

PROTOTIPO DE MEDICIÓN EN TIEMPO REAL DEL FACTOR DE POTENCIA PARA LA
OPTIMIZACIÓN ENERGÉTICA EN PYMES COLOMBIANAS

ALCY ARANGO
HERNÁN ALEXIS SUAREZ QUIROZ

INSTITUCIÓN UNIVERSITARIA PASCUAL BRAVO
FACULTAD DE INGENIERÍA
INGENIERÍA ELÉCTRICA
MEDELLÍN
2024

PROTOTIPO DE MEDICIÓN EN TIEMPO REAL DEL FACTOR DE POTENCIA PARA LA
OPTIMIZACIÓN ENERGÉTICA EN PYMES COLOMBIANAS

ALCY ARANGO
HERNÁN ALEXIS SUAREZ QUIROZ

Trabajo de grado para optar al título de Ingeniero Electricista

Asesor
Mateo Rico García
Joseph Camilo Sosapanta Salas

INSTITUCIÓN UNIVERSITARIA PASCUAL BRAVO
FACULTAD DE INGENIERÍA
INGENIERÍA ELÉCTRICA
MEDELLÍN
2024

Dedicatoria

A Dios, por ser mi guía y fortaleza en todo momento. A nuestras familias, por su apoyo incondicional, amor y motivación constante. Dedico este logro a todos ellos, quienes han sido pilares fundamentales en mi vida.

Alcy Arango

Dedico este trabajo a mis padres ya toda mi familia, quienes han sido mi inspiración y mi fortaleza. A ustedes, que siempre han estado a mi lado, brindándome ánimo y apoyo incondicional, les ofrezco este esfuerzo como una muestra de mi agradecimiento. Cada avance y logro es un reflejo de lo que me han enseñado y del amor que me han dado. Este logro es para ustedes, con todo mi amor y admiración.

Hernán Alexis Suarez Quiroz

Agradecimientos

Quiero expresar mi más sincero agradecimiento a la institución Universitaria Pascual Bravo, la cual siempre me brindó apoyo tanto académico como económico durante este proceso. También agradezco a los profesores, quienes fueron fundamentales en mi formación y desarrollo profesional. Gracias a su dedicación y esfuerzo, hoy puedo sentirme orgulloso de culminar esta etapa como ingeniero. ¡Dios los bendiga y muchas gracias por su invaluable contribución!

Alcy Arango

A mis padres ya toda mi familia, les expreso mi más profundo agradecimiento. Su apoyo constante, amor y dedicación han sido la base sobre la cual construyó cada paso en este camino. Gracias por su sacrificio, por creer en mí y por enseñarme la importancia de la perseverancia y el esfuerzo. Sin ustedes, este logro no habría sido posible. A cada uno de ustedes, les debo mi gratitud eterna y les dedico este logro.

Hernán Alexis Suarez Quiroz

Contenido

| | |
|--|----|
| Introducción | 16 |
| 1. Planteamiento del problema | 17 |
| 1.1. Descripción | 17 |
| 1.2. Formulación del problema | 18 |
| 2. Justificación | 19 |
| 3. Objetivos | 21 |
| 3.1. Objetivo general | 21 |
| 3.2. Objetivos específicos | 21 |
| 4. Marco teórico | 22 |
| 4.1. Potencias en un Sistema Trifásico | 22 |
| 4.1.1. Potencia Activa (P) | 22 |
| 4.1.2. Potencia Reactiva (Q) | 23 |
| 4.1.3. Potencia Aparente (S) | 24 |
| 4.2. El Factor de Potencia (FP) y su Relación con la Eficiencia | 25 |
| 4.2.1. Definición del Factor de Potencia | 25 |
| 4.2.2. Potencia Activa vs. Potencia Aparente | 26 |
| 4.2.3. Efectos de un Bajo Factor de Potencia en el Sistema | 27 |
| 4.2.4. Control y Mejora del Factor de Potencia | 27 |
| 4.2.5. Impacto en la Eficiencia del Sistema | 28 |
| 4.3. Medición del Factor de Potencia en Sistemas Eléctricos | 29 |
| 4.3.1. Métodos Tradicionales de Medición del Factor de Potencia | 29 |
| 4.3.2. Medición con Dispositivos de Bajo Costo | 31 |
| 4.4. Internet de las Cosas (IoT) e Internet Industrial de las Cosas (IIoT) | 36 |

| | | |
|---------|---|----|
| 4.4.1. | Internet de las Cosas (IoT)..... | 36 |
| 4.4.2. | Internet Industrial de las Cosas (IIoT)..... | 38 |
| 4.4.3. | Comunicación y Conectividad en IoT y IIoT..... | 39 |
| 4.4.4. | InfluxDB Cloud y la Medición de Factor de Potencia..... | 40 |
| 5. | Metodología..... | 42 |
| 5.1. | Tipo de proyecto..... | 42 |
| 5.2. | Método..... | 42 |
| 5.2.1. | Definición de parámetros..... | 42 |
| 5.2.2. | Requisitos de transmisión de datos..... | 43 |
| 5.2.3. | Selección de componentes de hardware..... | 43 |
| 5.2.4. | Diseño del circuito..... | 44 |
| 5.2.5. | Programación del microcontrolador..... | 44 |
| 5.2.6. | Configuración de la Transmisión de Datos..... | 44 |
| 5.2.7. | Definición de requisitos..... | 45 |
| 5.2.8. | Selección de base de datos..... | 46 |
| 5.2.9. | Diseño del esquema de la base de datos..... | 48 |
| 5.2.10. | Definición del plan de pruebas..... | 48 |
| 5.2.11. | Preparación del entorno de pruebas..... | 50 |
| 5.3. | Instrumentos de recolección de información..... | 51 |
| 5.3.1. | Fuentes primarias..... | 51 |
| 5.3.2. | Fuentes secundarias..... | 51 |
| 6. | Resultados..... | 51 |
| 6.1. | Componentes de prueba y laboratorio..... | 52 |
| 6.1.1. | Banco de pruebas..... | 52 |
| 6.1.2. | Pinzas voltiamperimetricas..... | 52 |

| | | |
|--------|--|----|
| 6.1.3. | Analizador de energía..... | 53 |
| 6.1.4. | Analizador prototipo..... | 54 |
| 6.1.5. | Carga (Motor)..... | 54 |
| 6.2. | Resultados de las Mediciones Eléctricas..... | 55 |
| 6.2.1. | Voltaje..... | 55 |
| 6.2.2. | Corriente de línea (A)..... | 56 |
| 6.2.3. | Potencia Activa, Potencia Aparente, Potencia Reactiva..... | 56 |
| 6.2.4. | Factor de Potencia (FP)..... | 58 |
| 6.3. | Transmisión de Datos y Almacenamiento en la Nube..... | 58 |
| 6.3.1. | Frecuencia de transmisión..... | 58 |
| 6.3.2. | Capacidad de almacenamiento..... | 58 |
| 6.4. | Evaluación de la Interfaz Gráfica y Consulta de Datos..... | 59 |
| 6.4.1. | Visualización..... | 59 |
| 6.4.2. | Consultas..... | 59 |
| 6.5. | Comportamiento del Sistema en el Laboratorio..... | 60 |
| 7. | Conclusiones..... | 62 |
| 8. | Recomendaciones..... | 64 |
| | Bibliografía..... | 65 |

