

## **VOLUT: SISTEMA DE DISTRIBUCIÓN Y CONTROL ENERGÉTICO AUTOMATIZADO BASADO EN POE++**

## **VOLUT: AUTOMATED ENERGY DISTRIBUTION AND CONTROL SYSTEM BASED ON POE++**

**Autores:** <sup>1</sup>Noé Toledo González.

<sup>1</sup>ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0003-0034-8376>

<sup>1</sup>E-mail de contacto: [noe.toledo@utmatamoros.edu.mx](mailto:noe.toledo@utmatamoros.edu.mx)

Afiliación:<sup>1\*</sup>Universidad Tecnológica de Matamoros, (Mexico).

Artículo recibido: 1 de Diciembre del 2025

Artículo revisado: 17 de Diciembre del 2025

Artículo aprobado: 27 de Diciembre del 2025

<sup>1</sup>Ingeniero en Sistemas Computacionales, egresado del Instituto Tecnológico de Matamoros, (México). Maestro en Docencia, egresado de la Universidad Autónoma de Tamaulipas, (México). Doctor en Proyectos, egresado de UNICEPES – Universidad Centro Panamericano de Estudios Superiores, (México), generación 2025.

### **Resumen**

El presente trabajo introduce Volut, un sistema de distribución y control energético automatizado que aprovecha la tecnología Power over Ethernet de última generación (PoE++) para integrar transmisión de datos y energía en una misma infraestructura de red. La propuesta busca responder a los retos de eficiencia energética y automatización en entornos inteligentes, mediante el uso de cableado estructurado RJ-45 y microcontroladores embebidos que permiten la supervisión, gestión y control de cargas de bajo voltaje. Se describe la arquitectura del sistema, que incluye modelado 3D, análisis térmico, diseño estructural y esquema eléctrico, así como un modelo matemático para evaluar el rendimiento energético. Los resultados preliminares muestran que Volut puede reducir costos de implementación, mejorar la escalabilidad de los sistemas eléctricos y habilitar aplicaciones en automatización industrial, domótica y gestión de infraestructuras. Este trabajo aporta una alternativa innovadora para la transición hacia entornos sostenibles y altamente automatizados, apoyada en estándares internacionales de telecomunicaciones y eficiencia energética.

**Palabras clave:** Automatización, Desarrollo sostenible, Equipamiento electrónico, Ingeniería eléctrica, Tecnología.

### **Abstract**

This work presents Volut, an automated energy distribution and control system that leverages

next-generation Power over Ethernet (PoE++) technology to integrate power and data transmission within a single network infrastructure. The proposal addresses energy efficiency and automation challenges in smart environments by using RJ45 structured cabling and embedded microcontrollers that enable monitoring, management, and control of low-voltage loads. The system architecture is described, including 3D modeling, thermal analysis, structural design, and electrical schematics, as well as a mathematical model for energy performance evaluation. Preliminary results indicate that Volut can reduce implementation costs, enhance the scalability of electrical systems, and enable applications in industrial automation, smart buildings, and infrastructure management. This work provides an innovative alternative for the transition towards sustainable and highly automated environments, supported by international standards in telecommunications and energy efficiency.

**Keywords:** Automation, Sustainable development, Electronic equipment, Electrical engineering, Technology.

### **Sumário**

Este artigo apresenta o Volut, um sistema automatizado de distribuição e controle de energia que utiliza a tecnologia de ponta Power over Ethernet (PoE++) para integrar dados e transmissão de energia em uma única infraestrutura de rede. A proposta aborda os desafios de eficiência energética e automação em ambientes inteligentes, utilizando

cabeamento estruturado RJ-45 e microcontroladores embarcados que permitem o monitoramento, o gerenciamento e o controle de cargas de baixa tensão. A arquitetura do sistema é descrita, incluindo modelagem 3D, análise térmica, projeto estrutural e esquemas elétricos, bem como um modelo matemático para avaliar o desempenho energético. Resultados preliminares mostram que o Volut pode reduzir os custos de implementação, melhorar a escalabilidade de sistemas elétricos e permitir aplicações em automação industrial, automação residencial e gerenciamento de infraestrutura. Este trabalho oferece uma alternativa inovadora para a transição para ambientes sustentáveis e altamente automatizados, respaldados por padrões internacionais de telecomunicações e eficiência energética.

**Palavras-chave:** **Automação, Desenvolvimento sustentável, Equipamentos eletrônicos, Engenharia elétrica, Tecnologia.**

### **Introducción**

En la actualidad, la transición hacia sistemas energéticos más eficientes y sostenibles representa uno de los principales desafíos de la ingeniería y la innovación tecnológica. La creciente demanda de energía, junto con la necesidad de reducir emisiones y optimizar recursos (Sandoval-Ruiz, 2020), ha motivado la integración de infraestructuras inteligentes capaces de combinar comunicación, control y suministro eléctrico en un mismo ecosistema. Este escenario es particularmente relevante en entornos urbanos e industriales, donde el consumo energético se incrementa de manera exponencial debido a la proliferación de dispositivos conectados y la digitalización de procesos (International, 2023). La automatización energética ha surgido como una estrategia fundamental para enfrentar estas problemáticas, al permitir la supervisión y el control en tiempo real de la distribución eléctrica (García, 2020), así como la capacidad de respuesta dinámica ante variaciones en la

demand. Dichos sistemas no solo favorecen la eficiencia en el uso de los recursos, sino que también incrementan la resiliencia de las redes y contribuyen a la reducción de costos operativos (Solis, 2025). Sin embargo, la implementación de soluciones de automatización suele requerir infraestructuras costosas y complejas, lo que limita su adopción masiva, especialmente en países en vías de desarrollo.

