:** registros de la tabla `tarjetas_detectadas`, que incluyen el UID de la tarjeta, la marca temporal, el salón y el tipo de evento (ingreso, retiro, no autorizado). El UID se utiliza únicamente como identificador técnico dentro del sistema y no se asocia explícitamente a nombres de estudiantes; en los análisis se trabaja con información agregada.

En ningún momento se recolectaron notas, calificaciones, datos sensibles de estudiantes ni información relativa a su desempeño académico. La identificación de los usuarios se limita a roles (docente responsable del salón) y a UIDs seudonimizados, utilizados exclusivamente para validar el acceso a las aulas en concordancia con la programación oficial.

Permisos institucionales y alcance de la intervención

La intervención se restringió a la infraestructura física de las aulas (instalación de sensores de corriente, módulos de relé y nodos de identificación RFID) y al acceso controlado a la información de reservas académicas requerida para la lógica de habilitación de uso. En este sentido, el diseño, despliegue e integración del sistema COMO se realizó bajo los lineamientos institucionales de seguridad de la información definidos por el CSI (Centro de Servicios Informáticos), y con los permisos correspondientes de la Universidad para operar sobre su infraestructura y fuentes de datos.

Previo a la instalación y durante la fase de puesta en marcha, se sostuvieron reuniones de socialización y revisión técnica con el CSI, orientadas a (i) delimitar el alcance de la intervención, (ii) validar el esquema de conectividad y operación del sistema dentro de la red institucional, y (iii) establecer criterios de acceso, manejo y protección de la información utilizada (p. ej., uso exclusivamente operativo de la programación académica, y control de privilegios y credenciales de conexión). De forma complementaria, se coordinó con el personal de Recursos Físicos para autorizar y acompañar a la instalación de los sensores y módulos de control, garantizando la compatibilidad con las condiciones de seguridad eléctrica y de mantenimiento de las aulas.

Para ello se contó con la autorización de las dependencias responsables de:

- la administración de los espacios físicos y la infraestructura eléctrica (instalación de sensores y módulos de control en canaletas), en coordinación con Recursos Físicos, y
- la gestión de la programación académica (uso de la información de reservas como fuente operativa para la base de datos `classes_database` del sistema COMO), bajo los criterios y recomendaciones del CSI para su acceso y tratamiento.

El proyecto no modificó la malla curricular ni la dinámica académica de los cursos; los docentes utilizaron las aulas de acuerdo con la programación habitual, y la interacción con el sistema de autenticación RFID se limitó a la presentación del carnet institucional o al uso de la interfaz web en casos puntuales. No se realizaron encuestas ni intervenciones directas con estudiantes que requirieran consentimiento informado individual.

Seguridad eléctrica y operación segura del sistema

Dado que el sistema interviene circuitos de alimentación de computador, video-beam e iluminación mediante módulos de relé, se prestó especial atención a la seguridad eléctrica:

- Los módulos de relé empleados proporcionan aislamiento entre la lógica de control (baja tensión) y los conductores de potencia, reduciendo el riesgo de choques eléctricos en los microcontroladores y en el personal que manipula el sistema.
- La instalación de sensores y relés se realizó en cajas de paso y canaletas adecuadas, evitando conductores expuestos y respetando la capacidad de los elementos de conmutación para las corrientes nominales de los dispositivos controlados.

- Se verificó que, en caso de fallo de comunicación o reinicio de los nodos, los módulos de actuación adoptaran un estado seguro definido en el firmware, evitando que las cargas quedaran en estados indeterminados.

Estas medidas garantizan que la introducción del sistema COMO no comprometa la seguridad eléctrica de las aulas ni de sus usuarios.

Uso de la información y difusión de resultados

Los datos recolectados se utilizan exclusivamente con fines académicos y de investigación, para evaluar el impacto del sistema de automatización sobre el consumo energético y sobre el uso de las aulas. Los resultados se presentan de forma agregada por salón, dispositivo y periodo de tiempo, sin identificar individualmente a docentes ni estudiantes.

En la difusión de resultados (informes internos, capítulos de la tesis y posibles publicaciones) se evita divulgar UIDs completos, nombres propios u otra información que permita identificar de manera directa a personas específicas. El énfasis se mantiene en los patrones de uso y en las métricas de consumo, coherencia con reservas y disponibilidad del sistema.

Resultados y Discusión

7.1. Resultados y discusión

En esta sección se presentan los resultados obtenidos a partir de los datos recolectados por el sistema COMO durante las fases *Before* (línea base sin automatización) y *After* (operación con el sistema activo). El análisis se construye a partir de las métricas definidas en la Sección 6.1.10 y del procesamiento descrito en la Sección 6.1.9, con el objetivo de evaluar el impacto del sistema sobre el consumo energético no autorizado, particularmente durante periodos sin programación académica.

Cabe resaltar que el análisis en Power BI y la plataforma de visualización con tableros (*dashboards*) interactivos fueron desarrollados exclusivamente como herramienta de validación del desempeño del sistema durante este estudio (comparación *Before/After*). En consecuencia, este componente de analítica y visualización no constituye como parte del sistema COMO para una eventual operación institucional; su inclusión en un despliegue futuro dependería de los requerimientos de la Universidad. No obstante, la solución puede adaptarse para integrar este tipo de visualización y seguimiento si se decide escalar la implementación.

7.1.1. Descripción general del conjunto de datos

Los registros analizados corresponden a mediciones periódicas de corriente eficaz (I_{RMS}) enviadas por nodos ESP8266 aproximadamente cada 20 s para tres tipos de carga por aula: computador (PC), video-beam (VB) e iluminación (Light). Cada muestra se almacena con marca temporal generada en el servidor y se integra en Power BI para estimar energía incremental ($\Delta E_{i,\text{kWh}}$) y energía total por ventanas de análisis (por ejemplo, diaria), así como su equivalente económico usando $C_{\text{kWh}} = 620 \text{ COP/kWh}$.

Para facilitar la exploración y comparación, las series se agregaron también en ventanas horarias y en bloques de 5 minutos (variable `HOUR_MINUTE_5`), lo que permite visualizar patrones de encendido dentro y fuera del horario de clases con suficiente resolución temporal.

Variación de la programación académica

Durante el periodo de estudio, la programación de clases en las aulas analizadas no se mantuvo estrictamente constante. Algunas asignaturas iniciaron a mitad de semestre y, en ciertos casos, se añadieron actividades académicas adicionales, lo que incrementó la carga total de reservas en el escenario *After*. En consecuencia, el consumo energético *total* antes/después puede estar influenciado no solo por la presencia del sistema COMO, sino también por un mayor uso legítimo del aula derivado de un aumento en las horas de clase.

Para contextualizar este fenómeno, las Figuras 7.3–7.4 presentan ejemplos de la programación académica (*Before* y *After*) para las aulas CR4.1, CR4.2 y CR4.3. En general, se observa que el escenario *After* incorpora un mayor número de franjas horarias programadas, lo cual puede explicar por qué, en ciertos días de la semana, el consumo total entre escenarios resulta similar o incluso mayor tras la implementación del sistema.

Esta evidencia respalda la interpretación de los resultados en dos niveles complementarios: (i) un panorama global de energía y costo, útil como referencia general; y (ii) un análisis específico del uso y consumo energético fuera del horario académico, que corresponde directamente al objetivo funcional del sistema COMO: eliminar consumo innecesario en periodos sin reserva, sin afectar el uso legítimo del aula.

2025-08-19

Saliz½ CR: Cedros Rosado

CR-4.1: Cedro Rosado 4.1

Desde	Hasta	Asignatu	Grupo	Profesor
07.00	11.00	300AAF002	B	ANDRES QUINTANA VARGAS
11.00	13.00	300EIH001	J	IVAN FAJARDO NIÑO
14.00	15.30	300PSI024	C	KEWY SARSOSA PROWESK

Cuadro 7.1: Programación académica del aula CR4.1 en un día representativo del escenario *Before*.

2025-09-23

Saliz½ CR: Cedros Rosado

CR-4.1: Cedro Rosado 4.1

Desde	Hasta	Asignatu	Grupo	Profesor
07.00	11.00	300AAF002	B	ANDRES QUINTANA VARGAS
11.00	13.00	300EIH001	J	IVAN FAJARDO NIÑO
13.00	14.00			TATIANA RIOS GARCIA
14.00	15.30	300PSI024	C	KEWY SARSOSA PROWESK

Cuadro 7.2: Programación académica del aula CR4.1 en un día representativo del escenario *After*.

2025-08-19**Salí ½ CR: Cedros Rosado****CR-4.2: Cedro Rosado 4.2**

Desde	Hasta	Asignatu		Grupo	Profesor
07.00	09.00	300LML025	Italiano Básico I	B	CARLOS GUERRERO ZAPATA
09.00	11.00	300LML025	Italiano Básico I	ITB1	CARLOS GUERRERO ZAPATA
11.00	13.00	300EIH001	Humanidades I	F	María Camila Sanabria Cucalón
14.00	16.00	300PSG033	Cátedra el Amor	B	YAMILE RODRIGUEZ ALARCON

Cuadro 7.3: Programación académica del aula CR4.2 en un día representativo del escenario *Before*.**2025-09-23****Salí ½ CR: Cedros Rosado****CR-4.2: Cedro Rosado 4.2**

Desde	Hasta	Asignatu		Grupo	Profesor
07.00	09.00	300LML025	Italiano Básico I	B	CARLOS GUERRERO ZAPATA
09.00	11.00	300LML025	Italiano Básico I	ITB1	CARLOS GUERRERO ZAPATA
11.00	13.00	300EIH001	Humanidades I	F	María Camila Sanabria Cucalón
13.00	14.00		charlas informativas de apertura al		TATIANA RIOS GARCIA
14.00	16.00	300PSG033	Cátedra el Amor	B	YAMILE RODRIGUEZ ALARCON

Cuadro 7.4: Programación académica del aula CR4.2 en un día representativo del escenario *After*.**2025-08-18****Salí ½ CR: Cedros Rosado****CR-4.3: Cedro Rosado 4.3**

Desde	Hasta	Asignatu		Grupo	Profesor
14.00	16.00	300LEI066	English 6	B	MARCO VALENCIA BOTERO
16.00	18.00	300LEI066	English 6	C	MARCO VALENCIA BOTERO

2025-08-19**Salí ½ CR: Cedros Rosado****CR-4.3: Cedro Rosado 4.3**

Desde	Hasta	Asignatu		Grupo	Profesor
14.00	17.00	300AAF012	Urbanismo y Paisajismo	A	Hector Garcia

Cuadro 7.5: Programación académica del aula CR4.3 en un día representativo del escenario *Before*.

2025-09-22**Sali¹/₂ CR: Cedros Rosado****CR-4.3: Cedro Rosado 4.3**

Desde	Hasta	Asignatu	Grupo	Profesor
07.00	13.00	400ANO009 Métodos Multivariados	MCE1	JAIRO SALAS PARAMO
14.00	16.00	300LEI066 English 6	B	MARCO VALENCIA BOTERO
16.00	18.00	300LEI066 English 6	C	MARCO VALENCIA BOTERO

2025-09-23**Sali¹/₂ CR: Cedros Rosado****CR-4.3: Cedro Rosado 4.3**

Desde	Hasta	Asignatu	Grupo	Profesor
07.00	13.00	400ANO009 Métodos Multivariados	MCE1	JAIRO SALAS PARAMO
14.00	17.00	300AAF012 Urbanismo y Paisajismo	A	Hector Garcia

Cuadro 7.6: Programación académica del aula CR4.3 en un día representativo del escenario *After*.