Lista de figuras

| | |
|--|----|
| <i>Figura 1.</i> Triangulo de potencias | 25 |
| <i>Figura 2.</i> Analizador de potencia..... | 30 |
| <i>Figura 3.</i> Arduino nano..... | 31 |
| <i>Figura 4.</i> ESP8266..... | 32 |
| <i>Figura 5.</i> ESP32..... | 34 |
| <i>Figura 6.</i> Rasberry pi..... | 35 |
| <i>Figura 7.</i> Esquema de conexión de los sensores al microcontrolador..... | 44 |
| <i>Figura 8.</i> Modulo 104 LEYBOLD..... | 52 |
| <i>Figura 9.</i> Pinza UNI-T UT202+..... | 53 |
| <i>Figura 10.</i> Analizador de energía FLUKE 434..... | 53 |
| <i>Figura 11.</i> Prototipo de analizador..... | 54 |
| <i>Figura 12.</i> Motor de pruebas..... | 55 |
| <i>Figura 13.</i> Interfaz gráfica de los datos en el tiempo..... | 59 |
| <i>Figura 14.</i> Interfaz gráfica de consulta de datos en el tiempo..... | 59 |
| <i>Figura 15.</i> Montaje de laboratorio con motor en vacío..... | 60 |
| <i>Figura 16.</i> Voltajes de línea en un tiempo de 30 minutos..... | 61 |
| <i>Figura 17.</i> Corrientes de línea en un tiempo de 30 minutos..... | 61 |
| <i>Figura 18.</i> Factores de potencia de cada línea en un tiempo de 30 minutos..... | 61 |

Lista de tablas

| | |
|--|----|
| Tabla 1. <i>Comparación entre Arduino, ESP8266, ESP32 y Raspberry Pi.</i> | 36 |
| Tabla 2. <i>Tabla de sensores y sus nombres.</i> | 45 |
| Tabla 3. <i>Tabla de mediciones 1.</i> | 46 |
| Tabla 4. <i>Tabla de mediciones 2.</i> | 46 |
| Tabla 5. <i>Comparación de base de datos.</i> | 47 |
| Tabla 6. <i>Voltajes y porcentaje de desviación con respecto al banco de pruebas.</i> | 55 |
| Tabla 7. <i>Corrientes y porcentaje de desviación con respecto al banco de pruebas.</i> | 56 |
| Tabla 8. <i>Potencia Activa y porcentaje de desviación con respecto al analizador FLUKE.</i> | 56 |
| Tabla 9. <i>Potencia Aparente y porcentaje de desviación con respecto al analizador FLUKE.</i> | 57 |
| Tabla 10. <i>Potencia Reactiva y porcentaje de desviación con respecto al analizador FLUKE.</i> | 57 |
| Tabla 11. <i>Factor de potencia y porcentaje de desviación con respecto al analizador FLUKE.</i> | 58 |

Resumen

PROTOTIPO DE MEDICIÓN EN TIEMPO REAL DEL FACTOR DE POTENCIA PARA LA OPTIMIZACIÓN ENERGÉTICA EN PYMES COLOMBIANAS

ALCY ARANGO

HERNÁN ALEXIS SUAREZ QUIROZ

Este trabajo aborda el diseño e implementación de un sistema de monitoreo en tiempo real para el factor de potencia, con el fin de optimizar el consumo energético y evitar sanciones regulatorias en el sector eléctrico colombiano.

Para alcanzar este objetivo, se diseñó un sistema basado en tecnologías de Internet de las Cosas (IOT) que incluye un módulo de adquisición de datos y una interfaz gráfica. Se realizaron pruebas controladas en un entorno de laboratorio para evaluar el rendimiento del prototipo.

El sistema logró monitorear y almacenar datos de manera eficiente, demostrando una precisión del 95% en la medición de los parámetros eléctricos.

Este proyecto contribuye al desarrollo de soluciones tecnológicas en el monitoreo energético, permitiendo a las empresas optimizar su consumo eléctrico y evitar recargos económicos. Además, se abre la posibilidad de extender la aplicación del sistema a escenarios industriales más complejos.

Palabras clave: Factor de potencia, IOT, eficiencia energética, sistemas eléctricos.

Abstract

REAL-TIME POWER FACTOR MEASUREMENT PROTOTYPE FOR ENERGY OPTIMIZATION IN COLOMBIAN PYMES

ALCY ARANGO
HERNÁN ALEXIS SUAREZ QUIROZ

This work addresses the design and implementation of a real-time monitoring system for the power factor, aiming to optimize energy consumption and prevent regulatory penalties in the Colombian electrical sector.

To achieve this goal, a system was designed based on Internet of Things (IoT) technologies, which includes a data acquisition module and a graphical user interface. Controlled tests were conducted in a laboratory environment to evaluate the prototype's performance.

The system successfully monitored and stored data efficiently, demonstrating a 95% accuracy in measuring electrical parameters.

This project contributes to the development of technological solutions for energy monitoring, enabling companies to optimize their electricity consumption and avoid financial surcharges. Furthermore, it opens the possibility of extending the system's application to more complex industrial scenarios.

Keywords: Power factor, IoT, energy efficiency, electrical systems.

Glosario

Actuador: Dispositivo que convierte señales eléctricas en una acción física.

Arduino: Plataforma de prototipado electrónico de código abierto que utiliza microcontroladores para desarrollar proyectos interactivos.

Bancos de Condensadores: Conjunto de condensadores conectados en paralelo para compensar la potencia reactiva en un sistema eléctrico, mejorando así el factor de potencia y reduciendo las pérdidas energéticas.

Base de Datos: Conjunto de datos organizados y almacenados de manera estructurada que permiten una gestión eficiente de la información.

Condensador: Componente eléctrico utilizado para almacenar energía en forma de un campo eléctrico.

Conexión de Malla: Tipo de topología de red en la que los dispositivos se comunican entre sí mediante conexiones directas.

Datos de Sensores: Información recogida por sensores electrónicos que miden variables físicas, como temperatura, humedad, corriente eléctrica, voltaje, entre otras.

Electrónica de Potencia: Rama de la ingeniería eléctrica que se encarga del diseño y control de dispositivos que convierten, distribuyen y controlan la energía eléctrica, como convertidores de frecuencia y bancos de condensadores.

ESP8266: Módulo de Wifi utilizado en proyectos de IoT. Se usa para conectar dispositivos a redes inalámbricas y transmitir datos en tiempo real a servidores o plataformas en la nube.

ESP32: Microcontrolador con capacidades de Wifi y Bluetooth, más avanzado que el ESP8266. Es ampliamente utilizado en aplicaciones IoT por su versatilidad, potencia de procesamiento y facilidad de integración con sensores y actuadores.

Factores de Potencia: Medida que indica qué tan eficientemente una instalación está utilizando la energía eléctrica.

InfluxDB Cloud: Plataforma de bases de datos en la nube orientada a la recopilación, almacenamiento y análisis de series temporales.

Internet de las Cosas (IoT): Concepto que hace referencia a la interconexión de objetos físicos con internet para recopilar, enviar y recibir datos.

Internet Industrial de las Cosas (IIoT): Subcampo del IoT que se enfoca en la industria, donde los dispositivos conectados y los sensores se emplean para mejorar la eficiencia operativa, el mantenimiento predictivo y la gestión de activos en entornos industriales.

Monitoreo en Tiempo Real: Técnica de medición y análisis de datos de manera continua, sin retardos significativos.

Pérdidas de Energía: La energía que no se convierte en trabajo útil en un sistema eléctrico y que se disipa generalmente en forma de calor debido a la resistencia eléctrica o el factor de potencia bajo.

Potencia Activa (P): Es la energía real utilizada para realizar trabajo útil en el sistema eléctrico, como mover un motor o iluminar una lámpara. Se mide en vatios (W) y es una medida de la eficiencia del sistema en convertir energía.

Potencia Aparente (S): Es la combinación vectorial de la potencia activa y la potencia reactiva. Representa la totalidad de la energía que un sistema eléctrico requiere, tanto para realizar trabajo como para mantener los campos magnéticos.

Potencia Reactiva (Q): Es la energía no productiva que se usa para mantener los campos magnéticos en equipos como motores y transformadores. No realiza trabajo útil, pero es esencial para el funcionamiento de equipos inductivos.