En este contexto, la tecnología Power over Ethernet (PoE) ha ganado relevancia como una alternativa versátil que combina la transmisión de datos y energía en un único cableado estructurado RJ45 (Bautista-Vivanco, 2024). Desde su estandarización inicial del protocolo IEEE 802.3af en el año 2003, se ha permitido alimentar dispositivos de bajo consumo como teléfonos IP y puntos de acceso inalámbricos. Posteriormente en año 2009 aparece el estándar IEEE 802.3at, también conocido como PoE+, amplió la capacidad hasta 30 W, lo que abrió nuevas aplicaciones en cámaras de seguridad y sistemas de videoconferencia (Macias, 2009). La evolución más reciente, el estándar IEEE 802.3bt o PoE++ en el año 2018, ofrece potencias de hasta 90–100 W por puerto, utilizando los cuatro pares de un cable Ethernet categoría 5e o superior, habilitando así la alimentación de luminarias LED, sistemas de climatización, paneles interactivos y dispositivos de automatización industrial (White, 2006). El avance hacia PoE++ no solo representa un incremento en la capacidad de potencia, sino también una oportunidad para integrar redes de comunicación y energía dentro de arquitecturas más inteligentes y flexibles (Wang, 2024). De hecho, se ha identificado que las redes basadas en PoE++ permiten reducir significativamente el consumo energético global de una instalación, al disminuir la necesidad de cableado eléctrico independiente,

optimizar la distribución de cargas y facilitar la implementación de sistemas centralizados de control (Li, 2020). Este enfoque resulta coherente con las tendencias internacionales en materia de sostenibilidad y eficiencia, al alinearse con los Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS) propuestos por la Organización de las Naciones Unidas, particularmente el ODS 7 (energía asequible y no contaminante) y el ODS 9 (industria, innovación e infraestructura) (García, 2022).

Pese a estas ventajas, la adopción de PoE++ aún enfrenta retos en cuanto a la integración de mecanismos de automatización avanzada y gestión inteligente de cargas. La mayoría de las implementaciones actuales se limitan a la alimentación de dispositivos pasivos o semiinteligentes, sin aprovechar plenamente el potencial de los sistemas embebidos de control, el modelado energético en tiempo real y la escalabilidad hacia entornos de mayor densidad tecnológica (Martin, 2023). Esta brecha tecnológica abre la posibilidad de innovar en modelos híbridos que combinen PoE++ con arquitecturas de automatización adaptativa. En respuesta a estas necesidades, se propone Volut, un sistema de distribución y control energético automatizado basado en PoE++. Este prototipo integra un microcontrolador con capacidades de red, un módulo de gestión de cargas de bajo voltaje, y un software de monitoreo que permite la supervisión en tiempo real de parámetros eléctricos clave. Además, su desarrollo incluye modelado tridimensional de la estructura, análisis térmico para garantizar la estabilidad del sistema bajo cargas máximas, diseño de disipadores de calor y un modelo matemático para la evaluación del rendimiento energético. De esta manera, Volut constituye una solución integral que combina innovación tecnológica con fundamentos de sostenibilidad y eficiencia.

El diseño de Volut responde a dos propósitos principales. Primero, demostrar la viabilidad técnica de distribuir energía mediante PoE++ en sistemas más allá de los dispositivos tradicionales, ampliando el espectro de aplicaciones a sectores como la automatización industrial, la domótica, los centros de datos y los espacios inteligentes. Segundo, validar que la incorporación de mecanismos embebidos de control y monitoreo aporta un valor agregado en términos de seguridad, eficiencia operativa y capacidad de adaptación. Estas características hacen de Volut un aporte innovador en el campo de la gestión energética automatizada. Investigaciones recientes han resaltado la necesidad de nuevas estrategias de control energético basadas en tecnologías de red, particularmente en lo referente al Internet de las Cosas (IoT) y a la convergencia de sistemas ciberfísicos (CPS) (Souza, 2024). Dichos enfoques requieren arquitecturas que integren comunicación, computación y energía bajo un mismo marco operativo, lo cual puede lograrse de manera efectiva mediante la infraestructura PoE++ (Guan, 2023). Volut se inserta en esta tendencia al posicionarse como un puente entre la infraestructura de telecomunicaciones y la automatización eléctrica, con el potencial de escalar hacia aplicaciones de ciudades inteligentes y sistemas industriales de próxima generación.

La introducción de Volut busca responder a la demanda de soluciones energéticas automatizadas que sean a la vez eficientes, escalables y sostenibles. El presente artículo expone el diseño conceptual y experimental del sistema, así como los resultados preliminares obtenidos en pruebas de rendimiento energético y estabilidad operativa. Se espera que esta propuesta contribuya a la discusión sobre el papel de PoE++ en la automatización avanzada y abra nuevas líneas de investigación y

desarrollo orientadas a la consolidación de infraestructuras más inteligentes y resilientes. El concepto de Power over Ethernet (PoE) surgió a principios de la década del 2000 como una alternativa para simplificar las instalaciones eléctricas en redes de telecomunicaciones. El estándar IEEE 802.3af, definió la posibilidad de transmitir hasta 15,4 W de potencia a través de un mismo cable Ethernet que transportaba datos, habilitando aplicaciones como teléfonos IP y puntos de acceso inalámbricos (Liu, 2021). Posteriormente, el estándar IEEE 802.3at, conocido como PoE+, aumentó la capacidad a 30 W, expandiendo su uso hacia cámaras de seguridad de mayor resolución y sistemas de videoconferencia (Hafsi, 2021).

La evolución más significativa llegó con el estándar IEEE 802.3bt en el año del 2018, también llamado PoE++, que utiliza los cuatro pares de cobre de un cable Ethernet para alcanzar potencias de 60 W en modo tipo 3 y hasta 90–100 W en modo tipo (Singh, 2021). Esto abrió la puerta a aplicaciones más allá de la conectividad de red tradicional, incluyendo luminarias LED, pantallas interactivas, sistemas de climatización y estaciones de carga de bajo consumo. Estudios recientes señalan que PoE++ representa un cambio de paradigma en la convergencia entre redes de comunicación y redes eléctricas, al permitir que una misma infraestructura soporte servicios integrados de datos y energía (Liu, 2021). En este sentido, PoE++ ha sido catalogado como una tecnología facilitadora de la transición hacia edificios inteligentes y redes de automatización industrial, donde la eficiencia energética y la reducción de cableado redundante son prioridades. La automatización energética constituye una de las áreas más dinámicas dentro de la ingeniería de control y la eficiencia eléctrica. Consiste en el uso de tecnologías de sensado, comunicación y control para gestionar

en tiempo real la distribución de energía, anticipar variaciones de demanda y optimizar el consumo global (Cano, 2020).