Con esta consideración, en las subsecciones siguientes el análisis se enfoca en cuantificar el impacto del sistema COMO sobre el consumo energético no autorizado, evaluando principalmente (i) horas de uso fuera del horario académico, (ii) porcentaje de uso respecto a horas no programadas, y (iii) energía y costo asociados a periodos sin reserva.

7.1.2. Análisis global del consumo energético antes y después del sistema CoMo

Como primera aproximación, se analizó el consumo energético total agregado considerando todas las aulas instrumentadas y los tres tipos de dispositivos (computador, video-beam e iluminación), comparando los escenarios *Before* y *After*. Este análisis permite obtener una visión global del comportamiento del sistema antes de realizar una evaluación más detallada del uso fuera del horario académico.

La Figura 7.1 presenta la energía total consumida por cada tipo de dispositivo en ambos escenarios. En términos agregados, se observa una reducción del consumo en los tres tipos de carga tras la implementación del sistema COMO, siendo más pronunciada en el caso del computador. Este resultado es coherente con el diseño del sistema, dado que el computador suele permanecer encendido fuera del horario académico por descuidos operativos, y representa una de las cargas con mayor tiempo de uso innecesario en ausencia de control automático.

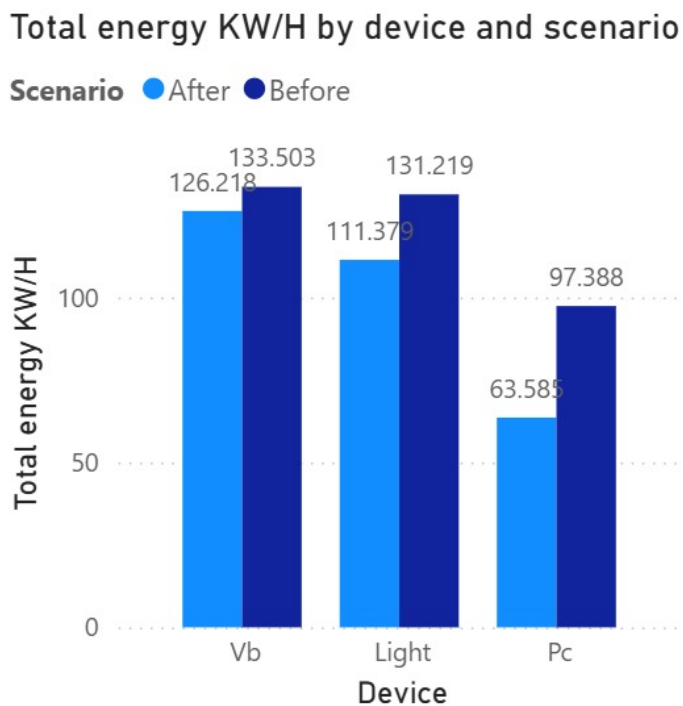


Figura 7.1: Energía total agregada (kWh) por tipo de dispositivo para los escenarios *Before* y *After* (todas las aulas).

La iluminación y el video-beam también muestran reducciones globales, aunque de menor magnitud relativa. Esto puede atribuirse a que estos dispositivos suelen ser apagados con mayor frecuencia por los usuarios al finalizar la clase, en comparación con el computador, el cual puede permanecer encendido aun cuando el aula queda desocupada.

De manera complementaria, la Figura 7.2 presenta el consumo energético *promedio* por día de la semana, calculado a partir de la energía diaria registrada en cada escenario. A diferencia de la energía total agregada, este indicador normaliza el consumo respecto al número de días observados y permite comparar patrones semanales de uso de forma más equitativa entre los escenarios *Before* y *After*.

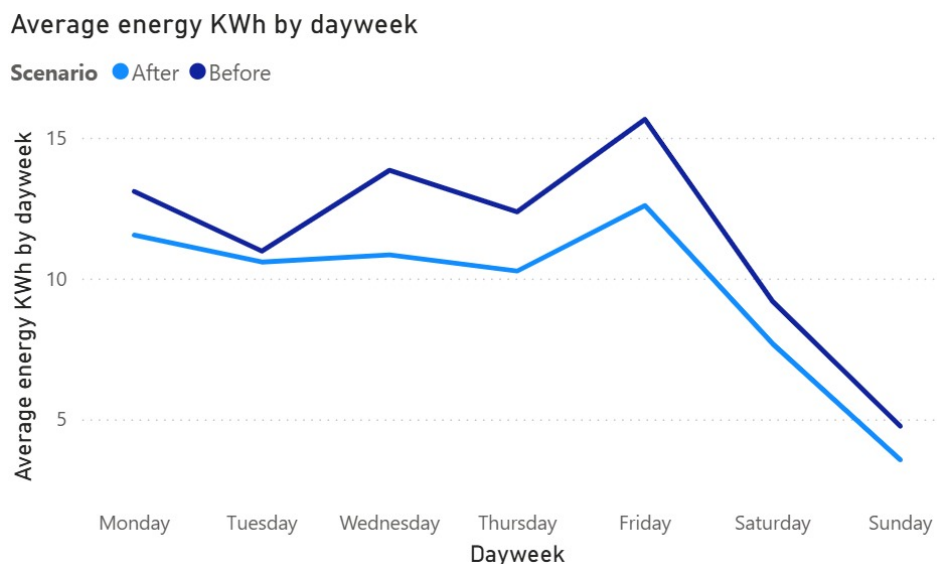


Figura 7.2: Consumo energético promedio diario (kWh) por día de la semana para los escenarios *Before* y *After* (todas las aulas).

A partir de la Figura 7.2 se observa que, en promedio, el consumo energético en el escenario *After* es inferior al del escenario *Before* en la mayoría de los días de la semana. A primera vista, esta diferencia sugiere una reducción global del consumo energético en el periodo posterior a la implementación del sistema CoMO.

No obstante, tal como se discutió previamente en la Sección 7.1.1, el consumo energético observado en los escenarios *Before* y *After* está condicionado no solo por la presencia del sistema CoMO, sino también por cambios en la carga académica de las aulas, derivados del incremento de reservas y horas de clase a lo largo del semestre. En este sentido, incluso métricas agregadas o promedio pueden reflejar simultáneamente el efecto del sistema y el uso legítimo del aula.

En consecuencia, las comparaciones basadas únicamente en el consumo energético promedio deben interpretarse como un análisis descriptivo inicial, útil para caracterizar el comportamiento general del conjunto de datos, pero no suficiente para evaluar de forma aislada el impacto del sistema CoMO. Por esta razón, el análisis de resultados se estructura en dos niveles complementarios: (i) un panorama global de consumo y costo, presentado en esta subsección; y (ii) un análisis específico del uso y del consumo energético fuera del horario académico, que corresponde directamente al objetivo funcional del sistema CoMO y se desarrolla en las subsecciones siguientes.

7.1.3. Análisis desagregado por aula y por dispositivo

7.1.3.1. Comparación del perfil de consumo en días equivalentes (reservas y curvas separadas)

Con el propósito de evaluar el efecto del sistema COMO bajo condiciones comparables, se seleccionaron días representativos (lunes a viernes) en los que la programación académica permite contrastar el escenario *Before* con el escenario *After*. Para cada día, primero se muestran las reservas utilizadas como referencia (antes y después) y luego el perfil de consumo correspondiente. El análisis se enfoca en las franjas **sin clase programada**: en ellas el consumo esperado debería aproximarse al nivel mínimo del aula; por tanto, cualquier permanencia por encima de ese mínimo en *Before* se interpreta como *consumo residual* (equipos que quedan encendidos), mientras que en *After* se espera observar una caída más nítida hacia el mínimo.

Indicadores mostrados en las gráficas. En cada figura de consumo se presentan, además de la curva temporal, dos indicadores resumen ubicados al costado derecho: (i) *Total energy* [kWh], que corresponde a la energía acumulada durante el día, y (ii) *Total consumption* [COP], que representa el costo diario estimado asociado a dicha energía. En consecuencia, *Total consumption* es una transformación monetaria de *Total energy* y se incluye como referencia económica, mientras que el análisis técnico de esta sección se centra en la forma de la curva y, especialmente, en su retorno al consumo mínimo durante las franjas sin clase.

Lunes (CR4.1). En primer lugar, se presentan las reservas del lunes para ambos escenarios, con el fin de identificar los bloques de clase y, sobre todo, las franjas en las que el aula debería permanecer inactiva.

2025-08-25

Saliz½ CR: Cedros Rosado

CR-4.1: Cedro Rosado 4.1

Desde	Hasta	Asignatu	Grupo	Profesor
07.00	09.00	300MAG00 Ecuaciones Diferenciales	F	DANIEL NUÑEZ LOPEZ
09.00	11.00	300LML017 Francés Básico I	A	THEO FRANKA
11.00	13.00	300LML018 Francés Básico II	A	THEO FRANKA
14.00	16.00	300LEI066 English 6	A	CARL STELLA MOLINA

Cuadro 7.7: Reservas académicas del lunes en el escenario *Before* (CR4.1).

2025-09-29

Sali $\frac{1}{2}$ CR: Cedros Rosado

CR-4.1: Cedro Rosado 4.1

Desde	Hasta	Asignatu	Grupo	Profesor
07.00	09.00	300MAG00 Ecuaciones Diferenciales	F	DANIEL NUÑEZ LOPEZ
09.00	11.00	300LML017 Francés Básico I	A	THEO FRANKA
11.00	13.00	300LML018 Francés Básico II	A	THEO FRANKA
14.00	16.00	300LEI066 English 6	A	CARL STELLA MOLINA

Cuadro 7.8: Reservas académicas del lunes en el escenario *After* (CR4.1).

De acuerdo con las reservas mostradas en las Tablas 7.7 y 7.8, las clases del lunes en CR4.1 se concentran en los bloques 07:00–13:00 y 14:00–16:00, con un intervalo sin clase entre 13:00–14:00. En consecuencia, las franjas donde no se espera consumo asociado a actividad académica corresponden a 00:00–07:00, 13:00–14:00 y 16:00–24:00.

A continuación se muestran los perfiles de consumo del mismo día. En el escenario *Before* (Fig. 7.3), se evidencia **consumo residual** en franjas donde, según las reservas, el aula debería estar inactiva. En particular, durante el intervalo 13:00–14:00 (sin clase) el consumo se mantiene por encima del nivel mínimo, lo cual indica que al menos una carga permaneció energizada entre bloques académicos. De forma similar, tras finalizar la última clase a las 16:00, el consumo **no desciende de inmediato**, sino que se prolonga hasta aproximadamente 18:00, reflejando operación fuera del horario programado.