Protocolo RS-485: Estándar de comunicación utilizado en sistemas industriales para transmitir datos entre dispositivos a larga distancia.

Raspberry Pi: Ordenador de placa única de bajo costo que se utiliza en aplicaciones de IoT y como controlador en proyectos de automatización y monitoreo.

Sistema SCADA: Sistema de supervisión y adquisición de datos utilizado en entornos industriales para monitorear y controlar procesos en tiempo real.

Voltaje de Línea: El voltaje entre dos fases en un sistema trifásico. Es una medida importante para determinar la cantidad de energía que puede ser suministrada a las cargas del sistema.

Voltaje de Fase: El voltaje entre una fase y el neutro en un sistema trifásico. Es más bajo que el voltaje de línea y se usa en sistemas monofásicos para alimentar cargas más pequeñas.

Introducción

La presente investigación tiene como objetivo el desarrollo de un prototipo para medir y visualizar en tiempo real el factor de potencia mediante el uso del Internet de las Cosas (IoT), dirigido a las pequeñas y medianas empresas (PYMES) de Colombia. Siendo el factor de potencia un parámetro importante que evalúa la eficiencia con la que la energía eléctrica se convierte en trabajo útil en un sistema. Un valor bajo de este puede generar costos adicionales y penalizaciones por el alto consumo de energía reactiva, lo que impacta los costos operativos, especialmente en las PYMES, que constituyen el 80% de los negocios en Colombia (Díaz Muñoz, 2024).

El uso ineficiente de energía no solo se traduce en costos adicionales, sino que, en muchos casos, afecta la competitividad de las empresas más pequeñas que no cuentan con los recursos para implementar tecnologías de control. Por lo tanto, la Comisión de Regulación de Energía y Gas (CREG) en Colombia ha implementado recargos por energía reactiva excesiva en su Resolución 015 de 2018, lo que obliga a las empresas a buscar soluciones para mejorar la eficiencia energética. Este proyecto se origina a partir de la necesidad de implementar tecnologías emergentes, como IoT, para monitorear en tiempo real el consumo de energía y permitir a las PYMES gestionen este parámetro antes de la facturación, reduciendo así los costos operativos y las penalizaciones (CREG, 2018).

La implementación de esta solución, mediante un sistema de monitoreo en tiempo real, permitirá no solo una gestión eficiente del consumo energético, sino también la optimización de los costos y la mejora de la sostenibilidad industrial. A través del análisis de grandes volúmenes de datos, por lo cual el prototipo contribuirá a la reducción de la huella de carbono, alineándose con los objetivos internacionales de reducción de emisiones, como el Protocolo de Kioto (Arias Restrepo & Varela Larrotta, 2019).

1. Planteamiento del problema

1.1.Descripción

El factor de potencia eléctrico es una medida que indica la eficiencia con la que la energía eléctrica se convierte en trabajo útil. Se calcula como el cociente entre la potencia activa y la potencia aparente en un circuito. Un factor de potencia bajo implica un uso ineficiente de la energía, lo que resulta en mayores costos y penalizaciones (Svoboda & Dorf, 2006). En Colombia, los recargos por consumo excesivo de energía reactiva son una de las principales preocupaciones para las empresas, especialmente en sectores industriales como la siderurgia, cerámica, y alimentos, que enfrentan costos elevados debido a la ineficiencia en la gestión de su energía (CREG, 2018).

El aumento de cargas inductivas como motores, aire acondicionado, y equipos de iluminación fluorescente, son las principales causas del deterioro del factor de potencia (P. & T., 2022). Las soluciones convencionales incluyen la implementación de bancos de capacitores para corregir el desfase entre la energía activa y reactiva, sin embargo, en muchos casos, estos equipos fallan debido a condiciones extremas como altas temperaturas o corrientes armónicas (Muhammad & Muhammad , 2023).

Las PYMES en Colombia representan el 80% de los negocios y son responsables del 22% del consumo de energía final en el sector industrial (Diaz Muñoz, 2024). Sin embargo, muchas de ellas carecen de sistemas de gestión energética efectivos, lo que les impide controlar de manera adecuada sus consumos de energía reactiva. Esta situación resulta en sobrecostos significativos que afectan la rentabilidad de las pequeñas empresas, las cuales no cuentan con los recursos para hacer frente a la implementación de soluciones costosas de corrección.

1.2. Formulación del problema

¿Es posible desarrollar un prototipo de medición en tiempo real del factor de potencia que permita identificar y corregir consumos de energía reactiva antes de la facturación, reduciendo así los recargos estipulados por la CREG y optimizando los costos operativos en las pequeñas y medianas empresas de Colombia?

2. Justificación

Este proyecto se justifica por su potencial impacto económico, social, tecnológico y ambiental.

En términos económicos, la implementación de un sistema de monitoreo del factor de potencia contribuirá a reducir recargos por energía reactiva y optimizar los costos operativos en las PYMES. Estas empresas, que representan el 79% de los empleos en Colombia y contribuyen entre el 35 y el 40% del PIB anual (González & Llanes, 2024), se beneficiarían directamente de esta tecnología, no solo por la reducción de costos, sino también por su impacto en la competitividad de estas empresas a nivel local e internacional.

Desde una perspectiva social, la mejora en la eficiencia energética contribuiría a la sostenibilidad y la responsabilidad ambiental de las PYMES, lo que generaría un entorno más competitivo y equitativo para las pequeñas empresas en Colombia. Además, al ser las PYMES las que generan una parte significativa del empleo en el país, su fortalecimiento económico podría tener un efecto multiplicador positivo en el empleo y en la estabilidad económica local (Díaz Muñoz, 2024).

En el ámbito tecnológico, este proyecto aprovecha las tecnologías emergentes de la Cuarta Revolución Industrial, como IoT y Big Data, para ofrecer una solución innovadora que permita el monitoreo en tiempo real del consumo de energía. Este enfoque está alineado con las políticas gubernamentales, especialmente en ciudades como Medellín, que aspiran a ser centros de innovación tecnológica en Latinoamérica (Ministerio de Tecnologías de la Información y las Comunicaciones, 2019). A medida que la inteligencia artificial y el aprendizaje automático se integran en estas plataformas, el sistema podrá no solo identificar patrones de consumo, sino también predecir y optimizar el uso de energía reactiva de manera autónoma.

En términos ambientales, este sistema contribuirá a un uso más eficiente de los recursos energéticos, lo que se traducirá en una reducción de la huella de carbono de las operaciones industriales. Al mejorar la eficiencia energética, las PYMES no solo podrán reducir sus costos, sino que también contribuirán a los compromisos internacionales de reducción de emisiones y mitigación del cambio climático, alineándose con los Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS), específicamente el ODS 7: Energía asequible y no contaminante (Arias Restrepo & Varela Larrotta, 2019).

3. Objetivos

3.1. Objetivo general

Desarrollar un sistema de monitoreo y almacenamiento en tiempo real del factor de potencia mediante metodologías experimentales y de análisis y síntesis, que posibilite la posterior evaluación de los datos y la generación de medidas preventivas y correctivas que eviten los recargos estipulados por la CREG.

3.2. Objetivos específicos

Utilizar técnicas de desarrollo de hardware para la construcción de un sistema de adquisición y transmisión de datos mediante tecnologías basadas en Internet de las Cosas (IoT).

Emplear herramientas de programación para el desarrollo de la base de datos y la interfaz gráfica, con el fin de visualizar y almacenar la información de interés, utilizando metodologías ágiles de desarrollo.

Evaluar el rendimiento del sistema mediante un plan de pruebas, con el objetivo de verificar cada característica del prototipo, comprobando su efectividad en un entorno controlado en el laboratorio de eléctrica.