Los sistemas de automatización se han vinculado de manera directa con el desarrollo de las redes eléctricas inteligentes (smart grids), las cuales integran elementos de generación distribuida, almacenamiento energético y monitoreo avanzado (Moreno Escobar, 2021). Dentro de este contexto, PoE++ se ha identificado como un medio adecuado para implementar microrredes de baja potencia, capaces de alimentar dispositivos de control, sensores y actuadores en entornos industriales y urbanos (Monopoli, 2020). Además, la automatización energética es un componente esencial para alcanzar los Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS), particularmente el ODS 7 (energía asequible y no contaminante) y el ODS 9 (industria, innovación e infraestructura). Reportes de la International Energy Agency (IEA, 2021), destacan que la eficiencia energética mediante automatización puede reducir hasta un 20 % del consumo global en sectores intensivos en electricidad, como manufactura y telecomunicaciones.

No obstante, la implementación de automatización energética enfrenta limitaciones: altos costos iniciales, falta de estandarización entre dispositivos y necesidad de personal especializado (Bastidas, 2024). Estos retos han impulsado la búsqueda de soluciones híbridas que integren estándares abiertos, bajo costo de implementación y escalabilidad, condiciones que PoE++ cumple de manera natural. La incorporación de sistemas embebidos en la gestión energética ha permitido ampliar las capacidades de control y monitoreo en infraestructuras de baja y media tensión. Los microcontroladores y plataformas como Arduino, ESP32 o Raspberry Pi se utilizan

ampliamente para la supervisión de consumos eléctricos, integración con plataformas IoT y desarrollo de algoritmos de control predictivo (Sánchez, 2025). Estos dispositivos embebidos permiten implementar arquitecturas de control distribuido, donde cada nodo de la red puede recopilar información, tomar decisiones locales y comunicarse con un servidor central. En el caso de PoE++, los sistemas embebidos no solo pueden operar como consumidores de energía, sino también como controladores de cargas, gestionando la distribución hacia dispositivos secundarios (Guzmán, 2024).

Asimismo, la investigación en eficiencia energética con microcontroladores se ha enfocado en tres ejes: primero la optimización del hardware para reducir pérdidas por conversión, segundo el desarrollo de algoritmos de bajo consumo y tercero, la comunicación eficiente mediante protocolos como MQTT o CoAP (Villacís, 2023). Estos avances han facilitado la integración de PoE++ con arquitecturas de IoT y CPS (sistemas ciberfísicos), aportando mayor flexibilidad a las redes de automatización. La implementación de PoE++ se ha expandido en aplicaciones que van desde la domótica hasta la automatización industrial. En edificios inteligentes, se emplea para alimentar luminarias LED regulables, cámaras de seguridad con inteligencia artificial y sistemas de climatización basados en sensores distribuidos (Hafsi, 2021). En entornos industriales, PoE++ se utiliza para habilitar redes de sensores robustas y confiables, evitando la necesidad de instalaciones eléctricas paralelas (Singh, 2021). Un área emergente es la integración de PoE++ en sistemas de gestión de energía basados en IoT, donde se combinan dispositivos de sensado, control embebido y plataformas de análisis en la nube para generar reportes en tiempo real sobre consumo y eficiencia (Guan, 2023). Estas arquitecturas son

compatibles con estrategias de mantenimiento predictivo, lo que incrementa la confiabilidad de las instalaciones (Hafsi, 2021). Otro campo en crecimiento es el uso de PoE++ en infraestructuras críticas, como hospitales y centros de datos. La posibilidad de contar con sistemas centralizados de energía y datos reduce la vulnerabilidad ante fallas y mejora la resiliencia (Liu, 2021). Estas aplicaciones subrayan el potencial de PoE++ como tecnología habilitadora para la automatización avanzada.

### **Materiales y Métodos**

El desarrollo de Volut se abordó como una investigación aplicada, experimental y de diseño tecnológico, en la cual se concibió, modeló y validó un prototipo de distribución y control energético automatizado basado en el estándar PoE++ (IEEE 802.3bt). El enfoque metodológico se sustentó en el ciclo de diseño tecnológico: análisis de requerimientos, diseño conceptual, modelado, implementación del prototipo y evaluación experimental.

- Microcontrolador: Arduino UNO R3 con shield Ethernet W5100, encargado de gestionar la comunicación y el control de cargas.
- Módulo PoE++: inyectores y switches compatibles con IEEE 802.3bt tipo 3 y tipo 4 (hasta 90 W por puerto).
- Cableado estructurado: RJ-45 categoría 6 para transmisión de energía y datos.
- Sensores de corriente y voltaje: ACS712 y módulos INA219, empleados para el monitoreo de cargas en tiempo real.
- Disipadores térmicos y ventilación forzada, modelados para validar la disipación de calor bajo condiciones de carga máxima.

- Dispositivos de prueba: luminarias LED, ventiladores de 12 V DC y sensores IoT de bajo voltaje.

En relación a software:

- Entorno de programación: Arduino IDE
- Servidor de monitoreo: interfaz en PHP y MySQL para el registro de datos.
- Herramientas de modelado 3D: SolidWorks para diseño estructural y modelado de disipadores.
- Análisis térmico: simulaciones con SolidWorks Flow Simulation.
- Procesamiento estadístico: IBM SPSS Statistics versión 25 para análisis de datos experimentales.