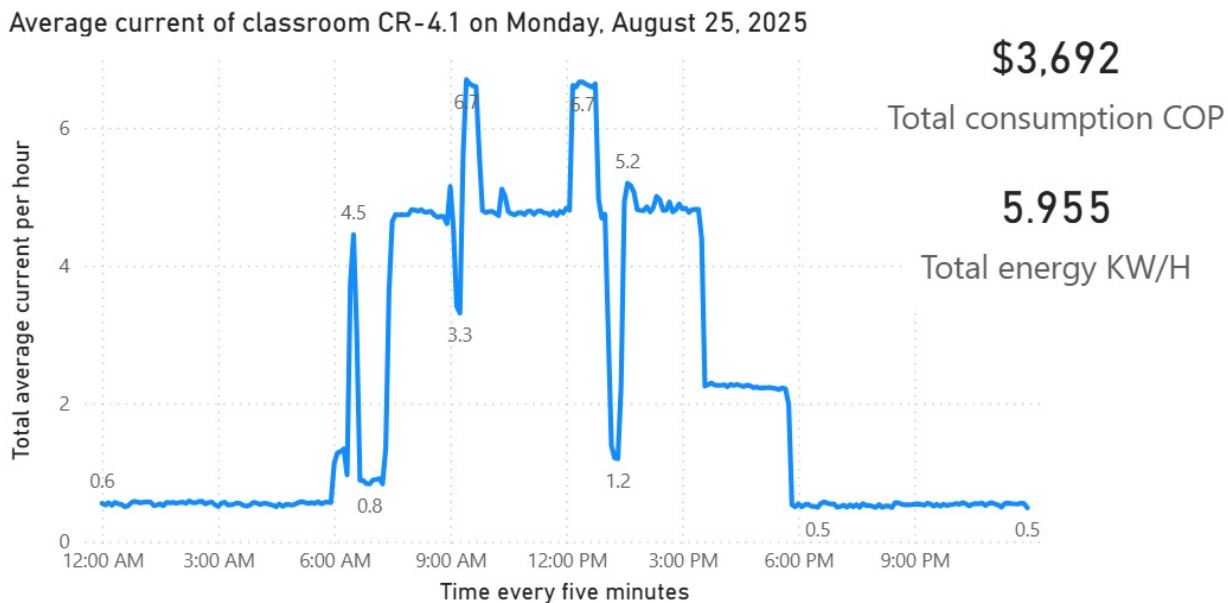


Figura 7.3: Perfil de consumo del lunes en el escenario *Before* (CR4.1).

En contraste, en el escenario *After* (Fig. 7.4) el perfil se alinea con mayor precisión a las franjas definidas por la programación: durante 13:00–14:00 la curva retorna al consumo mínimo, y al finalizar la jornada (16:00–24:00) se observa un descenso oportuno sin prolongaciones comparables a las del escenario *Before*. Por tanto, el cambio más relevante en *After* es la **eliminación del consumo fuera de reserva** en los intervalos donde el aula no debería tener equipos encendidos.

Average current of classroom CR-4.1 on Monday, September 29, 2025

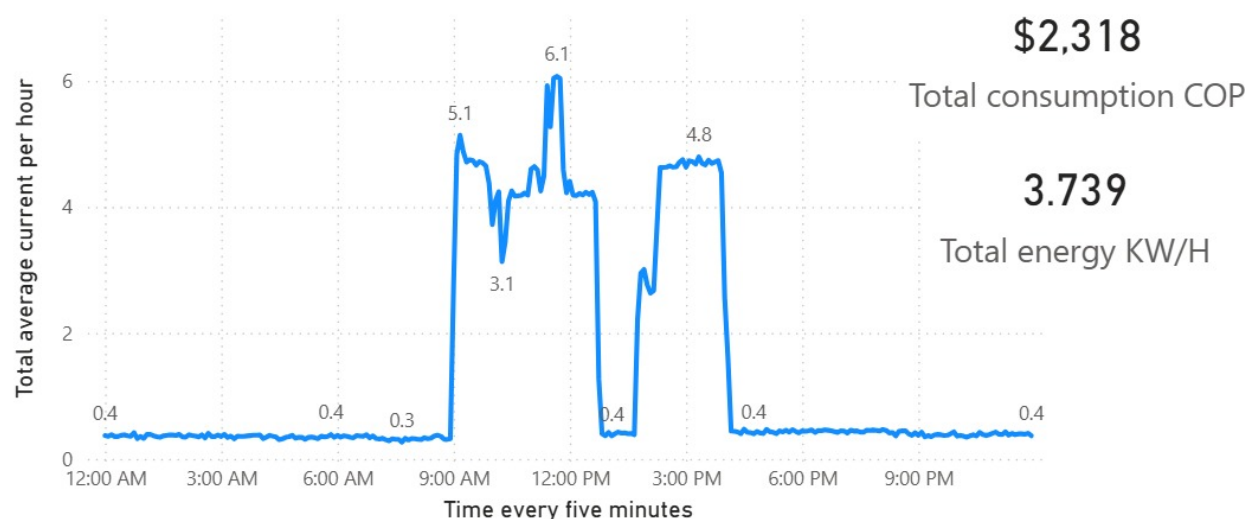


Figura 7.4: Perfil de consumo del lunes en el escenario *After* (CR4.1).

Martes (CR4.2). Para el martes se presenta la programación académica de ambos escenarios. En este caso, las reservas delimitan dos bloques de clase (07:00–13:00 y 14:00–16:00), un receso intermedio (13:00–14:00) y el fin de jornada (a partir de 16:00). Por tanto, las franjas donde no se espera consumo asociado a actividad académica corresponden a 00:00–07:00, 13:00–14:00 y 16:00–24:00.

2025-08-19

Saliz ½ CR: Cedros Rosado

CR-4.2: Cedro Rosado 4.2

Desde	Hasta	Asignatu	Grupo	Profesor
07.00	09.00	300LML025 Italiano Básico I	B	CARLOS GUERRERO ZAPATA
09.00	11.00	300LML025 Italiano Básico I	ITB1	CARLOS GUERRERO ZAPATA
11.00	13.00	300EIH001 Humanidades I	F	María Camila Sanabria Cucalón
14.00	16.00	300PSG033 Cátedra el Amor	B	YAMILE RODRIGUEZ ALARCON

Cuadro 7.9: Reservas académicas del martes en el escenario *Before* (CR4.2).

2025-10-07

Saliz ½ CR: Cedros Rosado

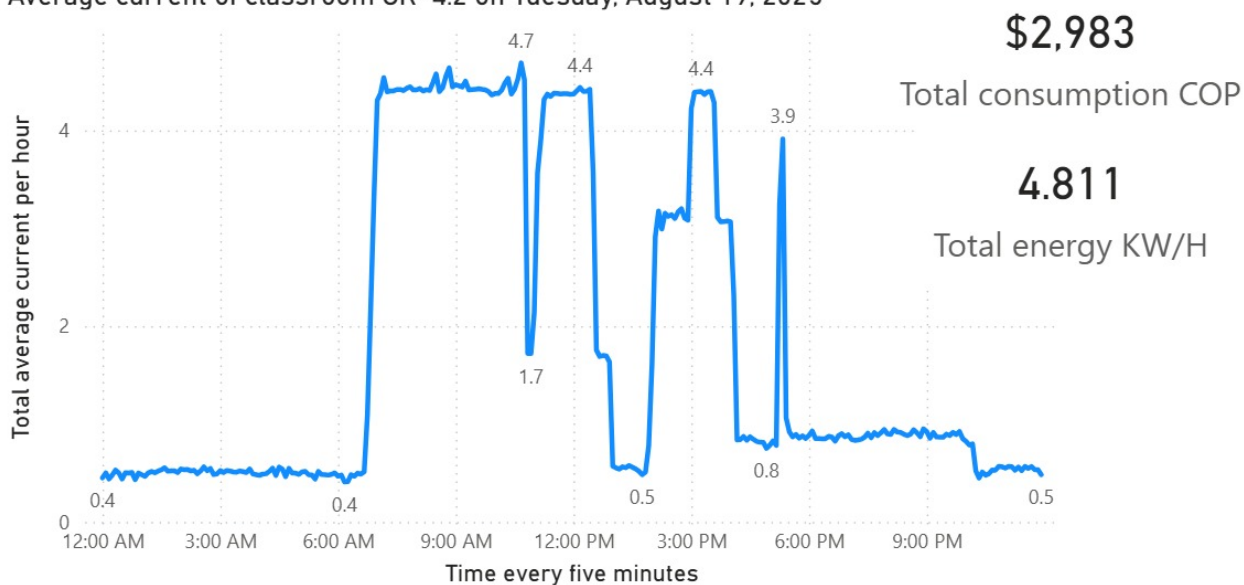
CR-4.2: Cedro Rosado 4.2

Desde	Hasta	Asignatu	Grupo	Profesor
07.00	09.00	300LML025 Italiano Básico I	B	CARLOS GUERRERO ZAPATA
09.00	11.00	300LML025 Italiano Básico I	ITB1	CARLOS GUERRERO ZAPATA
11.00	13.00	300EIH001 Humanidades I	F	María Camila Sanabria Cucalón
14.00	16.00	300PSG033 Cátedra el Amor	B	YAMILE RODRIGUEZ ALARCON

Cuadro 7.10: Reservas académicas del martes en el escenario *After* (CR4.2).

En el escenario *Before* (Fig. 7.5), aunque los incrementos de consumo se asocian a los bloques de clase, el rasgo más relevante aparece **después de las 16:00**: la curva **no retorna al consumo mínimo al finalizar la jornada**, sino que mantiene un nivel de consumo por encima del basal durante varias horas, aproximadamente hasta las 21:00. Dado que el intervalo 16:00–24:00 no tiene clases programadas, esta *cola* de consumo es consistente con equipos que quedaron encendidos fuera del horario de uso. De forma similar, durante el receso 13:00–14:00 se observan descensos, pero no siempre se mantiene un nivel claramente mínimo durante toda esa franja sin clase.

Average current of classroom CR-4.2 on Tuesday, August 19, 2025

Figura 7.5: Perfil de consumo del martes en el escenario *Before* (CR4.2).

En el escenario *After* (Fig. 7.6), los incrementos permanecen concentrados en los periodos con clase y, al finalizar el bloque 14:00–16:00, la curva **desciende al consumo mínimo y se estabiliza**

en la franja 16:00–24:00. En otras palabras, el consumo residual observado en *Before* entre 16:00 y la noche deja de aparecer con la misma magnitud, haciendo más evidente el cierre de jornada como un periodo de inactividad real del aula. En conjunto, el martes muestra que la diferencia más importante entre escenarios se concentra en el **apagado oportuno al final del día** y en la reducción del consumo que, en *Before*, persistía varias horas después de terminar las clases.

Average current of classroom CR-4.2 on Tuesday, October 07, 2025

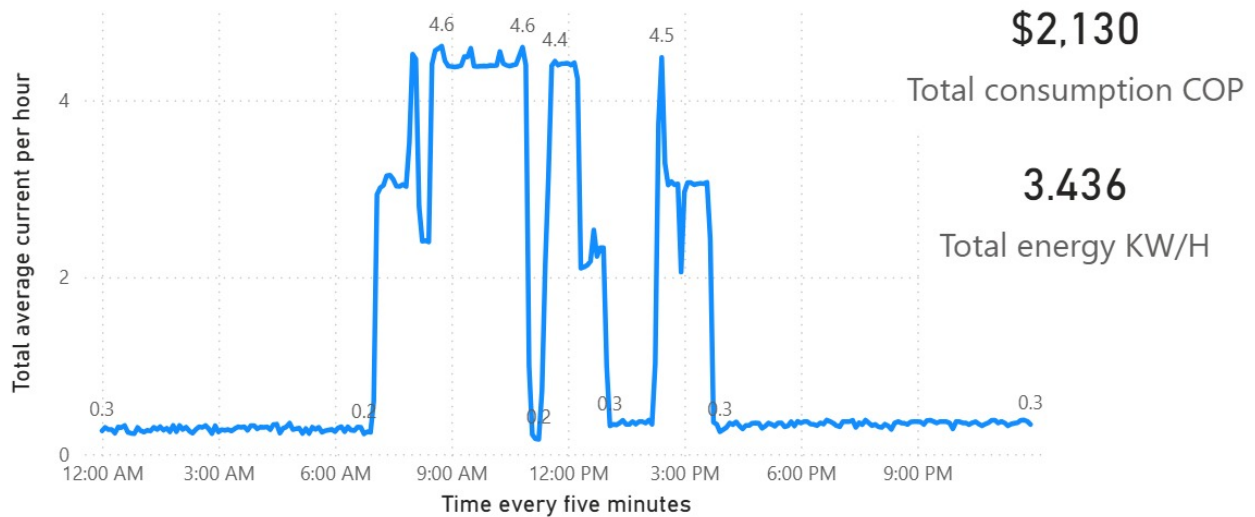


Figura 7.6: Perfil de consumo del martes en el escenario *After* (CR4.2).