4. Marco teórico

4.1. Potencias en un Sistema Trifásico

En un sistema eléctrico trifásico, el análisis de las potencias es esencial para comprender cómo se distribuye y utiliza la energía. Las tres potencias principales que se manejan son:

- Potencia activa (P): Es la potencia real que realiza trabajo útil en el sistema, como mover un motor o iluminar una lámpara.
- Potencia reactiva (Q): Es la potencia que no realiza trabajo útil, pero es necesaria para mantener los campos magnéticos en equipos como motores y transformadores.
- Potencia aparente (S): Es la combinación de la potencia activa y reactiva, y representa la potencia total demandada por el sistema.

Estas potencias están relacionadas entre sí mediante un triángulo de potencias, y el factor de potencia (FP) es el indicador clave de la eficiencia de un sistema eléctrico. A continuación, desglosamos cada una de ellas, cómo se calculan y cómo se interrelacionan.

4.1.1. Potencia Activa (P). La potencia activa (P) es la que realiza trabajo útil en el sistema. En un sistema trifásico, la potencia activa se calcula a partir de la corriente y el voltaje de línea, y está relacionada con el ángulo de desfase entre la corriente y el voltaje (R. Hambley, 2010).

La fórmula general para calcular la potencia activa en un sistema trifásico balanceado es:

$$P = \sqrt{3} * V_L * I_L * \cos(\varphi)$$

donde:

P: es la potencia activa (en vatios, W),

VL: es el voltaje de línea (en voltios, V),

IL: es la corriente de línea (en amperios, A),

φ : es el ángulo de desfase entre la corriente y el voltaje.

El término $\cos(\varphi)$ es el factor que indica cuán en fase están la corriente y el voltaje, es decir, cuánta de la energía suministrada por el sistema se está utilizando efectivamente para realizar trabajo útil.

El termino VL se refiere al voltaje de línea que pasa por un solo conductor y este está expresado en la ecuación:

$$V_L = V_F * \sqrt{3}$$

Donde:

VF: Voltaje de fase (en voltios, V)

4.1.2. Potencia Reactiva (Q). La potencia reactiva, aunque no realiza trabajo útil, es crucial para el funcionamiento de equipos como transformadores y motores, que requieren campos

magnéticos para operar. Esta potencia se almacena y libera en el sistema debido a la energía que se intercambia entre la carga y el generador (R. Hambley, 2010).

La potencia reactiva se calcula mediante la siguiente fórmula:

$$Q = \sqrt{3} * V_L * I_L * \sin(\varphi)$$

donde:

Q: es la potencia reactiva (en voltios-amperios reactivos, VAR)

$\sin(\varphi)$: es el término que representa la componente de la corriente que está en fase con el voltaje para generar campos magnéticos, pero no realiza trabajo útil.

En este caso, la potencia reactiva no se convierte en trabajo útil, pero es esencial para generar los campos magnéticos que permiten el funcionamiento de los equipos inductivos, como motores y transformadores.

4.1.3. Potencia Aparente (S). La potencia aparente (S) es la combinación de la potencia activa y reactiva. Es la cantidad total de potencia que debe ser suministrada al sistema para que este funcione. Es importante destacar que la potencia aparente no distingue entre la energía que realiza trabajo y la que no lo realiza, pero nos da una idea de la capacidad total que el sistema debe tener para abastecer la carga (R. Hambley, 2010).

La fórmula para calcular la potencia aparente es:

$$S = \sqrt{P^2 + Q^2} = \sqrt{3} * V_L * I_L$$

La potencia aparente es la suma vectorial de la potencia activa y reactiva, y su valor nos da la capacidad total del sistema para suministrar energía.

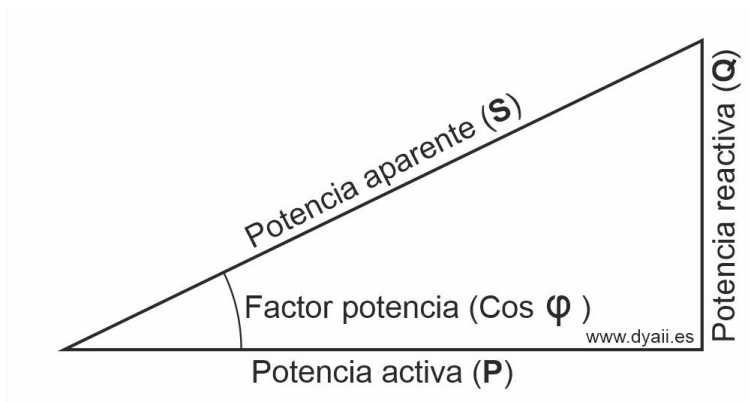


Figura 1. Triángulo de potencias

Fuente: <https://lc.cx/g1OXtG>

4.2.El Factor de Potencia (FP) y su Relación con la Eficiencia

El factor de potencia (FP) es un parámetro fundamental para la evaluación de la eficiencia de un sistema eléctrico. Define la relación entre la potencia activa (la que realiza trabajo útil) y la potencia aparente (la que totaliza tanto la potencia activa como la reactiva). Un factor de potencia bajo significa que el sistema está utilizando menos eficazmente la energía que se le suministra, mientras que un factor de potencia cercano a 1 indica una utilización eficiente de la potencia.

4.2.1. Definición del Factor de Potencia. El factor de potencia se puede definir de varias maneras, pero la forma más común es como el coseno del ángulo de desfase (φ) entre la corriente y el voltaje. El ángulo φ es la diferencia de fase que existe entre las ondas de corriente y voltaje,

y se debe a la presencia de componentes inductivos (que crean campos magnéticos) o capacitivos (que almacenan energía) (R. Hambley, 2010).

La fórmula general del factor de potencia es:

$$FP = \cos(\varphi) = \frac{P}{S}$$

El factor de potencia es un número entre 0 y 1:

- **FP = 1:** Esto indica que toda la potencia aparente se está utilizando de manera eficiente para realizar trabajo útil. En este caso, la corriente y el voltaje están perfectamente en fase, y no hay potencia reactiva.
- **FP < 1:** Cuando el factor de potencia es menor que 1, significa que hay una cantidad significativa de potencia reactiva en el sistema, lo que disminuye la eficiencia del uso de la energía. En este caso, la corriente y el voltaje están desfasados, y parte de la energía no se utiliza para realizar trabajo útil.

4.2.2. Potencia Activa vs. Potencia Aparente. La potencia activa (P) es la potencia que realmente se utiliza para hacer trabajo, como mover un motor, iluminar una lámpara o realizar procesos industriales. En cambio, la potencia aparente (S) es la combinación de la potencia activa y la potencia reactiva. Aunque la potencia reactiva (Q) no realiza trabajo útil, es necesaria para mantener los campos magnéticos en sistemas inductivos (como motores y transformadores) (R. Hambley, 2010).

La relación entre potencia activa y potencia aparente se expresa de la siguiente manera:

$$P = S * FP$$

Esto implica que a medida que el factor de potencia disminuye, se necesita más potencia aparente (S) para suministrar la misma cantidad de potencia activa (P). En otras palabras, un bajo factor de potencia requiere una mayor corriente para entregar la misma cantidad de energía útil, lo que aumenta las pérdidas en el sistema y reduce la eficiencia global.

4.2.3. Efectos de un Bajo Factor de Potencia en el Sistema. Cuando el factor de potencia es bajo, la corriente total del sistema aumenta, lo que tiene varias consecuencias negativas:

- **Pérdidas de energía:** Un mayor flujo de corriente provoca mayores pérdidas resistivas en los cables y transformadores, debido a la ley de Joule $P_{pérdidas} = I^2 * R$, donde I es la corriente y R es la resistencia. Estas pérdidas reducen la eficiencia del sistema y aumentan el costo operativo.
- **Sobrecarga de equipos:** Los equipos como transformadores y generadores deben estar dimensionados para manejar tanto la potencia activa como la reactiva. Si el factor de potencia es bajo, los equipos tienen que trabajar a una mayor capacidad para suministrar la misma cantidad de potencia activa, lo que puede llevar a una sobrecarga y reducir la vida útil de los equipos.
- **Costo adicional:** Las empresas de electricidad suelen penalizar a los clientes con un bajo factor de potencia. Las tarifas eléctricas a menudo incluyen cargos adicionales si el factor de potencia es inferior a un valor determinado (por ejemplo, 0.9), ya que la compañía debe generar más potencia aparente para cubrir las pérdidas debidas a la potencia reactiva (Dragičević & Novak, 2018).