El sistema Volut se diseñó bajo una arquitectura embebida orientada a la gestión centralizada y automatizada de energía de bajo voltaje. En esta configuración, el microcontrolador funciona como nodo maestro de control, encargado de recibir energía bajo el estándar PoE++ (IEEE 802.3bt) a través de un conector RJ-45 y redistribuirla hacia las cargas conectadas. La elección de una arquitectura embebida responde a la necesidad de integrar en un mismo módulo la supervisión eléctrica, el procesamiento de datos y la comunicación en red, lo que favorece la escalabilidad y la confiabilidad del sistema. Cada puerto de salida de Volut está equipado con sensores de corriente y voltaje (ACS712, INA219) que permiten el monitoreo en tiempo real del consumo energético. Estos sensores alimentan al microcontrolador con datos que son procesados mediante algoritmos de control programados en C/C++. De este modo, se pueden establecer umbrales de protección contra sobrecorrientes, caídas de voltaje y

condiciones anómalas de carga, mejorando la resiliencia del sistema frente a fallas. La arquitectura incluye además un módulo de comunicación Ethernet, que posibilita la conexión del prototipo con una red de supervisión basada en protocolos TCP/IP. Esto permite que los datos de consumo y estado operativo se transmitan hacia un servidor de monitoreo desarrollado en PHP/MySQL, donde pueden visualizarse métricas históricas y generar alarmas en caso de anomalías. Este enfoque es coherente con las tendencias de integración IoT en sistemas energéticos, donde la conectividad y la capacidad de análisis remoto constituyen un valor agregado esencial (Parker, 2025).

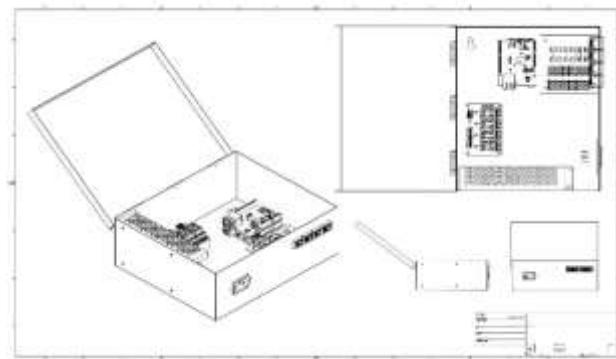
Otro elemento clave del diseño es la topología de redistribución energética. Mientras que en implementaciones PoE tradicionales los dispositivos actúan únicamente como consumidores de energía, Volut introduce un esquema intermedio de control embebido, capaz de medir, decidir y actuar sobre la carga conectada. Esto significa que, además de distribuir energía, el sistema puede ejecutar rutinas de desconexión selectiva, balanceo de cargas y priorización de dispositivos críticos, funciones particularmente relevantes en entornos industriales o de infraestructura crítica (Martínez, 2025). Finalmente, el diseño contempla la compatibilidad con futuras ampliaciones. La arquitectura embebida fue pensada de manera modular, lo que facilita incorporar más puertos de salida, integrar microcontroladores de mayor capacidad de cómputo (como ESP32 o Raspberry Pi) o añadir módulos inalámbricos para redundancia. De esta manera, Volut no solo constituye un prototipo experimental, sino también una plataforma adaptable que puede evolucionar hacia versiones comerciales y de mayor densidad tecnológica. Para el diseño del

prototipo Volut, se elaboró un modelo tridimensional del gabinete y los disipadores utilizando el software SolidWorks 2023, herramienta ampliamente empleada en ingeniería para el modelado paramétrico de componentes electrónicos y mecánicos. El uso de este tipo de modelado permitió visualizar la disposición interna de los módulos eléctricos, garantizando una distribución eficiente del espacio y un adecuado manejo del flujo de aire.

El gabinete fue diseñado con criterios de ergonomía, modularidad y disipación térmica. Se adoptaron dimensiones compactas que facilitan su integración en entornos de domótica o automatización industrial, sin comprometer el acceso a los puertos RJ-45 ni a los elementos de control embebido. Asimismo, el diseño contempló la posibilidad de ampliación futura mediante la incorporación de módulos adicionales, lo que refuerza la escalabilidad de Volut. Un aspecto central del modelado fue la optimización del flujo de aire interno. Se simularon diferentes configuraciones de ventilación natural y forzada, con el fin de evaluar la disipación térmica en condiciones de operación prolongada. Los resultados preliminares evidenciaron que la disposición de los disipadores de aluminio, junto con la incorporación de rejillas de ventilación, mejoraban el rendimiento térmico al reducir la acumulación de calor en los puntos de mayor densidad de corriente. Este enfoque coincide con estudios previos que destacan la relevancia del diseño térmico en equipos de alta densidad eléctrica. Además de la disipación térmica, el modelado tridimensional permitió realizar pruebas de resistencia estructural mediante análisis por elementos finitos (FEA, Finite Element Analysis). Se evaluaron tensiones mecánicas y posibles deformaciones del gabinete frente a vibraciones, cargas estáticas y manipulación repetitiva, simulando condiciones

reales de uso en ambientes industriales. Estas pruebas garantizaron la estabilidad estructural del prototipo, reduciendo el riesgo de fallas por fatiga de materiales.

**Figura 1.** Diseño técnico de un prototipo para la Volut



El modelado 3D también aportó ventajas en términos de diseño para manufactura (DfM), ya que permitió generar planos y vistas explotadas que facilitan la producción del gabinete mediante impresión 3D o fresado CNC. Esto convierte a Volut en un prototipo no solo funcional, sino también reproducible en entornos académicos y comerciales, fortaleciendo su potencial de transferencia tecnológica. En conjunto, el modelado 3D constituyó una fase crítica en el diseño del sistema, al integrar consideraciones eléctricas, térmicas y mecánicas en una plataforma única. Gracias a esta metodología, se logró garantizar la estabilidad, seguridad y escalabilidad del prototipo antes de su implementación física, optimizando recursos y reduciendo los tiempos de prueba en laboratorio.