Miércoles (CR4.2). En el miércoles, las reservas permiten ubicar franjas sin clase bien definidas. Para este día las clases se concentran en los bloques 07:00–13:00 y 14:00–17:00, de modo que los intervalos sin ocupación relevantes corresponden a 00:00–07:00, el receso 13:00–14:00 y el periodo posterior a 17:00.

2025-08-27

Saliz½ CR: Cedros Rosado

CR-4.2: Cedro Rosado 4.2

Desde	Hasta	Asignatu	Grupo	Profesor
07.00	09.00	300CPA012 Historia del Campo de la Comunicación	A	VICTOR VALENCIA GIRALDO
09.00	11.00	300LML013 Portugués Básico I	A	SANDRIO CANDIDO PEREIRA
11.00	13.00	300LML018 Francés Básico II	A	THEO FRANKA
14.00	17.00	300ADM00 Investigación Cuantitativa de Mercados	A	DIEGO BAEZ PALENCIA

Cuadro 7.11: Reservas académicas del miércoles en el escenario *Before* (CR4.2).

2025-10-08

Saliz ½ CR: Cedros Rosado

CR-4.2: Cedro Rosado 4.2

Desde	Hasta	Asignatu	Grupo	Profesor
07.00	09.00	300CPA012	A	VICTOR VALENCIA GIRALDO
09.00	11.00	300LML013	A	SANDRIO CANDIDO PEREIRA
11.00	13.00	300LML018	A	THEO FRANKA
14.00	17.00	300ADM00	A	DIEGO BAEZ PALENCIA

Cuadro 7.12: Reservas académicas del miércoles en el escenario *After* (CR4.2).

El escenario *Before* (Fig. 7.7) evidencia de forma marcada el fenómeno de consumo residual **en la madrugada** (00:00–04:00): durante ese intervalo, en el cual no existe clase programada, la señal se mantiene claramente por encima del consumo mínimo esperado. Este comportamiento es consistente con un escenario operativo en el que, al finalizar la jornada del día anterior, uno o más dispositivos del aula quedaron encendidos, manteniendo un consumo sostenido durante toda la noche hasta el inicio de las clases. Adicionalmente, se observan tramos fuera de reserva en los que el retorno al nivel mínimo no es inmediato ni completamente sostenido, lo cual refuerza la presencia de periodos de energización no alineados con la ocupación académica.

Average current of classroom CR-4.2 on Wednesday, August 27, 2025

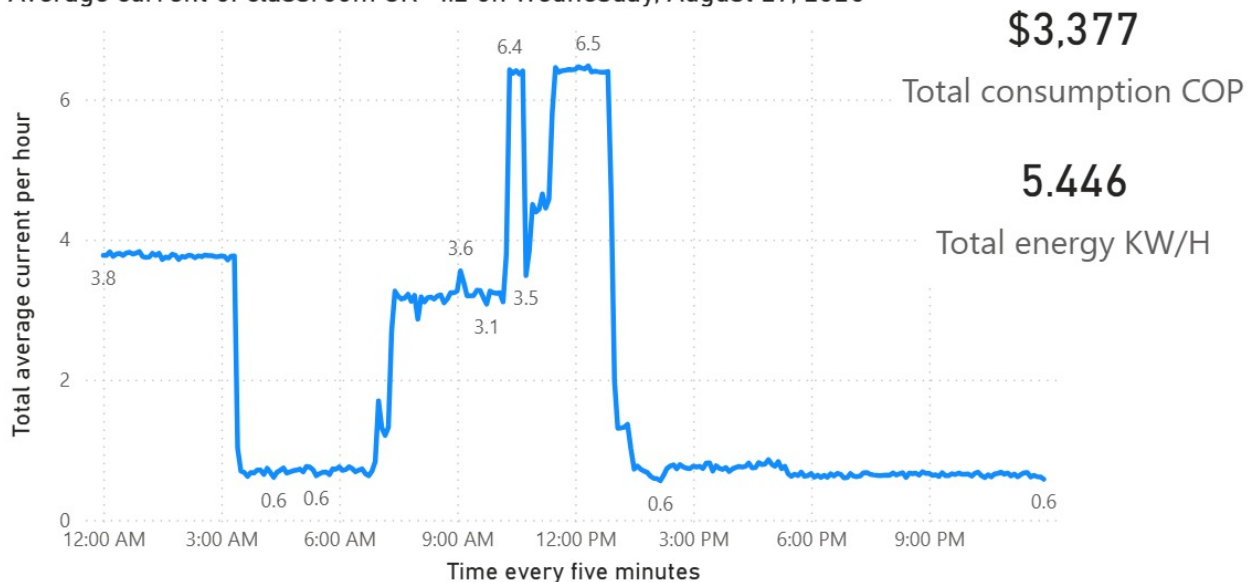


Figura 7.7: Perfil de consumo del miércoles en el escenario *Before* (CR4.2).

En el escenario *After* (Fig. 7.8), el contraste más importante se observa precisamente en las franjas sin clase: durante 00:00–07:00 el perfil permanece cercano al consumo mínimo, eliminando el consumo nocturno que aparece en *Before*. De igual manera, al terminar el último bloque de clase (17:00), la curva desciende al nivel basal y se mantiene estable durante el resto del día, de modo que el consumo queda claramente concentrado en las horas de ocupación (07:00–13:00 y 14:00–17:00). En conjunto, el miércoles ilustra un caso representativo donde el impacto del sistema COMO se manifiesta en la **prevención del consumo prolongado fuera de horario**, particularmente durante la noche y la madrugada.

Average current of classroom CR-4.2 on Wednesday, October 08, 2025

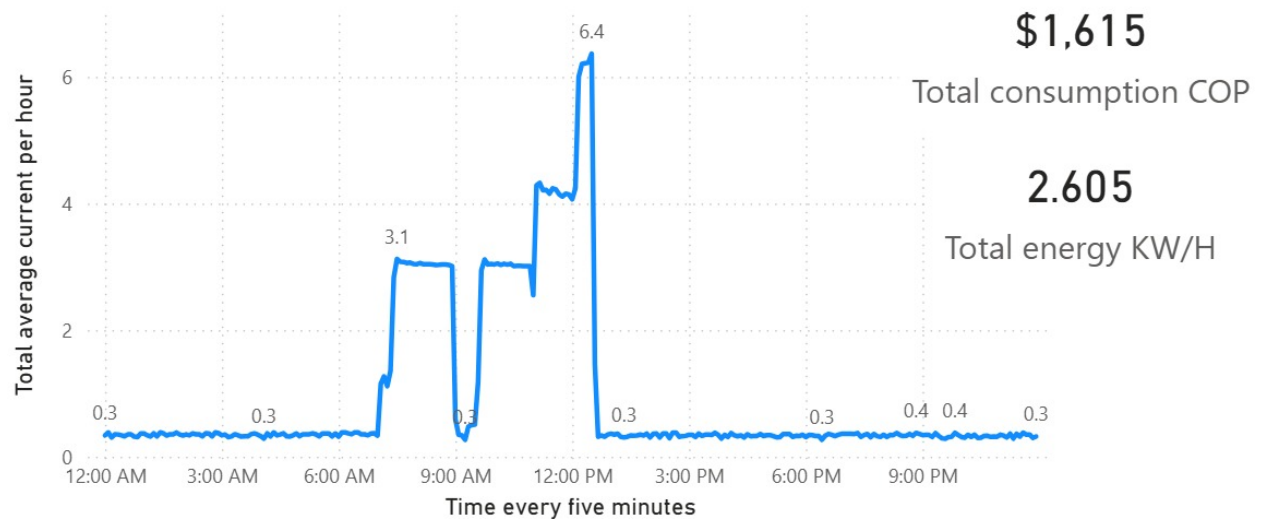


Figura 7.8: Perfil de consumo del miércoles en el escenario *After* (CR4.2).

Jueves (comparación con salones distintos). En los días jueves se presentaron variaciones frecuentes en los horarios; por este motivo, para mantener una comparación bajo franjas equivalentes de ocupación, se seleccionaron dos salones distintos: el escenario *Before* corresponde al aula CR4.1 y el escenario *After* al aula CR4.3. A continuación se incluyen las reservas como referencia temporal para ubicar (i) los bloques con clase y (ii) las **franjas sin clase**, en las que el comportamiento esperado es que el consumo del aula descienda hasta su nivel mínimo.

2025-08-21**Sali $\frac{1}{2}$ CR: Cedros Rosado****CR-4.1: Cedro Rosado 4.1**

Desde	Hasta	Asignatu	Grupo	Profesor
07.00	09.00	300MAG00 Ecuaciones Diferenciales	F	DANIEL NUÑEZ LOPEZ
09.00	11.00	300MEA017 Modelos Matemáticos Aplicados:	G	DANIEL NUÑEZ LOPEZ
11.00	13.00	300MAG01 Matemáticas Fundamentales	G	JAIRO ACOSTA ESCOBAR
14.00	16.00	300FTA008 Humanidades Contemporáneas	F	ARTURO HERREÑO MARIN
16.00	18.00	300FTA006 Cuidado de la Casa Común - T1	F	Adriano Padilla

Cuadro 7.13: Reservas académicas del jueves en el escenario *Before* (CR4.1).**2025-10-09****Sali $\frac{1}{2}$ CR: Cedros Rosado****CR-4.3: Cedro Rosado 4.3**

Desde	Hasta	Asignatu	Grupo	Profesor
09.00	13.00	Plan Integral de Formación del Profesor		Sin Asignar Sin Asignar
14.00	16.00	300TEG001 Teología I	MEDB	GERSAIN SINISTERRA AGUDELO
16.00	18.00	300FTA006 Cuidado de la Casa Común - T1	E	GERSAIN SINISTERRA AGUDELO

Cuadro 7.14: Reservas académicas del jueves en el escenario *After* (CR4.3).

Con base en estas reservas, se observa que el jueves presenta tres zonas de interés para el análisis: la franja previa al inicio de clases (madrugada y primeras horas de la mañana), los intervalos entre bloques de clase (pausas de media jornada) y la franja posterior a la última clase (tarde-noche).

En el escenario *Before* (Fig. 7.9), el comportamiento más relevante se presenta en las franjas donde **no hay clase**. En particular, durante el receso 13:00–14:00 la curva *no* retorna al consumo mínimo, sino que permanece en un nivel superior, lo cual indica consumo residual en un intervalo que debería reflejar inactividad del aula. Adicionalmente, al finalizar la jornada (alrededor de las 18:00) se observa un descenso momentáneo hacia el nivel mínimo; sin embargo, este retorno **no se sostiene**, ya que el consumo vuelve a incrementarse y se mantiene por encima del basal hasta aproximadamente las 20:00. Este patrón es consistente con equipos que permanecen encendidos tras el cierre de clases o con reactivaciones no previstas después de la última franja programada.