4.2.4. Control y Mejora del Factor de Potencia. Para mejorar la eficiencia de un sistema eléctrico y reducir los costos asociados a un bajo factor de potencia, se pueden implementar varias técnicas de compensación de potencia reactiva. Algunas de las más comunes incluyen:

- Condensadores (capacitores): Los capacitores se utilizan para proporcionar potencia reactiva capacitiva, que contrarresta la potencia reactiva inductiva generada por motores y transformadores. Los bancos de condensadores son una forma común de mejorar el factor de potencia en sistemas industriales (Glover, Sarma, & Overbye, 2016).
- Sistemas de corrección de factor de potencia: Estos sistemas automáticos ajustan la cantidad de potencia reactiva compensada dependiendo de las necesidades del sistema. En instalaciones industriales, esto puede implicar el uso de bancos de condensadores controlados por relés, que se conectan o desconectan automáticamente según la carga (IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2018).
- Sistemas de compensación activa: Para sistemas con cargas más dinámicas, donde la compensación pasiva mediante condensadores no es suficiente, se pueden utilizar dispositivos de compensación activa, como los Sistemas de Compensación Activa de Potencia Reactiva (SVC) o Compensadores de Potencia Reactiva Estática (STATCOM). Estos dispositivos pueden ajustar en tiempo real la potencia reactiva y mejorar rápidamente el factor de potencia (Electrical4U, 2024).

4.2.5. Impacto en la Eficiencia del Sistema. El factor de potencia tiene un impacto directo sobre la eficiencia del sistema. Como ya se mencionó, un sistema con un FP cercano a 1 es altamente eficiente, ya que la potencia activa es casi igual a la potencia aparente, lo que significa que toda la corriente suministrada se utiliza para realizar trabajo útil. Sin embargo, cuando el FP es bajo, una mayor proporción de la corriente total es utilizada para generar potencia reactiva, lo que no contribuye directamente al trabajo útil y genera pérdidas en el sistema (IEEE Transactions on Industry Applications, 2015).

Una forma de evaluar el rendimiento del sistema es comparar la potencia activa con la potencia aparente, como se muestra en la ecuación:

$$\eta = \frac{P}{S} = FP$$

Donde:

η : es la eficiencia del sistema

Cuando el FP es bajo, la eficiencia es reducida, ya que más energía debe ser generada para mantener el mismo nivel de potencia activa. Este es un factor importante para tener en cuenta en el diseño y operación de sistemas eléctricos, especialmente en instalaciones industriales con cargas grandes y variables.

4.3. Medición del Factor de Potencia en Sistemas Eléctricos

La medición del factor de potencia (FP) es fundamental para monitorizar la eficiencia de los sistemas eléctricos, especialmente en aplicaciones industriales y comerciales donde los costos de energía son elevados. Tradicionalmente, las mediciones del factor de potencia se realizaban utilizando equipos especializados como analizadores de potencia o medidores de factor de potencia. Sin embargo, en los últimos años, la tecnología de bajo costo y la conectividad han facilitado el uso de plataformas como Arduino, ESP32, ESP8266 y Raspberry Pi para realizar mediciones precisas y transmitir los datos en tiempo real (IEEE Sensors Journal, 2018).

4.3.1. Métodos Tradicionales de Medición del Factor de Potencia. En los métodos tradicionales, el factor de potencia se mide utilizando equipos sofisticados que están diseñados para registrar las diferentes potencias del sistema eléctrico:

- **Analizadores de Potencia:** Estos dispositivos especializados permiten medir tanto la potencia activa (P), como la potencia reactiva (Q) y la potencia aparente (S), junto con otros parámetros eléctricos importantes como la frecuencia, la corriente y el voltaje. Los analizadores de potencia generalmente se conectan directamente al sistema eléctrico y muestran los resultados en tiempo real en forma de lecturas numéricas o gráficas.
- **Medidores de Factor de Potencia:** Son dispositivos que se encargan específicamente de medir el coseno del ángulo de fase ($\cos(\varphi)$), lo que directamente se traduce en el factor de potencia. Estos medidores suelen ser más simples que los analizadores de potencia, pero ofrecen información precisa sobre el estado del factor de potencia en el sistema eléctrico.
-

En ambos casos, los equipos tradicionales suelen requerir una configuración física directa con el sistema y una lectura manual o mediante una interfaz HMI (interfaz hombre-máquina) para obtener los datos. Sin embargo, debido a su costo elevado y falta de flexibilidad, estos dispositivos están siendo reemplazados gradualmente por soluciones más accesibles y adaptables (Kusko & Thompson, 2007).



Figura 2. Analizador de potencia.

Fuente: <https://lc.cx/vPf28X>

4.3.2. Medición con Dispositivos de Bajo Costo. A medida que la tecnología electrónica ha avanzado, ha surgido la posibilidad de realizar mediciones del factor de potencia utilizando plataformas como Arduino, ESP32 y Raspberry Pi. Estas plataformas ofrecen una solución de bajo costo, versátil y personalizable para medir y monitorear variables eléctricas en tiempo real.

Arduino: Es una plataforma de prototipos electrónicos de código abierto que ha ganado popularidad debido a su accesibilidad y facilidad de uso. Aunque Arduino por sí mismo no tiene capacidad de medir directamente el voltaje o la corriente de un sistema eléctrico, se puede complementar con sensores específicos como el sensor de corriente ACS712 y el transformador de corriente (CT) para medir las corrientes en el sistema (Faludi, 2010).

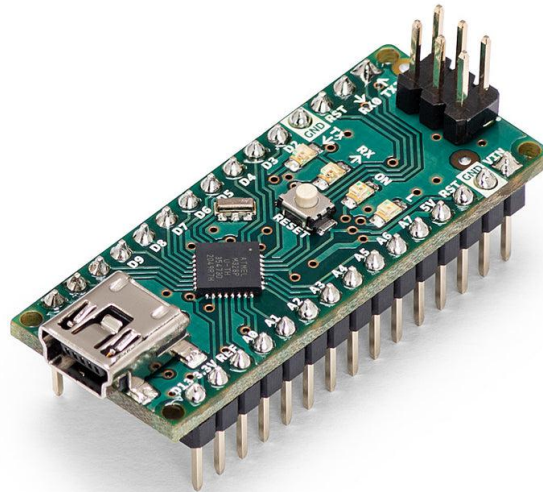


Figura 3. Arduino nano.

Fuente: <https://lc.cx/ppGtMd>

- **Cómo funciona:** Se utiliza un sensor de corriente para detectar la corriente de línea, y un divisor de voltaje o transformador de voltaje para medir el voltaje de línea. La medición de ambas variables permite calcular las potencias activa, reactiva y aparente, lo cual es suficiente para calcular el factor de potencia utilizando las fórmulas estándar.

- **Ventajas:** Arduino es accesible, barato y tiene una gran cantidad de documentación disponible. Puede realizar mediciones simples de voltaje y corriente, procesar los datos y enviar los resultados a través de una interfaz como un monitor serial o pantalla LCD.
- **Limitaciones:** Aunque Arduino es adecuado para proyectos simples, tiene limitaciones en términos de potencia de procesamiento y capacidad de conectividad, lo que puede ser un obstáculo en aplicaciones más complejas que requieren transmisión de datos en tiempo real a plataformas en la nube o integración con otros sistemas.