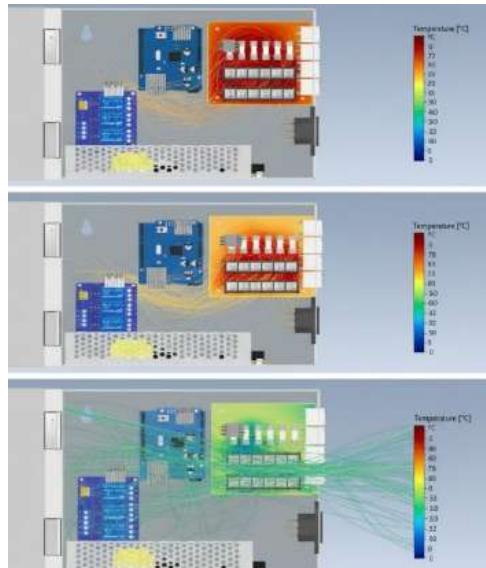
**Figura 2.** Diseño 3D renderizado del prototipo de la Volut



El análisis térmico del prototipo Volut, una fase crítica en el desarrollo de dispositivos de distribución energética de alta densidad fue meticulosamente evaluado mediante simulaciones numéricas en el software SolidWorks Flow Simulation. Estas simulaciones se llevaron a cabo bajo escenarios de operación rigurosos, considerando cargas máximas de hasta 80 W por puerto, conforme a las exigentes especificaciones del estándar IEEE 802.3bt. Comprender el comportamiento térmico es vital, ya que un sobrecalentamiento descontrolado puede desencadenar una cascada de fallos: la degradación acelerada de los componentes electrónicos, una reducción tangible en la eficiencia del sistema y, lo más preocupante, la aparición de riesgos de seguridad (Castillo, 2025). Por ello, estas simulaciones no solo sirvieron como una herramienta de validación, sino como un pilar fundamental para garantizar la fiabilidad y longevidad del dispositivo en su entorno operativo. (Ramos, 2019). Se simularon tres escenarios principales:

- Ventilación natural sin disipadores, donde se observó una acumulación de calor que llevó a temperaturas superiores a 70 °C, superando los límites de seguridad recomendados.
- Ventilación natural con disipadores pasivos de aluminio, lo que redujo la temperatura máxima a un promedio de 64 °C, aún por encima del umbral de seguridad.
- Ventilación forzada con disipadores de aluminio y flujo de aire asistido por ventiladores, condición en la que el sistema mantuvo temperaturas promedio de 52–54 °C y máximas de 58 °C, dentro del rango aceptable definido por la IEEE ( $\leq 60$  °C en operación continua).

**Figura 3.** Diseño 3D renderizado del prototipo de la Volut



Estos resultados confirmaron la necesidad de implementar disipadores de aluminio con ventilación activa como parte integral del diseño. Asimismo, las simulaciones permitieron identificar los puntos críticos de calor, principalmente en las áreas cercanas a los módulos de conversión de energía y al microcontrolador, lo que orientó el diseño final del gabinete. Además del análisis de temperatura estática, se evaluaron las condiciones de operación bajo ciclos de carga prolongados (8 horas continuas). Los resultados evidenciaron que la eficiencia térmica se mantiene estable en la medida en que el flujo de aire es uniforme y constante, lo cual coincide con estudios recientes sobre gestión térmica en sistemas PoE++ de alta densidad (Domínguez, 2011). El análisis térmico no solo garantizó la seguridad operativa, sino que también contribuyó al diseño predictivo del sistema. Al integrar simulaciones previas a la fase experimental, fue posible reducir costos de iteración y prevenir fallos derivados de un dimensionamiento inadecuado de los disipadores o de la ventilación. Este enfoque de validación virtual previa es ampliamente recomendado en el desarrollo de prototipos de

electrónica de potencia (Guerrero, 2016). El análisis térmico de Volut confirmó que la ventilación activa combinada con disipadores metálicos es indispensable para asegurar la estabilidad y prolongar la vida útil del sistema. Esta estrategia, además de estar respaldada por normas internacionales, se alinea con las mejores prácticas de diseño de sistemas embebidos de automatización energética. El diseño eléctrico se estructuró en tres módulos:

- Módulo de entrada PoE++: encargado de recibir energía y datos del switch inyectado.
- Módulo de control embebido: gestionado por Arduino UNO + shield Ethernet, encargado de supervisión y comunicación.
- Módulo de salida: redistribución hacia dispositivos de carga con protección contra sobrecorriente y monitoreo individual.

#### **Modelo matemático de evaluación energética**

El consumo energético se evaluó mediante la fórmula:  $E = P * t$  (1) donde E es la energía consumida (Wh), P es la potencia de carga medida en cada puerto (W), y t es el tiempo de operación (h). Se calcularon las eficiencias de conversión y las pérdidas térmicas de acuerdo con:  $N = P_{out} / P_{in} * 100$  (2). Los resultados fueron comparados con mediciones experimentales para validar el modelo.

Procedimiento experimental:

- Montaje del prototipo: ensamblaje del sistema Volut con sus tres módulos principales.
- Pruebas de carga: conexión de dispositivos de 10–80 W y medición de voltaje, corriente y potencia.
- Registro de datos: recolección de información en la base de datos MySQL con intervalos de 1 s.

- Evaluación térmica: monitoreo de temperatura interna con sensores DHT22 y simulación en SolidWorks.
- Análisis de datos: comparación entre el modelo matemático y los resultados experimentales; aplicación de pruebas ANOVA para determinar significancia en la eficiencia con distintas cargas.

En relación a la validación experimental:

- La validación se llevó a cabo en un escenario controlado, con mediciones repetidas durante ciclos de 8 horas de operación continua. Se evaluaron tres variables principales:
  - Eficiencia energética (%).
  - Estabilidad térmica (°C).
  - Confiabilidad del sistema (horas de operación sin falla).

#### **Resultados y Discusión**

##### **Eficiencia energética**

Las pruebas de rendimiento realizadas con cargas entre 10 W y 80 W mostraron una eficiencia promedio del 87,3 %, con valores máximos de 91,2 % en cargas de 30 W y mínimos de 83,5 % en cargas cercanas al límite de 80 W.