Average current of classroom CR-4.1 on Thursday, August 21, 2025

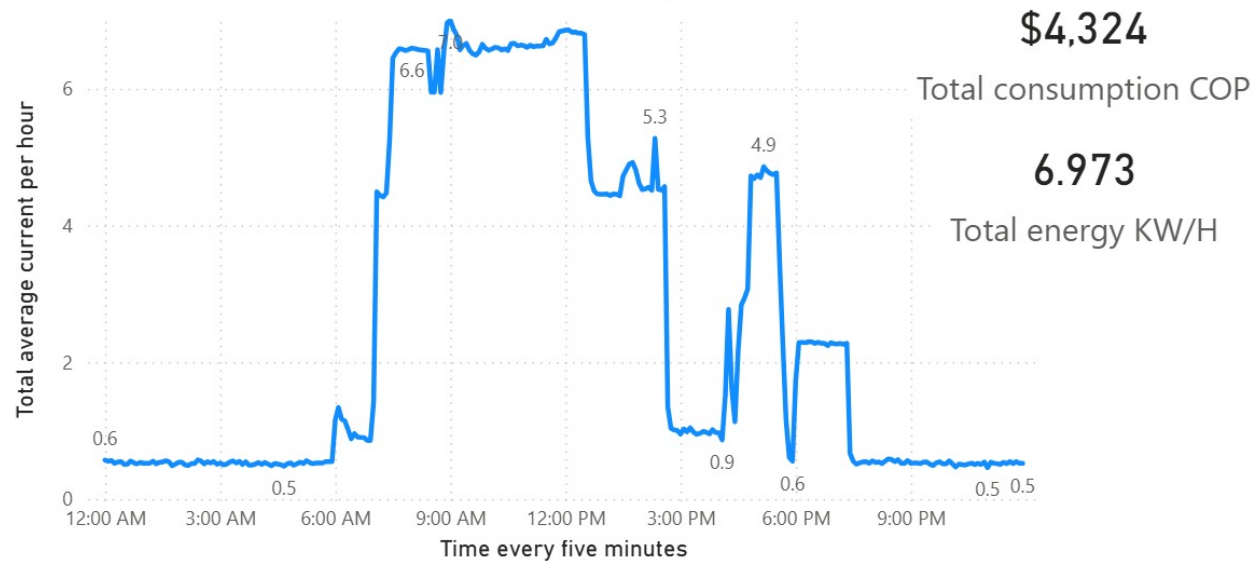
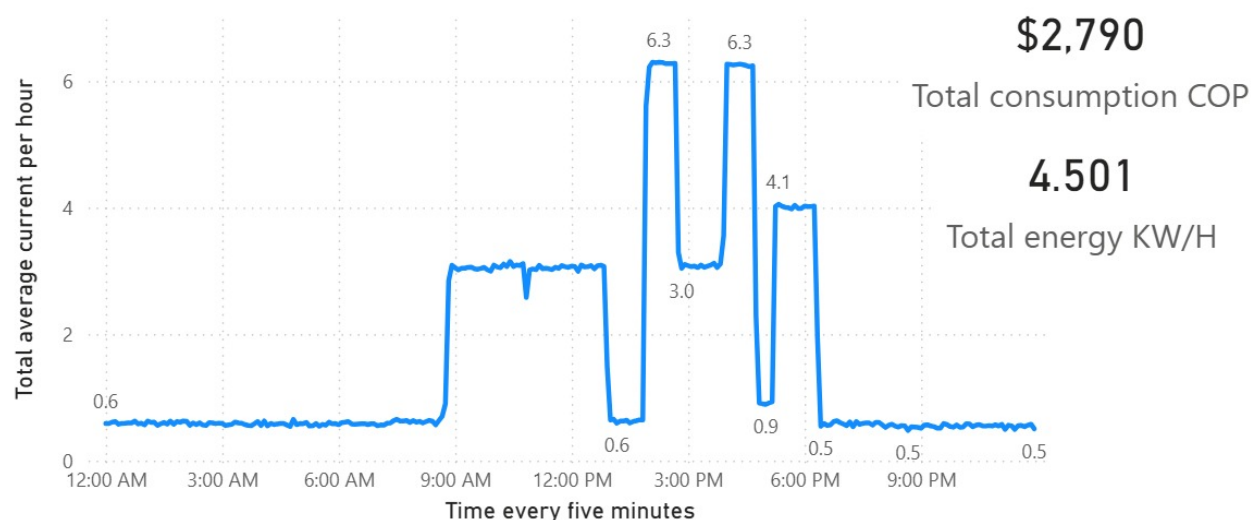


Figura 7.9: Perfil de consumo del jueves en el escenario *Before* (CR4.1).

En el escenario *After* (Fig. 7.10), aun tratándose de un salón distinto, se observa el rasgo buscado para este análisis: los intervalos sin clase quedan mejor delimitados porque la curva **sí desciende al consumo mínimo y se mantiene estable** durante esas ventanas. Esto se aprecia especialmente en el receso de mediodía y al terminar la última franja, donde el perfil cae al nivel basal y no presenta el repunte sostenido que aparece en *Before*. En conjunto, el jueves refuerza que la diferencia clave entre escenarios se concentra en las franjas fuera de reserva, donde *After* evita la prolongación del consumo y reduce el tiempo en el que el aula permanece energizada sin ocupación.

Average current of classroom CR-4.3 on Thursday, October 09, 2025

Figura 7.10: Perfil de consumo del jueves en el escenario *After* (CR4.3).

Viernes (CR4.3). Para el viernes se dispone del mismo salón (CR4.3) en ambos escenarios, por lo que la comparación puede centrarse directamente en cómo el perfil de consumo se ajusta a las franjas delimitadas por las reservas.

2025-08-15**Saliz½ CR: Cedros Rosado****CR-4.3: Cedro Rosado 4.3**

Desde	Hasta	Asignatu	Grupo	Profesor
08.00	12.00	400RLT001	Conceptos Básicos de la Seguridad Social	ESS ARY ARIAS RESTREPO
14.00	16.00	300LEI055	English 5	A ROBINSON FERNANDEZ ROMERO
16.00	18.00	300LEI055	English 5	B ROBINSON FERNANDEZ ROMERO

Cuadro 7.15: Reservas académicas del viernes en el escenario *Before* (CR4.3).

2025-10-10

Salida CR: Cedros Rosado

CR-4.3: Cedro Rosado 4.3

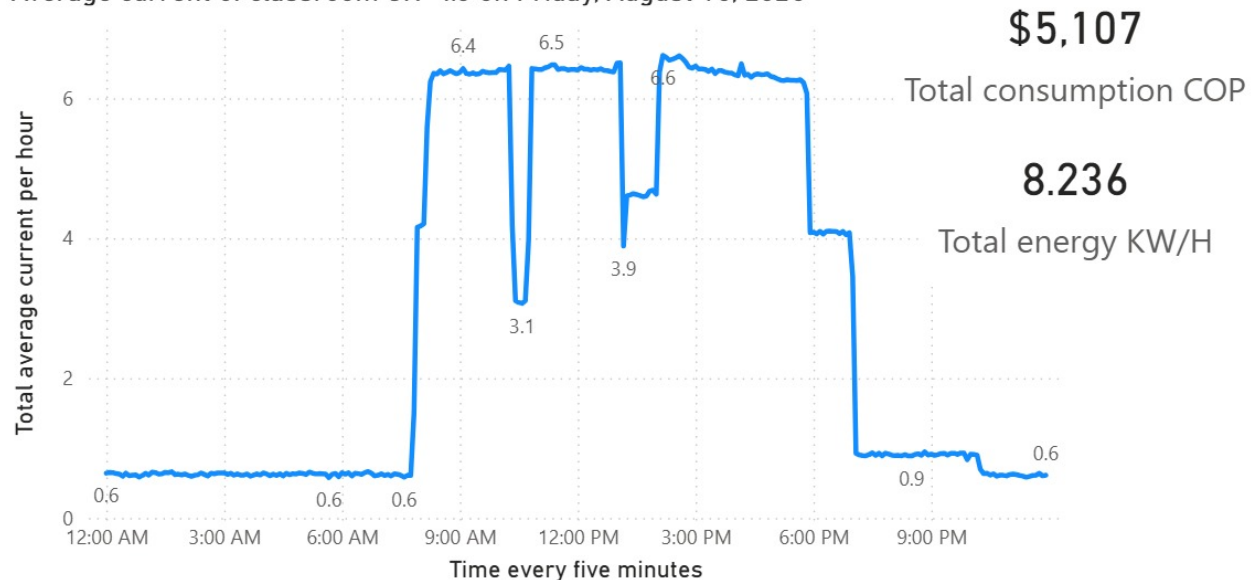
Desde	Hasta	Asignatu	Grupo	Profesor
08.00	12.00	Clase Derecho de Familia. Especialización		EDGAR SALAZAR COBO
14.00	16.00	300LEI055 English 5	A	ROBINSON FERNANDEZ ROMERO
16.00	18.00	300LEI055 English 5	B	ROBINSON FERNANDEZ ROMERO

Cuadro 7.16: Reservas académicas del viernes en el escenario *After* (CR4.3).

De acuerdo con las reservas, las clases del viernes se concentran en los bloques 08:00–12:00 y 14:00–18:00. En consecuencia, las franjas sin clase más relevantes para el análisis corresponden a 00:00–08:00, el receso 12:00–14:00 y el periodo posterior a 18:00.

Al contrastar estas franjas con las curvas, el escenario *Before* (Fig. 7.11) evidencia dos comportamientos fuera de reserva que resultan clave. Primero, durante el receso 12:00–14:00 la curva mantiene un nivel de consumo apreciable, sin retornar al consumo mínimo, pese a que no hay clase programada en ese intervalo. Segundo, al finalizar la última franja (18:00) el consumo no desciende de inmediato al nivel basal, sino que se mantiene por encima del mínimo y sólo alcanza una condición de inactividad más clara alrededor de 19:30. En conjunto, estos rasgos indican consumo residual tanto en el receso del mediodía como en el cierre de jornada.

Average current of classroom CR-4.3 on Friday, August 15, 2025

Figura 7.11: Perfil de consumo del viernes en el escenario *Before* (CR4.3).

En el escenario *After* (Fig. 7.12), el perfil se ajusta con mayor fidelidad a las franjas de reserva: durante 12:00–14:00 se observa el retorno al consumo mínimo y su permanencia durante el receso, y al terminar la actividad (18:00) la curva cae al nivel basal sin presentar la prolongación observada en *Before*. Por tanto, en el viernes el aporte más visible del sistema COMO se concentra en **eliminar consumo en el receso de mediodía** y en **evitar la cola de consumo tras el cierre de clases**, haciendo que las franjas sin ocupación se reflejen como periodos de inactividad energética del aula.