ESP8266: Es otro microcontrolador de bajo costo con capacidad de conectividad Wifi desarrollado por Espressif. Aunque el ESP32 es su sucesor, el ESP8266 sigue siendo ampliamente utilizado en proyectos de IoT debido a su bajo precio, facilidad de uso y amplia comunidad de desarrolladores (IEEE Internet of Things Journal, 2019).

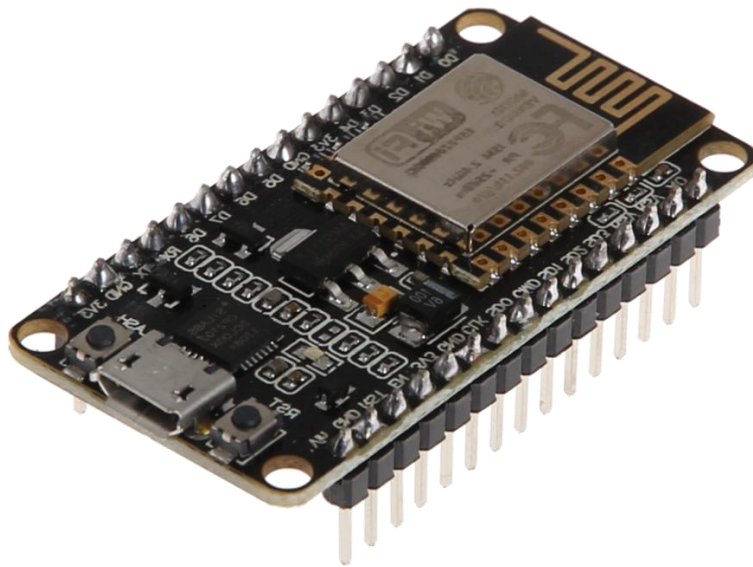


Figura 4. ESP8266.
Fuente: <https://lc.cx/rp0Iex>

Cómo Funciona: Al igual que el ESP32, el ESP8266 puede usarse para medir las variables eléctricas que son necesarias para calcular el factor de potencia. Aunque el ESP8266 es más limitado en términos de potencia de procesamiento y capacidades de hardware, sigue siendo una opción viable para proyectos simples de monitoreo eléctrico.

Ventajas: Bajo costo El ESP8266 es más barato que el ESP32, lo que lo hace ideal para proyectos con limitaciones de presupuesto. Conectividad Wifi al igual que el ESP32, el ESP8266 tiene capacidad de conectividad Wifi, lo que permite enviar los datos a plataformas de almacenamiento en la nube de forma inalámbrica. Fácil integración con plataformas de IoT la comunidad de desarrolladores y la documentación disponible para el ESP8266 es amplia, lo que facilita su integración con otras plataformas como InfluxDB Cloud y Grafana.

Limitaciones: Menos potencia de procesamiento debido a que solo tiene un núcleo de procesamiento a 80 MHz, frente al doble núcleo a 160 MHz del ESP32. Esto puede ser una limitación si se requieren cálculos complejos o procesamiento en tiempo real de grandes volúmenes de datos. Capacidad limitada de memoria El ESP8266 tiene menos memoria RAM y almacenamiento que el ESP32, lo que puede limitar la capacidad de realizar cálculos avanzados localmente o almacenar datos a largo plazo.

ESP32: Es un microcontrolador de bajo costo con capacidades Wifi y Bluetooth, lo que lo convierte en una excelente opción para proyectos de IoT (Internet de las Cosas). A diferencia de Arduino, el ESP32 tiene un mayor poder de procesamiento y una mayor capacidad de conectividad, lo que lo hace adecuado para sistemas que requieren una transmisión de datos en tiempo real y el monitoreo remoto del factor de potencia (IEEE Internet of Things Journal, 2019).

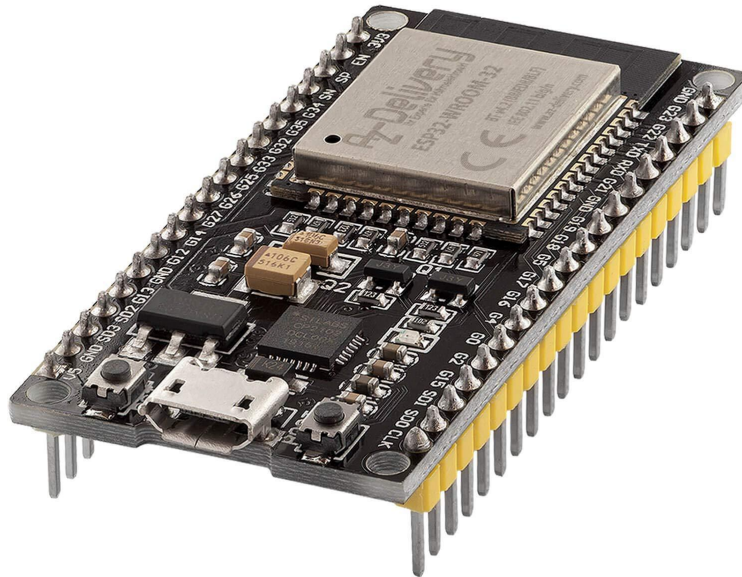


Figura 5. ESP32.

Fuente: <https://lc.cx/EOTrtO>

- **Cómo funciona:** Similar a Arduino, el ESP32 puede conectarse a sensores de voltaje y corriente. El procesador dentro del ESP32 permite realizar los cálculos de las potencias activa, reactiva y aparente. Además, gracias a su capacidad Wifi, el ESP32 puede enviar estos datos a plataformas de almacenamiento en la nube (como InfluxDB Cloud), permitiendo la visualización en tiempo real a través de aplicaciones web o móviles.
- **Ventajas:** El ESP32 es ideal para aplicaciones IoT debido a su conectividad Wifi y su capacidad de procesamiento. También permite realizar mediciones precisas y enviar los datos de manera eficiente a través de Internet. Esto lo convierte en una opción ideal para sistemas de monitoreo a gran escala.
- **Limitaciones:** Aunque el ESP32 es más potente que Arduino, sigue siendo un dispositivo de bajo costo y no está diseñado para manejar grandes volúmenes de datos o realizar cálculos extremadamente complejos como lo haría un sistema industrial dedicado.

Raspberry Pi: Es una computadora de placa única que proporciona mucho más poder de procesamiento que Arduino o ESP32, lo que la convierte en una excelente opción para proyectos más avanzados que requieren procesamiento de datos intensivo y la capacidad de integrar múltiples sensores o dispositivos (RaspberryPi.org, 2020).

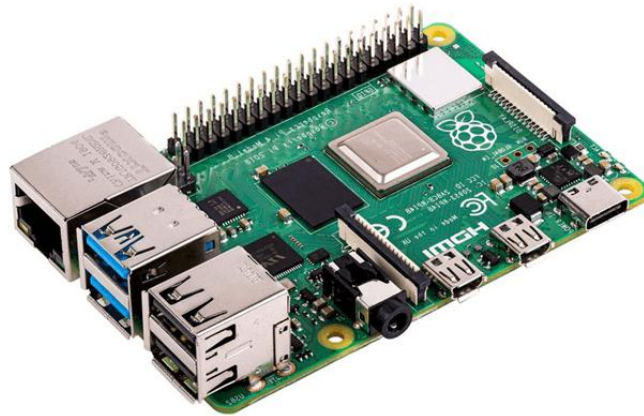


Figura 6. Raspberry pi.
Fuente: <https://lc.cx/ozbSao>

- **Cómo funciona:** Al igual que con el ESP32 y Arduino, se puede usar un sensor de corriente y un transformador de voltaje para medir las variables eléctricas. Raspberry Pi puede usar su sistema operativo basado en Linux para ejecutar software más complejo y almacenar datos de manera local antes de enviarlos a la nube o a una base de datos.
- **Ventajas:** La Raspberry Pi permite una mayor flexibilidad en términos de procesamiento, almacenamiento y conectividad. Es capaz de ejecutar aplicaciones

más sofisticadas y manejar múltiples fuentes de datos, lo que es beneficioso para proyectos más grandes o sistemas de monitoreo de energía más complejos.