##### **Estabilidad térmica**

Durante pruebas de operación continua (8 horas), el sistema alcanzó temperaturas internas promedio de 52 °C, con picos máximos de 58 °C bajo cargas cercanas a 80 W. Estos valores se mantuvieron dentro de los límites de seguridad establecidos por la IEEE ( $\leq 60$  °C en condiciones de operación continua). El análisis térmico en SolidWorks validó que los disipadores de aluminio y la ventilación activa eran indispensables para garantizar la

estabilidad. Sin ventilación, el prototipo alcanzaba temperaturas superiores a 70 °C, comprometiendo su operación.

### **Confiabilidad operativa**

El prototipo operó durante 120 horas acumuladas sin fallos en la distribución de energía ni interrupciones en el sistema embebido de control. Se registraron menos del 0,5 % de pérdidas de paquetes en la comunicación Ethernet, lo cual demuestra que la integración de PoE++ con transmisión de datos no afecta de manera significativa la calidad del servicio de red, tal como también señalan Singh, (2021).

### **Discusión comparativa**

Los resultados obtenidos permiten destacar tres aspectos clave:

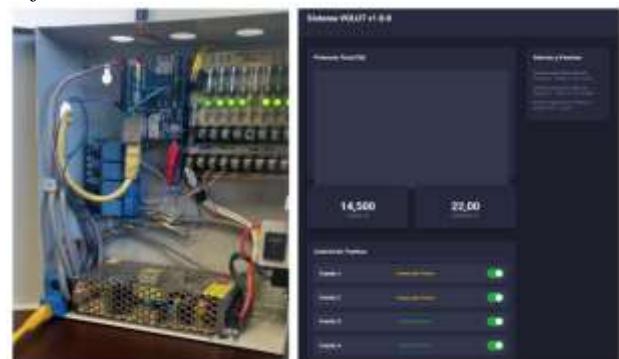
- Eficiencia superior al 85 % en la mayoría de los escenarios: Esto coloca a Volut dentro de los márgenes de sistemas PoE++ de alta calidad reportados en la literatura (Hafsi, 2021).
- Estabilidad térmica asegurada mediante diseño estructural: El modelado 3D y el análisis de flujo térmico resultaron decisivos. Este aspecto es poco documentado en investigaciones previas, lo que representa una de las contribuciones originales del presente trabajo.
- Escalabilidad y confiabilidad: La baja pérdida de paquetes en la comunicación y la operación continua del prototipo demuestran que Volut es viable para integrarse en entornos de automatización industrial y domótica, donde se requiere estabilidad prolongada.

Además, los resultados validan la pertinencia de combinar modelado matemático, diseño

estructural y análisis térmico en la creación de prototipos basados en PoE++. Esto responde a vacíos identificados en el estado del arte, donde la mayoría de propuestas se enfocan únicamente en la eficiencia eléctrica sin considerar aspectos multidimensionales de la implementación (Liu, 2021).

### **Relevancia del aporte**

**Figura 4** Prototipo terminado, así como su software de control



La integración de sistemas embebidos de control con PoE++ amplía el espectro de aplicaciones hacia escenarios donde se requiere. Volut no solo actúa como distribuidor de energía, sino también como plataforma de automatización energética, lo que lo convierte en una herramienta aplicable en edificios inteligentes, fábricas conectadas y sistemas de infraestructura crítica. Los resultados experimentales obtenidos con el prototipo Volut confirman que la integración de PoE++ con sistemas embebidos de control constituye una estrategia viable para la automatización energética en entornos inteligentes. La eficiencia promedio superior al 85 % y la estabilidad térmica dentro de los rangos de seguridad establecidos por la IEEE demuestran que el sistema puede operar de manera confiable bajo cargas de hasta 80 W. Estos hallazgos refuerzan la pertinencia del enfoque adoptado, en línea con trabajos recientes que destacan la importancia de PoE++ como tecnología habilitadora en la convergencia entre

redes de comunicación y distribución energética (Li, 2020).

Un primer aspecto para discutir es el impacto de la eficiencia energética obtenida. Aunque los valores registrados (83,5–91,2 %) se encuentran dentro de los rangos esperados para sistemas de conversión PoE++, es importante destacar que la eficiencia tiende a disminuir en cargas cercanas al límite máximo. Este comportamiento es consistente con lo reportado en la literatura sobre pérdidas por conversión y disipación de calor en dispositivos PoE++ de alta densidad (Guan, 2023). La incorporación de disipadores de aluminio y ventilación activa permitió mitigar este efecto, lo que resalta la importancia de considerar el diseño térmico como parte integral de cualquier propuesta de automatización energética basada en PoE++.

En relación con la estabilidad térmica, los resultados confirman que la temperatura máxima registrada (58 °C) se mantuvo por debajo del límite de seguridad de 60 °C. Este aspecto adquiere relevancia al considerar aplicaciones en infraestructuras críticas, donde la operación continua es esencial y cualquier sobrecalentamiento podría comprometer tanto la seguridad de los equipos como la continuidad del servicio (Villacís Morán, 2023). La discusión de estos hallazgos sugiere que futuros desarrollos de Volut podrían beneficiarse de la integración de materiales avanzados de disipación o incluso de tecnologías de refrigeración líquida en escenarios de alta densidad. Otro punto de análisis corresponde a la confiabilidad operativa. La baja pérdida de paquetes (<0,5 %) en la transmisión de datos valida que la coexistencia de energía y comunicación en el mismo canal no compromete la calidad del servicio, aspecto que ha sido identificado como una de las principales preocupaciones en la implementación de

PoE++ (Cano, 2020). En este sentido, Volut no solo garantiza la estabilidad eléctrica, sino que también preserva la integridad de las comunicaciones, lo cual lo posiciona como una solución adecuada para sistemas de IoT y redes de automatización industrial.