Average current of classroom CR-4.3 on Friday, October 10, 2025

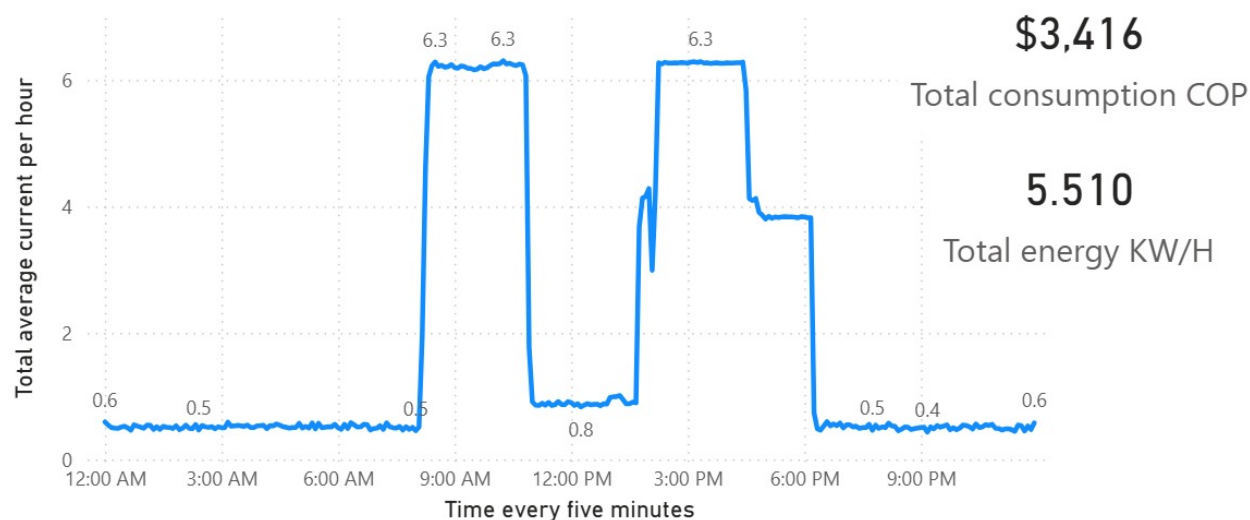


Figura 7.12: Perfil de consumo del viernes en el escenario *After* (CR4.3).

Síntesis (lunes a viernes). De manera consistente a lo largo de la semana, el cambio más visible entre *Before* y *After* no es únicamente la altura de los picos durante la clase, sino la forma en que el consumo se comporta **cuando no hay clase**. En *Before* aparecen tramos sostenidos por encima del mínimo en horas sin ocupación, compatibles con equipos que quedan encendidos fuera de las franjas programadas. En *After*, esos mismos periodos tienden a reflejarse como segmentos cercanos al consumo mínimo, lo que indica que el sistema COMO contribuye principalmente a **evitar encendidos innecesarios** y a “cerrar” el consumo al terminar cada sesión de uso del aula.

7.1.4. Descomposición del consumo energético durante y fuera de reservas (métrica principal)

Con el fin de evaluar el impacto del sistema COMO sobre el *consumo no autorizado* sin confundirlo con variaciones en la carga académica (Sección 7.1.1), en esta subsección se descompone la energía total registrada en dos componentes: (i) energía consumida **durante reservas** (periodos con clase o evento programado) y (ii) energía consumida **fuera de reservas** (periodos sin programación académica). Esta última corresponde al consumo residual que el sistema busca minimizar,

dado que idealmente debería aproximarse al consumo en *estado de inactividad* del aula cuando no existe ocupación autorizada.

Energy consumption during and outside scheduled reservations (Before vs. After)

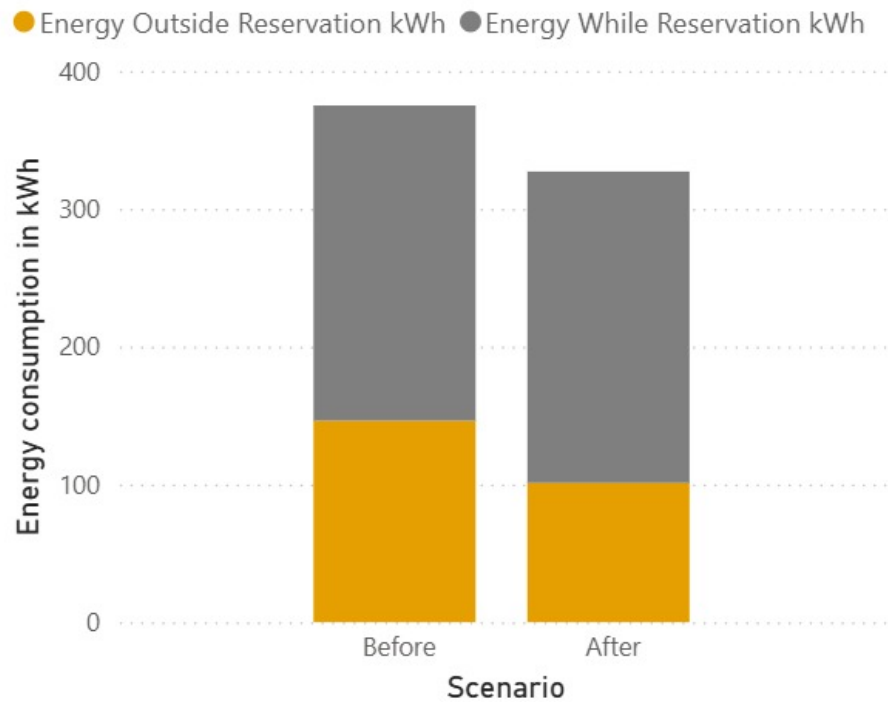


Figura 7.13: Consumo energético total (kWh) desagregado en periodos *durante* y *fuera* de reservas para los escenarios *Before* y *After* (todas las aulas y dispositivos).

La Figura 7.13 muestra que, tras la implementación de COMO, el consumo total presenta una disminución, y que dicha diferencia se explica principalmente por la reducción del componente **fuera de reservas**. Este comportamiento es coherente con el propósito funcional del sistema, ya que COMO actúa de manera prioritaria al finalizar la ocupación programada y durante intervalos sin actividad, evitando que las cargas permanezcan energizadas por descuido operativo (por ejemplo, después de la última clase del día o durante recesos entre bloques).

Para cuantificar este resultado, se complementa la descomposición anterior con indicadores directos: (i) energía fuera de reservas (kWh), (ii) porcentaje de energía fuera de reservas respecto al total, y (iii) costo asociado al consumo fuera de reservas (COP), utilizando $C_{\text{kWh}} = 620 \text{ COP/kWh}$. Las Figuras 7.14 y 7.15 presentan estos indicadores para cada escenario.

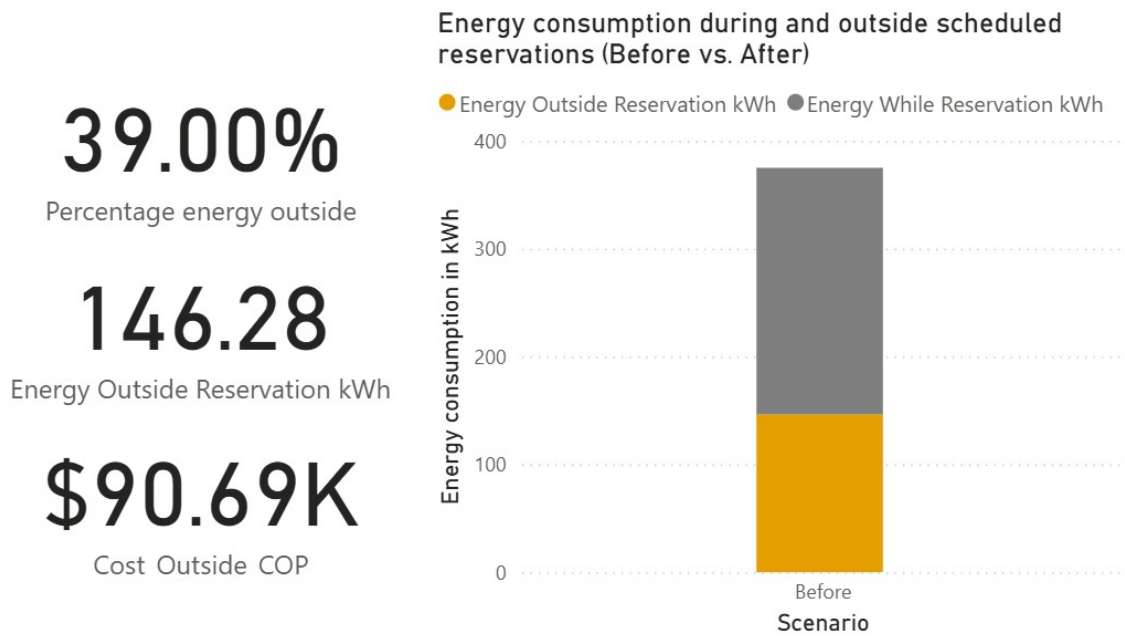


Figura 7.14: Indicadores de consumo fuera de reservas para el escenario *Before*: porcentaje fuera de reservas, energía fuera de reservas (kWh) y costo fuera de reservas (COP).

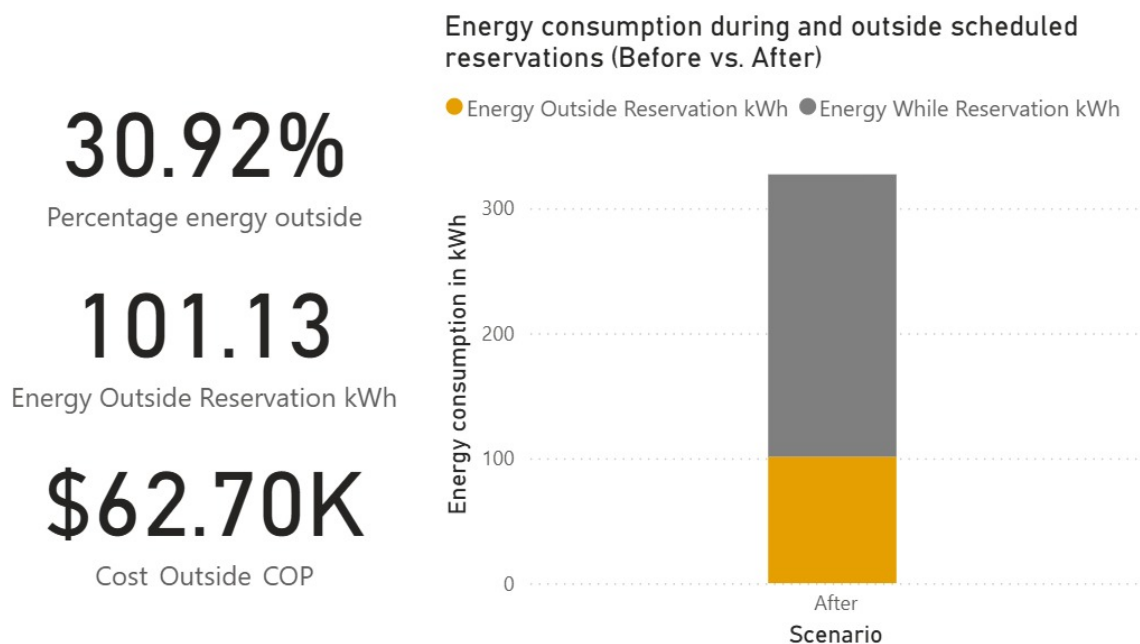


Figura 7.15: Indicadores de consumo fuera de reservas para el escenario *After*: porcentaje fuera de reservas, energía fuera de reservas (kWh) y costo fuera de reservas (COP).

En el escenario *Before* (Fig. 7.14), la energía consumida fuera de reservas es 146,28 kWh, lo que equivale a 39,00 % del consumo total del periodo y a un costo aproximado de 90,690 COP. En contraste, en el escenario *After* (Fig. 7.15) la energía fuera de reservas se reduce a 101,13 kWh, correspondiente a 30,92 % del total y a 62,700 COP.