- **Limitaciones:** Aunque más poderosa, la Raspberry Pi requiere más energía y es más costosa que Arduino o ESP32. Además, aunque tiene conectividad Wifi y Ethernet, en algunos casos puede ser más difícil de implementar en sistemas pequeños o portátiles.

Tabla 1.

Comparación entre Arduino, ESP8266, ESP32 y Raspberry Pi.

| Característica | Arduino | ESP8266 | ESP32 | Raspberry Pi |
|----------------------------|-----------------------|------------|------------------|---------------------|
| Precio | Bajo | Muy Bajo | Moderado | Moderado |
| Capacidad de Procesamiento | Baja | Moderada | Alta | Muy Alta |
| Conectividad | No (requiere módulos) | Wifi | Wifi + Bluetooth | Wifi + Ethernet |
| Potencia de Cálculo | Limitada | Limitada | Alta | Muy Alta |
| Facilidad de Programación | Alta | Alta | Alta | Moderada (Linux) |
| Uso Común | Proyectos simples | IoT básico | IoT avanzado | Proyectos complejos |

Fuente: Autores.

4.4. Internet de las Cosas (IoT) e Internet Industrial de las Cosas (IIoT)

4.4.1. Internet de las Cosas (IoT). El Internet de las Cosas (IoT, por sus siglas en inglés) se refiere a la interconexión de dispositivos físicos a través de Internet, permitiendo que estos dispositivos recojan, envíen y reciban datos de forma autónoma. A través de sensores y actuadores, los dispositivos IoT son capaces de captar información del entorno físico y tomar decisiones basadas en esa información, sin intervención humana directa.

Este concepto se ha vuelto clave para muchas aplicaciones, desde la domótica hasta el sector industrial, permitiendo una automatización más eficiente y un control en tiempo real de los sistemas.

Aplicaciones del IoT en la Medición del Factor de Potencia: En el contexto de la medición del factor de potencia, el IoT juega un papel fundamental al integrar sensores que miden las variables eléctricas (como corriente, voltaje, frecuencia, etc.) y enviar esta información a plataformas de análisis para su monitoreo y visualización.

- **Sensores de corriente y voltaje:** Estos dispositivos permiten medir las variables eléctricas necesarias para calcular el factor de potencia. Por ejemplo, se utilizan transformadores de corriente (CT) y transformadores de voltaje (VT) que conectan al sistema trifásico.
- **Plataformas de análisis:** Los dispositivos IoT pueden transmitir los datos a plataformas en la nube como InfluxDB Cloud y ser analizados en tiempo real, permitiendo un monitoreo constante del rendimiento de los sistemas eléctricos.

La conexión remota y la transmisión de datos en tiempo real hacen que el IoT sea crucial para el control y la optimización de sistemas eléctricos, especialmente en aplicaciones como la medición de eficiencia energética y la corrección del factor de potencia (IoT For All, 2019).

Ventajas del IoT para la Medición de Factor de Potencia

- **Monitoreo en tiempo real:** El IoT permite medir el factor de potencia de manera continua, proporcionando datos inmediatos sobre la eficiencia energética de los sistemas.

- **Automatización:** Los sistemas IoT no solo recopilan datos, sino que también pueden tomar decisiones automáticamente. Por ejemplo, cuando el factor de potencia cae por debajo de un valor umbral, el sistema puede activar automáticamente un banco de capacitores para corregirlo.
- **Accesibilidad de los datos:** Los usuarios pueden acceder a los datos de cualquier lugar, ya sea a través de una aplicación móvil o un panel de control web. Esto facilita la toma de decisiones informadas y rápidas.
- **Reducción de costos operativos:** La automatización de la medición y el análisis permite a las empresas reducir costos operativos, al optimizar el uso de energía y evitar el sobredimensionamiento de equipos.

4.4.2. Internet Industrial de las Cosas (IIoT). El Internet Industrial de las Cosas (IIoT) es una extensión del IoT, pero se enfoca específicamente en la industria. El IIoT se refiere a la integración de dispositivos IoT en entornos industriales para optimizar la producción, mantenimiento y eficiencia operativa de los sistemas.

Mientras que el IoT se puede aplicar a una amplia gama de sectores, el IIoT está centrado en la industria manufacturera, el sector energético y la automotriz, entre otros, donde la fiabilidad y el tiempo de inactividad mínimo son fundamentales (Jeschke, Brecher, Song, & B. Rawat, 2017).

Aplicaciones del IIoT en la Medición de Factor de Potencia: En el IIoT, la medición del factor de potencia es aún más relevante porque los sistemas industriales suelen ser grandes consumidores de energía, y un bajo factor de potencia puede implicar desperdicio de energía y un alto costo operativo. Aquí es donde el IIoT entra en juego, ya que:

- **Sensores inteligentes:** En los entornos industriales, los sensores IoT no solo miden variables eléctricas como corriente y voltaje, sino que también pueden

detectar armónicos, picos de corriente, y otros factores que afectan la calidad de la energía. Esto es fundamental para un monitoreo exhaustivo del factor de potencia (Munirathinam, 2020).

- **Análisis predictivo:** A través de algoritmos de machine learning e inteligencia artificial, los sistemas IIoT pueden predecir y corregir problemas de eficiencia energética, ajustando automáticamente el uso de capacitores y otros dispositivos para mantener el factor de potencia óptimo.
- **Mantenimiento predictivo:** Los dispositivos conectados al IIoT pueden detectar fallas potenciales en los equipos eléctricos antes de que ocurran, lo que reduce el tiempo de inactividad y asegura que los equipos operen dentro de sus parámetros ideales, mejorando la fiabilidad y reduciendo los costos de mantenimiento.

Ventajas del IIoT para la Medición de Factor de Potencia

- **Monitoreo avanzado:** Al igual que el IoT, el IIoT proporciona monitoreo en tiempo real, pero con un enfoque más robusto en la confiabilidad y la gestión de activos.
- **Optimización de la producción:** Un buen factor de potencia es esencial para la optimización de los procesos de manufactura, ya que garantiza que la energía se utilice de manera eficiente y se reduzcan pérdidas innecesarias.
- **Reducción de costos operativos y mejoras en la eficiencia energética:** Al integrar sensores y sistemas de control IoT/IIoT, las industrias pueden automatizar la corrección del factor de potencia y asegurarse de que los equipos operen con la máxima eficiencia posible, lo que puede llevar a ahorros significativos en costos de energía.

4.4.3. Comunicación y Conectividad en IoT y IIoT. Uno de los aspectos fundamentales del IoT y IIoT es la comunicación entre dispositivos. Para que los dispositivos IoT/IIoT trabajen de manera eficiente, necesitan contar con un sistema de comunicación confiable que permita la

transmisión de datos en tiempo real desde los sensores de medición hasta las plataformas de análisis.

- **Protocolos de Comunicación:** En el IoT, los dispositivos suelen comunicarse a través de protocolos como MQTT, HTTP, o CoAP. Estos protocolos permiten enviar datos pequeños de forma eficiente a plataformas en la nube o servidores (Hersent, Boswarthick, & Elloumi, 2012).
- **Redes:** Los dispositivos IoT y IIoT pueden estar conectados a través de Wifi, Bluetooth, Zigbee, o redes celulares. En entornos industriales, también es común el uso de redes LPWAN (Low Power Wide Área Networks), como LoRaWAN (IEEE Communications Magazine, 2018).
- **Plataformas de Comunicación:** Para almacenar y gestionar los datos recolectados por los dispositivos IoT/IIoT, se pueden utilizar plataformas como InfluxDB Cloud, que permiten almacenar grandes volúmenes de datos de series temporales y realizar consultas rápidas sobre ellos (IoT For All, 2023).