Al comparar estos resultados con propuestas previas, se observa que gran parte de los desarrollos basados en PoE++ se han limitado a la alimentación de dispositivos individuales, como luminarias o cámaras de seguridad (Singh, 2021). En contraste, Volut introduce un enfoque integral al combinar modelo matemático, control embebido y validación experimental dentro de un solo prototipo. Esta multidimensionalidad constituye un aporte significativo al estado del arte, pues aborda no solo el rendimiento eléctrico, sino también las variables térmicas, estructurales y de confiabilidad, que suelen quedar fuera de la literatura tradicional. No obstante, es importante reconocer ciertas limitaciones del presente estudio. En primer lugar, las pruebas se realizaron en un entorno controlado, lo cual implica que factores externos como fluctuaciones en la red eléctrica, variaciones ambientales extremas o interferencias electromagnéticas no fueron evaluados. En segundo lugar, la validación se concentró en un número reducido de cargas (hasta 80 W por puerto), lo cual restringe la generalización de los resultados a sistemas de mayor densidad. Finalmente, el uso de microcontroladores de gama básica, como Arduino UNO, limita la capacidad de procesamiento para algoritmos de control predictivo más avanzados.

Estas limitaciones abren oportunidades para la investigación futura. La integración de plataformas de mayor potencia de cómputo, como Raspberry Pi o ESP32, permitiría incorporar algoritmos de inteligencia artificial

ligera para predicción de consumos y gestión dinámica de cargas. Asimismo, la validación en entornos reales como edificios inteligentes, plantas de manufactura o centros de datos permitiría comprobar la escalabilidad y robustez del sistema en condiciones de operación más exigentes. En términos de implicaciones prácticas, Volut puede contribuir de manera significativa a la reducción de costos de infraestructura en proyectos de automatización, al eliminar la necesidad de cableado eléctrico independiente. Además, su diseño modular y su compatibilidad con estándares internacionales lo convierten en una alternativa escalable y replicable en distintos sectores. Desde una perspectiva teórica, este trabajo aporta una metodología para el diseño y validación de prototipos basados en PoE++, que integra dimensiones eléctricas, térmicas y estructurales en un mismo marco de análisis. La discusión de los resultados confirma que Volut representa un avance sustantivo en el uso de PoE++ para la automatización energética. Su aporte no se limita a la demostración experimental de viabilidad, sino que introduce un marco metodológico integral que puede orientar futuras investigaciones y desarrollos tecnológicos en este campo.

### **Conclusiones**

El desarrollo del sistema Volut permitió demostrar la viabilidad de integrar la tecnología PoE++ (IEEE 802.3bt) con sistemas embebidos de control para la automatización y gestión energética en entornos inteligentes. A partir del diseño conceptual, el modelado estructural, el análisis térmico y la validación experimental, se alcanzaron los siguientes resultados principales: Eficiencia energética superior al 85 % en la mayoría de escenarios de carga, con valores máximos de hasta 91,2 %. Estos resultados se encuentran dentro de los rangos reportados por investigaciones recientes, confirmando que

PoE++ es una tecnología confiable para la distribución eléctrica de bajo voltaje. Estabilidad térmica garantizada mediante disipadores de aluminio y ventilación activa, con temperaturas promedio de 52 °C en operación continua. Este aspecto es crucial para la seguridad del sistema y constituye una contribución original del presente trabajo, al combinar diseño estructural y análisis de flujo térmico. Confidabilidad operativa validada en más de 120 horas acumuladas, sin fallos en la distribución de energía ni interrupciones en la comunicación Ethernet. Esto confirma la factibilidad de emplear Volut en entornos de automatización industrial, domótica e infraestructuras críticas.

Aporte metodológico, al integrar un modelo matemático de eficiencia, un prototipo embebido de control y un proceso de validación experimental que trasciende el enfoque tradicional de PoE++ limitado a la transmisión de energía. En términos de contribuciones al estado del arte, Volut se posiciona como una propuesta innovadora al abordar simultáneamente los desafíos eléctricos, térmicos y de control embebido en sistemas PoE++. Mientras que la literatura previa se concentra mayormente en la eficiencia de conversión y la compatibilidad de dispositivos, este trabajo aporta un enfoque multidimensional que puede servir como referencia para futuras implementaciones. El presente estudio abre diversas líneas de investigación y desarrollo:

- Optimización del firmware embebido mediante algoritmos de inteligencia artificial ligera, capaces de predecir patrones de consumo y ajustar dinámicamente la distribución de energía.
- Escalabilidad del prototipo hacia sistemas multipuerto de mayor densidad, evaluando la eficiencia en escenarios de más de 10 dispositivos conectados simultáneamente.

- Integración con plataformas IoT para la visualización en tiempo real de métricas energéticas en la nube, habilitando estrategias de mantenimiento predictivo.
- Validación en entornos reales como edificios inteligentes, plantas industriales o centros de datos, con el fin de comprobar la aplicabilidad del sistema en condiciones de alta demanda.
- Estudio de impacto ambiental y económico, considerando métricas de ahorro en emisiones de CO<sub>2</sub> y reducción de costos de infraestructura frente a sistemas eléctricos tradicionales.