Estos resultados permiten extraer dos conclusiones cuantitativas relevantes. Primero, en términos absolutos, el consumo fuera de reservas disminuye en 45,15 kWh entre *Before* y *After*, lo que representa una reducción relativa de aproximadamente 30,9 % respecto al valor base. Segundo, la fracción del consumo total que ocurre fuera de reservas disminuye en 8,08 puntos porcentuales (de 39,00 % a 30,92 %), indicando que el consumo queda más concentrado en periodos autorizados. Desde una perspectiva económica, la reducción del consumo fuera de reservas equivale a un ahorro aproximado de 27,990 COP en el periodo analizado (diferencia entre 90,690 y 62,700 COP).

De manera complementaria, la descomposición del consumo confirma que la energía consumida **durante reservas** se mantiene prácticamente constante entre escenarios: en *Before* se registran 228,75 kWh, mientras que en *After* se registran 225,94 kWh. Esta similitud es relevante porque sugiere que la operación normal del aula (uso legítimo durante clases o eventos programados) no se ve afectada de forma apreciable tras la implementación de CoMo. En contraste, la reducción observada entre escenarios se concentra en el componente **fuera de reservas**, lo cual es consistente con el objetivo funcional de CoMo: **reducir el consumo residual fuera del horario académico sin penalizar el consumo asociado al uso autorizado**.

No obstante, es importante señalar que la energía fuera de reservas no se elimina por completo

en el escenario *After*. En teoría, bajo una operación ideal, el sistema debería impedir que las cargas permanezcan energizadas en ausencia de reserva; sin embargo, durante el mes de prueba se presentaron condiciones operativas que introducen consumo fuera del horario programado. En particular, (i) algunos docentes no contaban con carné RFID, lo que obligó a habilitar el encendido de manera remota desde la interfaz web; (ii) en ciertos casos, el apagado no se ejecutó de forma inmediata, ya sea por retrasos en la confirmación de finalización de la actividad o por intervención manual tardía, prolongando el tiempo de encendido antes de desenergizar las cargas; y (iii) ocasionalmente se realizaron actividades académicas no programadas en el sistema de reservas, las cuales fueron comunicadas al equipo para solicitar el encendido de los dispositivos. Estas situaciones explican la existencia de un componente residual fuera de reservas en *After* y delimitan un margen de mejora asociado a la adopción del mecanismo de autenticación y a la actualización oportuna de la programación.

Finalmente, para contextualizar la comparación energética, debe considerarse el consumo propio de la electrónica de COMO desplegada durante la campaña. A diferencia del **sensor de corriente**, el cual se instaló únicamente con fines de instrumentación y medición (Sección 6.1.4.2) y por tanto no se contabiliza como parte del sistema de ahorro, los módulos de control del sistema (RFID y relés) sí constituyen un costo operativo intrínseco a la automatización. Como se mencionó en la Sección 6.1.5, para 30 días de operación continua (720 h) el consumo acumulado por *un* módulo fue:

- **Subsistema de relés (30 días, 1 relé ON):** $E \approx 0,478kWh$, y
- **Módulo RFID (30 días):** $E \approx 0,378kWh$.

Dado que el despliegue se realizó en tres aulas, este consumo propio se multiplica por la cantidad de módulos instalados (tres módulos RFID y tres subsistemas de relés, uno por salón). En términos acumulados, el consumo asociado a la electrónica de control en el periodo de análisis corresponde a:

- **Tres (3) subsistemas de relés:** $E \approx 3 \times 0,478kWh = 1,434kWh$,
- **Tres (3) módulos RFID:** $E \approx 3 \times 0,378kWh = 1,134kWh$,

para un total de $E_{\text{RFID+relés}} \approx 2,568kWh$.

Aun considerando este consumo adicional propio del sistema, su magnitud resulta **pequeña** frente a la reducción observada en la energía consumida fuera de reservas (45,15 kWh). En consecuencia, la tendencia principal se mantiene: la disminución del componente fuera de reservas se asocia principalmente a la reducción del consumo residual de las cargas monitorizadas, mientras que el consumo de la electrónica de control representa un costo operativo menor frente al beneficio energético obtenido.

En las subsección siguiente, el análisis se concentra en dos desagregaciones clave del consumo fuera de reservas: (i) el **porcentaje** de energía consumida fuera de reservas respecto al total por escenario, como indicador normalizado del nivel de consumo no autorizado, y (ii) el **desglose por tipo de carga** (PC, video-beam e iluminación), con el fin de identificar qué dispositivo aporta en mayor medida al consumo residual y dónde se evidencia con más claridad el efecto del sistema COMO.

7.1.5. Porcentaje de energía fuera de reservas y contribución por tipo de carga

Como primera normalización del resultado global, la Figura 7.16 presenta el porcentaje de energía consumida fuera de reservas respecto al total para cada escenario. Este indicador es especialmente útil porque reduce la dependencia del análisis frente a variaciones en el uso legítimo del aula (por ejemplo, más horas de clase en *After*), y permite comparar directamente qué fracción del consumo corresponde a periodos sin programación.

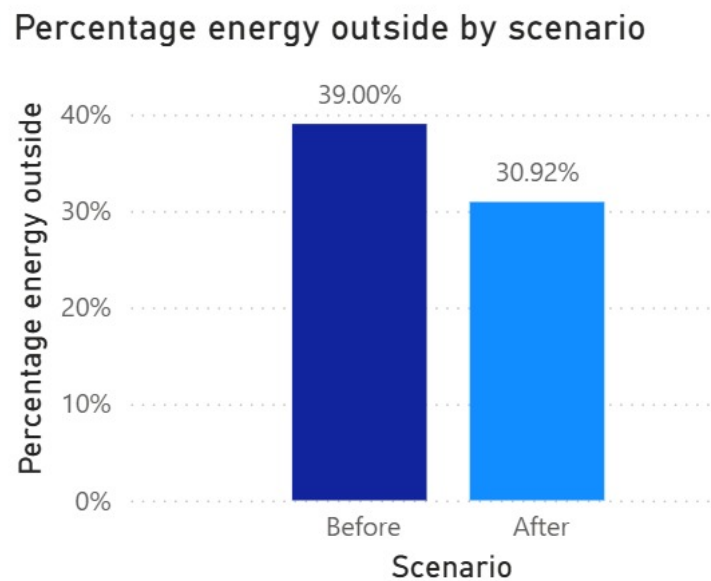


Figura 7.16: Porcentaje de energía consumida fuera de reservas respecto al consumo total, para los escenarios *Before* y *After*.

Tal como se observa en la Figura 7.16, el escenario *After* presenta una menor proporción de consumo fuera de reservas en comparación con *Before*. Este resultado refuerza el hallazgo de la subsección anterior: además de reducir energía absoluta fuera de reservas, COMO disminuye la *participación* del consumo no autorizado dentro del total medido, concentrando en mayor medida la energía dentro de periodos de uso programado.

Para identificar el origen del consumo residual, la Figura 7.17 desagrega la energía fuera de reservas por tipo de carga y por escenario. Esta visualización permite evaluar qué dispositivos tienden a permanecer energizados por fuera de la programación y en cuáles se materializa el efecto del sistema con mayor claridad.

Energy outside reservation kWh by device and scenario

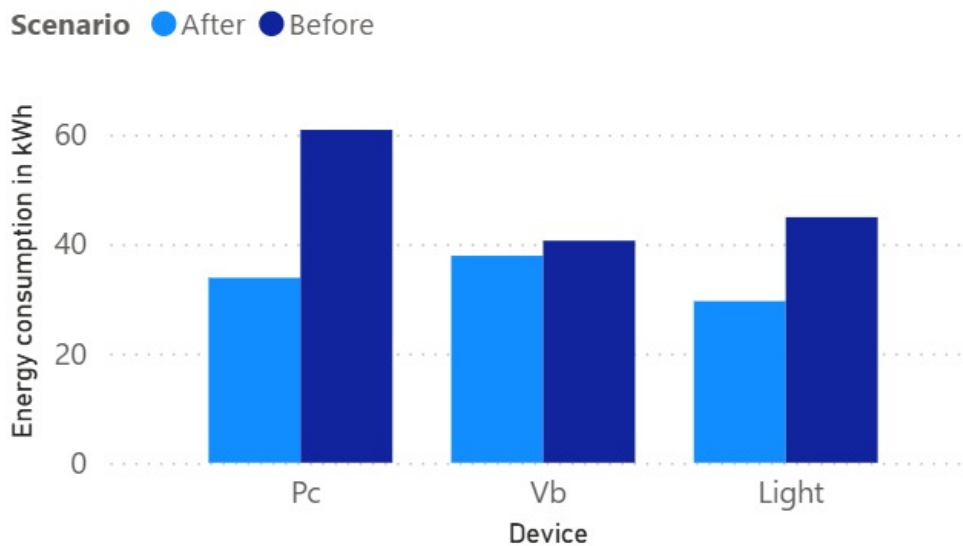


Figura 7.17: Energía consumida fuera de reservas (kWh) por tipo de carga (PC, video-beam e iluminación) para los escenarios *Before* y *After*.

En la Figura 7.17 se aprecia que la **mayor contribución al consumo fuera de reservas corresponde al computador (PC)**, y que la reducción más marcada entre escenarios se presenta precisamente en esta carga. Este comportamiento es consistente con la operación típica del aula: el computador suele permanecer encendido después de finalizar la actividad académica o durante periodos sin ocupación, por lo que constituye una oportunidad directa de ahorro para una estrategia de apagado/energización controlada.

Conclusiones

8.1. Conclusiones

1. **Se demostró la viabilidad técnica de un sistema IoT de gestión energética para aulas basado en autenticación y reservas.** Se diseñó e implementó el sistema COMO integrando (i) autenticación mediante RFID, (ii) actuación sobre cargas mediante relés para computador, video-beam e iluminación, y (iii) una capa de software con servidor web y base de datos que permite supervisión y control. La arquitectura desplegada permitió operar el aula de forma coherente con la programación académica, habilitando el uso legítimo durante reservas y enfocando la reducción del consumo en periodos sin ocupación programada.
2. **La métrica más representativa para evaluar el impacto del sistema es la energía consumida fuera de reservas.** Debido a la variación de la carga académica entre los escenarios *Before* y *After*, el consumo energético total no es un indicador suficiente por sí solo. Al desagregar el consumo en periodos con reserva y sin reserva, se evidenció que el efecto de COMO se concentra en disminuir el componente fuera de reservas, el cual representa directamente el consumo no autorizado que el sistema pretende eliminar.
3. **Durante la campaña de medición se observó una reducción cuantificable del consumo no autorizado fuera de reservas.** Al comparar escenarios, la energía fuera de reservas disminuyó de 146,28 kWh (*Before*) a 101,13 kWh (*After*), equivalente a una reducción absoluta de 45,15 kWh y una reducción relativa cercana al 30,9% respecto al valor base. En términos económicos, esto correspondió a una disminución del costo asociado al consumo fuera de reservas de 90,690 COP a 62,700 COP, es decir, un ahorro aproximado de 27,990 COP en el periodo analizado.
4. **CoMo concentró el consumo dentro de periodos autorizados sin afectar de forma apreciable el uso legítimo del aula.** La energía consumida durante reservas se mantuvo prácticamente constante entre escenarios, con valores de 228,75 kWh en *Before* y 225,94 kWh en *After*. Esta estabilidad es relevante porque indica que el sistema no reduce el consumo asociado a la actividad académica, sino que actúa principalmente sobre el consumo residual fuera del horario programado.
5. **El computador (PC) fue la carga con mayor aporte al consumo fuera de reservas y donde el efecto del sistema fue más evidente.** El análisis por tipo de carga mostró que el PC concentra una fracción importante del consumo no autorizado, consistente con la práctica

operativa del aula (equipos que quedan encendidos tras finalizar la jornada o entre bloques). En consecuencia, el mayor beneficio observable del sistema se manifestó en la reducción del consumo fuera de reservas asociado a esta carga, mientras que en iluminación y video-beam la diferencia fue más moderada, acorde con hábitos de apagado manual más frecuentes.

6. **Persistió consumo fuera de reservas en el escenario *After* debido a condiciones operativas durante el piloto.** Aunque el sistema busca evitar energización sin reserva, durante la fase de prueba se identificaron factores que explican la presencia de consumo residual en *After*: (i) docentes sin carné RFID que requirieron encendido remoto desde la interfaz web; (ii) retrasos en el apagado por intervención manual tardía o extensión de actividades; y (iii) realización de actividades no programadas en el sistema de reservas, para las cuales se solicitó el encendido de las cargas. Estos hallazgos delimitan oportunidades claras de mejora relacionadas con adopción del mecanismo de autenticación y actualización oportuna de la programación.
7. **El consumo de la electrónica de control del sistema se cuantificó y se comparó con el beneficio energético obtenido.** El dimensionamiento energético de los módulos de control indica un consumo acumulado aproximado de $1,434kWh$ para los tres subsistemas de relés y $1,134kWh$ para los tres módulos RFID en el periodo, sumando $E_{\text{RFID+relés}} \approx 2,568kWh$. Incluso considerando este costo operativo, su magnitud es pequeña frente a la reducción medida en energía fuera de reservas ($45,15 kWh$), por lo que el balance neto del sistema favorece el ahorro energético.
8. **La integración de datos y el procesamiento en Power BI habilitaron un análisis reproducible y trazable del comportamiento energético.** La estructura de datos construida permitió estimar energía incremental y energía acumulada, así como separar el consumo con y sin reserva, generar indicadores (kWh, porcentaje y costo) y desagregar por escenario, aula y tipo de carga. Esta trazabilidad constituye un aporte metodológico del trabajo, al conectar instrumentación IoT con analítica de datos para evaluar desempeño energético en escenarios reales.
9. **El proyecto establece una base sólida para escalar la solución y fortalecer su operación en ambiente universitario.** Los resultados sugieren que, con ajustes operativos (mayor cobertura de carnés RFID, protocolos de uso y apagado, y registro oportuno de actividades no programadas), es posible reducir aún más el consumo fuera de reservas. El sistema y su metodología de evaluación constituyen un punto de partida para extender el despliegue a más aulas, integrar mecanismos adicionales de automatización y mejorar la gobernanza del uso energético institucional.

9.1. Esquema de escalabilidad del sistema CoMo

El sistema CoMo se diseñó siguiendo el principio de escalabilidad horizontal: en lugar de aumentar la capacidad de un único nodo central, se considera cada aula como una unidad funcional replicable o *bloque de aula*. Cada bloque está compuesto por un módulo de autenticación RFID y control y varios módulos de actuación sobre cargas (relés para computador, video-beam e iluminación).

Todos estos dispositivos se comunican, mediante WiFi, con un servidor web y una base de datos centralizados, donde se almacenan tanto las reservas de las aulas como los datos históricos de consumo energético. La base de datos se modeló de forma genérica, utilizando identificadores de aula (`FACILITY_ID`) y de dispositivo, de modo que la incorporación de nuevos salones o edificios no requiere cambios en el esquema lógico, sino únicamente el registro de nuevos identificadores y la configuración de los nodos correspondientes.

En términos de red, cada módulo IoT opera con una dirección IP estática dentro de un rango reservado para la infraestructura del sistema CoMo, lo que facilita su descubrimiento y administración remota. El firmware de los microcontroladores se parametriza mediante constantes como el identificador de aula y las URL de los servicios HTTP del servidor, lo que permite utilizar la misma imagen de firmware en múltiples aulas, modificando únicamente los valores de configuración.

La expansión del sistema a otros salones o edificios se lleva a cabo siguiendo un procedimiento estandarizado: (i) instalación física de un kit de aula estándar, (ii) asignación de direcciones IP y parámetros de configuración, y (iii) registro de los nuevos dispositivos en la base de datos y su vinculación con la base de reservas institucional. Este esquema de escalabilidad permite que la Universidad extienda el sistema gradualmente, priorizando los espacios con mayor consumo o criticidad, sin requerir modificaciones estructurales en la arquitectura general.

9.2. Documentación del Proyecto de Integración Profesional (PIP) “CoMo: Consumo Moderado”

Como antecedente académico de este trabajo, el Proyecto de Integración Profesional (PIP) “CoMo: Consumo Moderado” desarrolló un prototipo inicial orientado al control de dispositivos electrónicos en un aula piloto. Con el fin de facilitar la consulta de los entregables del PIP (informes, diagramas, manuales, evidencias y material complementario), se dispone un repositorio documental en Google Drive:

- Repositorio (Google Drive): [Enlace al repositorio documental del PIP](#)

En caso de que el enlace requiera permisos de acceso, la plataforma solicitará la aprobación del propietario del repositorio.

9.3. Visualización interactiva de datos

Como complemento al análisis presentado en este trabajo, se desarrolló un dashboard interactivo en la plataforma Power BI, el cual permite explorar los datos de consumo energético recolectados mediante segmentadores, filtros dinámicos y visualizaciones interactivas. Este recurso facilita la comprensión de los patrones de uso y consumo energético antes y después de la implementación del sistema COMO.

El acceso al dashboard se encuentra disponible a través del siguiente enlace:

- Dashboard Power BI: app.powerbi.com/links/zGurajHETY

Debido a las políticas de seguridad de la plataforma institucional, el acceso al dashboard está restringido a usuarios con el correo institucional de la Universidad Javeriana. En caso de no contar con los permisos necesarios, la plataforma solicitará la aprobación del propietario del reporte.

Bibliografía

- [1] M. Fernando, “Normas rs-232,” *Universidad Tecnológica Nacional, Facultad Regional Córdoba, Cátedra de Comunicaciones*. [Online]. Available: https://www.profesores.frc.utn.edu.ar/sistemas/ingcura/Archivos_COM/Rs232-Centronic.PDF
- [2] J. J. Torres, “Diseño de una red wifi para la e.s.i.” accedido: 02/11/2024.
- [3] K. Finkenzeller, *RFID Handbook*. Munich, Germany: John Wiley & Sons, Ltd, 2010.
- [4] J. Hamblen, “Pushbuttons and switches,” Mbed Notebook (Arm), 2019, página actualizada: 04-Dic-2019. Accedido: 12-Dic-2025. [Online]. Available: https://os.mbed.com/users/4180_1/notebook/pushbuttons/
- [5] A. Charles and M. Sadiku, *Fundamental of Electric Circuits*. Penn Plaza, New York: McGraw Hill, 2010.
- [6] H. Inc., *Hall Effect Sensing and Application*. 11 West Spring Street, Freeport, Illinois 61032: Honeywell Inc.
- [7] GeeksforGeeks. (2021) State the core components of an http response? [Online]. Available: <https://www.geeksforgeeks.org/software-engineering/state-the-core-components-of-an-http-response/>
- [8] M. A. Black. (2019) Php and mysql. [Online]. Available: <https://www.slideserve.com/alvis/php-mysql>
- [9] M. Suárez. (2020) Qué es una vlan. [Online]. Available: <https://ccnadesdecero.com/curso/vlan/>
- [10] J. M. Arboleda, D. Ardila, D. Chilito, and S. Colorado, “Como: Consumo moderado,” *PIP: Proyecto de Integración Profesional, Universidad Javeriana Cali*, 2024.
- [11] A. Perles, “Comunicación serie rs-232,” *Apuntes de Comunicaciones Serie RS-232*. [Online]. Available: https://www.disca.upv.es/aperles/asignatures/antic/sii/comunicaciones_serie_RS_232.pdf
- [12] A. Silberschatz, H. F. Korth, and S. Sudarshan, *Fundamentos de Bases de Datos*. Penn Plaza, New York: McGraw Hill, 2006.
- [13] J. J. Anguís Horno, “Redes de Área local inalámbricas: Diseño de la wlan de wheelers lane technology college,” 2008, accedido: 02/11/2024.
- [14] B. Hopf, “Choosing an appropriate pull-up/pull-down resistor for open drain outputs,” Texas Instruments, Tech. Rep. SLVA485, Oct. 2011, accedido: 12-12-2025. [Online]. Available: <https://www.ti.com/lit/pdf/slva485>

- [15] NXP Semiconductors, *MFRC522: Standard performance MIFARE and NTAG frontend*, Apr. 2016, data sheet. [Online]. Available: https://www.nxp.com/documents/data_sheet/MFRC522.pdf
- [16] Texas Instruments, “Introduction to hall-effect sensors,” 2024.
- [17] R. T. Fielding and J. F. Reschke. (2014) Hypertext transfer protocol (http/1.1): Semantics and content. [Online]. Available: <https://www.rfc-editor.org/rfc/rfc7231>
- [18] Apache Software Foundation. (2024) Apache http server documentation. [Online]. Available: <https://httpd.apache.org/docs/>
- [19] Apache Friends. (2024) Xampp documentation and faqs. [Online]. Available: <https://www.apachefriends.org>
- [20] Oracle Corporation. (2024) Mysql 8.0 reference manual. [Online]. Available: <https://dev.mysql.com/doc/refman/8.0/en/>
- [21] Cisco Systems, Inc. (2024) Virtual lans (vlans) overview. [Online]. Available: <https://www.cisco.com/>
- [22] International Electrotechnical Commission, “IEC 60950-1: Information Technology Equipment – Safety – Part 1: General Requirements,” *IEC Standards*, 2005, actualizado por IEC 62368-1.
- [23] —, “IEC 60364: Low-voltage electrical installations,” *IEC Standards*, 2016.
- [24] H. G. Granados Guerrero and F. E. Duarte Rubio, “Sistema de control de luminarias y aires acondicionados y monitoreo de energía eléctrica y temperatura de aulas del edificio de posgrados de la universidad libre seccional cúcuta,” 2021, accedido: 02/11/2024.
- [25] O. A. Rosete Beas, “Desarrollo de plataforma iot para control y monitoreo de salones de clase y laboratorios de innovación,” 2019, accedido: 02/11/2024.
- [26] T. H. Noor, E.-S. Atlam, A. M. Almars, A. Noor, and A. S. Malki, “An iot-based energy conservation smart classroom system,” *Intelligent Automation & Soft Computing*, vol. 35, no. 3, pp. 3785–3799, 2023. [Online]. Available: <https://www.techscience.com/iasc/v35n3/49426>
- [27] L. Pocero, S. Tsampas, G. Mylonas, and D. Amaxilatis, “Experiences from using lora and ieee 802.15.4 for iot-enabled classrooms,” *arXiv preprint arXiv:2102.08675*, 2021. [Online]. Available: <https://arxiv.org/abs/2102.08675>
- [28] L. A. Prasetya, A. Rofiudin, and H. W. Herwanto, “Implementation of internet of things (iot) in education: A systematic literature review,” *Journal of Education and Computer Applications*, vol. 2, no. 1, pp. 1–45, 2025. [Online]. Available: <https://jeca.aks.or.id/jeca/article/view/19>
- [29] A. C. Jaimes Chacon, “Sistema inteligente para el control de consumo de energía en el hogar,” 2021, accedido: 02/11/2024.