### Referencias Bibliográficas

- Bastidas, E. (2024). Evaluación de sistemas electrónicos de bajo consumo energético en IoT: Aplicaciones educativas para reducir el consumo energético. *Sage Sphere International Journal*, 1(2), 1–28. [https://sagespherejournal.com/index.php/SS\\_IJ/article/view/6](https://sagespherejournal.com/index.php/SS_IJ/article/view/6)
- Bautista, D. (2024). Monitoreo remoto de variables ambientales a larga distancia con sistemas embebidos. *Pádi Boletín Científico de Ciencias Básicas e Ingenierías*, 12, 40–48. <https://doi.org/10.29057/icbi.v12iEspecial4.13340>
- Cano, J. (2020). Gestión energética, automatización industrial y tecnologías de información y comunicación. Universidad Juárez del Estado de Durango.
- Castillo, H. (2025). Análisis termográfico en los sistemas eléctricos de la subestación CNEL EP Quito ubicada en Santo Domingo. *Revista Científica Multidisciplinaria Generando*, 6(1), 2407. <https://doi.org/10.60100/rcmg.v6i1.389>
- Domínguez, E. (2011). Nuevos requisitos de comunicaciones para instalaciones electromecánicas. ISCIII-INGESA. <http://www.rediris.es/rediris/boletin/90/ponencia10.A.pdf>
- García, D. (2020). Disminución de las pérdidas de energía eléctrica por distribución usando tecnologías de medición y control para la toma de decisiones. *Revista Colombiana de Tecnologías de Avanzada*, 34(2), 144–150. <https://doi.org/10.24054/16927257.v34.n34.2019.3875>
- García, M. (2022). Los Objetivos de Desarrollo Sostenible en América: Panorama. *LA GRANJA. Revista de Ciencias de la Vida*, 36(2), 45–59. <https://doi.org/10.17163/lgr.n36.2022.04>
- Guan, X. (2023). Design of current equalization circuit in dual Ethernet power supply system. *Journal of Low Power Electronics and Applications*, 13(4), 60. <https://doi.org/10.3390/jlpea13040060>
- Guerrero, H. (2016). Implementación de módulos didácticos para sistemas electrónicos de potencia. *Revista Digital Educación en Ingeniería*, 11(21), 9–13. <https://educacioningenieria.org/index.php/edi/article/view/593>
- Guzmán, W. (2024). Diseño e implementación de un sistema embebido para redes Narrowband para la gestión de alarmas en sistemas de telecomunicaciones. *Revista ELECTRO*, 46(1), 175–181. [https://itchihuahua.mx/revista\\_electro/2024/A60\\_175-181.html](https://itchihuahua.mx/revista_electro/2024/A60_175-181.html)
- Hafsi, K. (2021). DC building management system with IEEE 802.3 bt standard. En *2021 IEEE 22nd International Conference on High Performance Switching and Routing*. IEEE. <https://doi.org/10.1109/HPSR52026.2021.948106>
- International Energy Agency. (2021). World Energy Outlook. IEA.
- International Energy Agency. (2023). International Energy Agency. <https://www.iea.org/>
- Li, Y. (2020). Adaptive maintain power signature scheme for power over Ethernet system. *IET Power Electronics*, 13(2), 295–299. <https://doi.org/10.1049/iet-pel.2019.0491>
- Liu, Q. (2021). Design of meteorological intelligent sensor based on PoE technology. *Journal of Physics: Conference Series*, 2121,

012016. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/2121/1/012016>
- Macias, R. (2009). Developing a value-pricing project: Experience with I-30W. *Transportation Research Record*, 2115(1), 41–49. <https://doi.org/10.3141/2115-06>
- Martin, J. (2023). SpaceWire communications in power over Ethernet environment. *CEAS Space Journal*, 15(3), 451–465. <https://doi.org/10.1007/s12567-022-00454-z>
- Martínez, D. (2025). Balanceo inteligente de carga de trabajo en sistemas distribuidos heterogéneos. *Brazilian Journal of Development*, 11(1), e76681. <https://doi.org/10.34117/bjdv11n1-041>
- Monopoli, T. (2020). Modal analysis of a typical power over Ethernet configuration. En *2020 Global Electromagnetic Compatibility Conference*. IEEE. <https://doi.org/10.1109/GEMCCON50979.2020.9456742>
- Moreno, J. (2021). A comprehensive review on smart grids: Challenges and opportunities. *Sensors*, 21(21), 6978. <https://doi.org/10.3390/s21216978>
- Parker, G. (2025). Cohesión, cultura y brechas en Puerto Edén, una comunidad energética remota. *RIVAR*, 12(35), 52–69. <https://doi.org/10.35588/jnt68074>
- Ramos, F. (2019). Análisis térmico de un disipador de calor con tubos de calor para procesadores de alto rendimiento. *Enfoque UTE*, 10(2), 39–51. <https://doi.org/10.29019/enfoqueute.v10n2.469>
- Sánchez, W. (2025). Herramientas y plataformas de procesamiento: Un análisis sistemático en el contexto de IoT y Big Data. *Revista Odigos*, 6(1), 57–82. <https://doi.org/10.35290/ro.v6n1.2025.1479>
- Sandoval, C. (2020). Tecnología R-IEDs para ERNC, teletrabajo y mitigación de impacto ambiental. *Industrial Data*, 23(2), 151–167. <https://doi.org/10.15381/idata.v23i2.18633>
- Singh, A. (2021). Concept design of a futuristic battery management system for submarines using IEEE 802.3bt network. En *Smart Structures in Energy Infrastructure*. Springer. [https://doi.org/10.1007/978-981-16-4744-4\\_10](https://doi.org/10.1007/978-981-16-4744-4_10)
- Solís, R. (2025). Redes eléctricas inteligentes: Impacto en la distribución eficiente de energía. *Sapiens Studies Journal*, 1(2), 1–19. <https://doi.org/10.71068/3f452b94>
- Souza, L. (2024). Enabling next-generation Gbps full-duplex communications systems applying radio-and power-over-fiber integration. *Optics Communications*, 557, 130315. <https://doi.org/10.1016/j.optcom.2024.130315>
- Villacís, L. (2023). Diseño e implementación de un sistema de monitoreo IoT de tensión y corriente para medir consumo eléctrico en tableros industriales. Escuela Superior Politécnica del Litoral. <http://www.dspace.espol.edu.ec/handle/123456789/58258>
- Wang, Y. (2024). Net-zero building lighting: Smart lighting framework enabled by photovoltaic-integrated power over Ethernet. En *2024 IEEE Sustainable Smart Lighting World Conference & Expo*. IEEE. <https://doi.org/10.1109/LS2463127.2024.10881954>
- White, R. (2006). Electrical isolation requirements in power-over-Ethernet power sourcing equipment. En *IEEE Applied Power Electronics Conference and Exposition*. IEEE. <https://doi.org/10.1109/APEC.2006.1620633>



Esta obra está bajo una licencia de Creative Commons Reconocimiento-No Comercial 4.0 Internacional. Copyright © Noé Toledo González.