4.4.4. InfluxDB Cloud y la Medición de Factor de Potencia. Es una base de datos especializada en almacenar series temporales de datos, lo cual la hace ideal para proyectos IoT e IIoT. Los datos eléctricos, como corriente, voltaje, y factor de potencia, son variables que cambian con el tiempo y pueden generar grandes cantidades de información (Dunning & Friedman, 2015).

- **InfluxDB Cloud:** permite almacenar estos datos y realizar análisis históricos o en tiempo real, facilitando la visualización y el monitoreo del factor de potencia a lo largo del tiempo (IEEE Access, 2020).
- **Visualización con Grafana:** Para un análisis más profundo, los datos almacenados en InfluxDB Cloud pueden integrarse con herramientas de visualización como Grafana, que permite crear tableros (dashboards) interactivos

donde se pueden observar patrones, identificar problemas y tomar decisiones rápidas para mejorar la eficiencia energética (Grafana Labs, 2019).

5. Metodología

5.1. Tipo de proyecto

El presente trabajo se clasifica como un estudio de tipo aplicado, dado que su objetivo es llevar a la práctica los conceptos teóricos y técnicos del área de electricidad, electrónica y el software con el fin de desarrollar un sistema para la adquisición y visualización del factor de potencia. El enfoque es de naturaleza cuantitativa debido a que busca obtener resultados medibles y reproducibles en cualquier lugar.

5.2. Método

5.2.1. Definición de parámetros. Primero se definen los parámetros que se van a medir para así poder determinar los procesos matemáticos para definir el factor de potencia. En este caso los parámetros a tomar son los siguientes:

- Voltaje de fase (V): Este voltaje se toma con respecto a neutro o tierra y este dado por la ecuación (x) para cada fase.
- Corriente de línea (A): Este valor lo arroja el sensor propiamente.
- Potencia activa (W): Este valor lo arroja el sensor propiamente.
- Potencia aparente (VA): Este se toma haciendo operaciones matemáticas, esta se da por la ecuación (x).
- Potencia reactiva (VAR): Este se toma haciendo operaciones matemáticas, esta se da por la ecuación (x).
- Factor de potencia: Este se toma haciendo operaciones matemáticas, esta se da por la ecuación (x), o bien se toma por los datos que arroja el sensor.

5.2.2. Requisitos de transmisión de datos. Debido a las limitaciones en la recepción de datos de la plataforma en la nube, la transmisión de datos se efectúa cada cuatro segundos. Cada transmisión tiene un tamaño de aproximadamente 1 a 2 kB. Aunque los datos deben enviarse en tiempo real, esta restricción en la plataforma determina el intervalo y el tamaño de los paquetes transmitidos de manera gratuita.

5.2.3. Selección de componentes de hardware. Elegir los componentes correctos es esencial para garantizar un rendimiento óptimo, así como la compatibilidad, fiabilidad y eficiencia de un sistema. Un componente de calidad asegura mediciones precisas, disminuye costos innecesarios, facilita el desarrollo e integración, y garantiza la escalabilidad y el mantenimiento a largo plazo, reduciendo errores y fallos.

Microcontrolador: El controlador seleccionado fue el ESP8266 por su alta compatibilidad con el ecosistema de Arduino. Aunque este como el ESP32 son compatibles con el entorno de desarrollo de Arduino, algunas bibliotecas pueden presentar problemas en la gestión de puertos de comunicación de este último, lo que puede generar conflictos en el proyecto con la comunicación serial o I2C estable.

Sensores: El sensor seleccionado fue el PZEM-004T siendo una de las mejores opciones para medir las variables antes mencionadas, debido a que tiene rangos de voltaje razonable y de corriente, además también nos da la potencia activa con la cual podemos sacar los datos necesarios para hallar las otras potencias.

Módulo de comunicación: el módulo de comunicación esta dado por el propio del controlador integrado el cual es un sistema Wifi.

5.2.4. Diseño del circuito. Se muestra un esquema de conexión entre las fases y el dispositivo. También se puede ver una fuente, y un fusible para la protección del circuito integrado. No se diseñó un PCB debido a que estos componentes pueden estar sueltos y solo con conexiones eléctricas básicas.

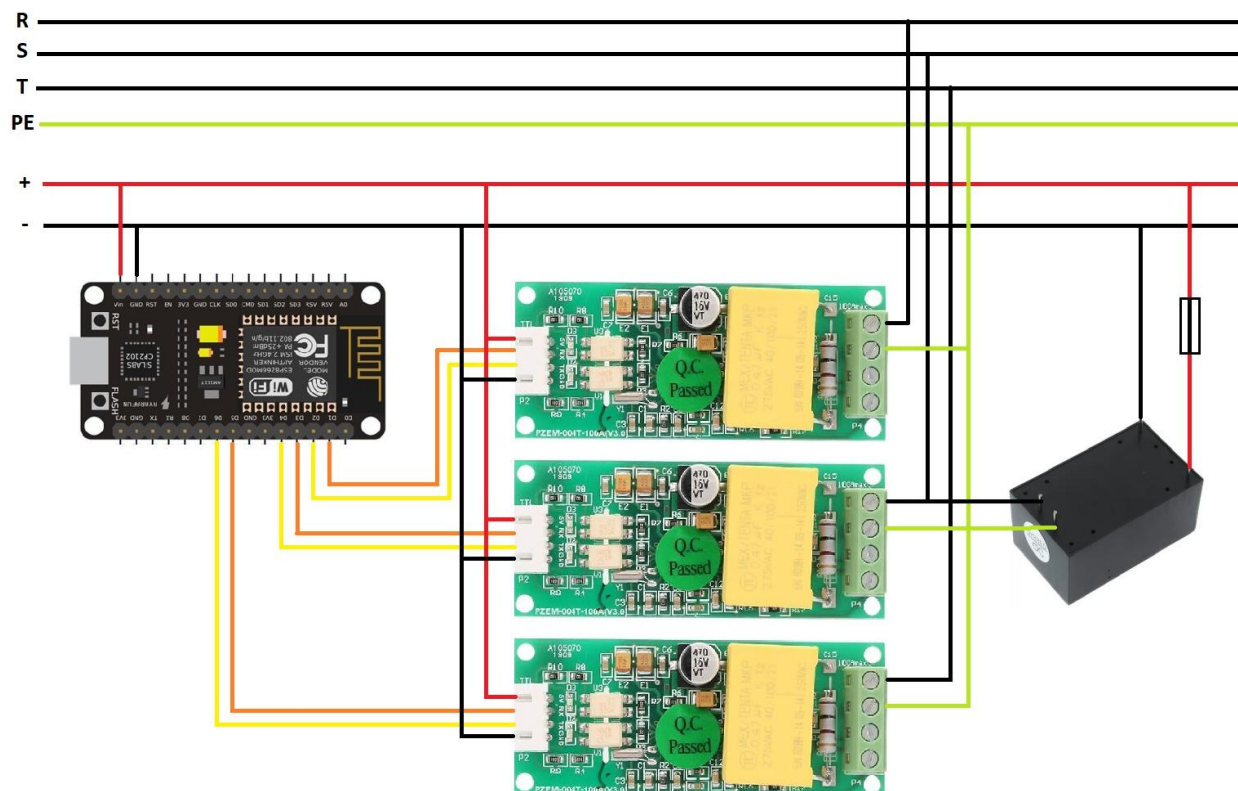


Figura 7. Esquema de conexión de los sensores al microcontrolador.

Fuente: autores

5.2.5. Programación del microcontrolador. La programación de este se realiza en etapas debido a diferentes procesos que se deben de realizar para poder enviar las señales. Esto se puede ver en detalle en el anexo A. donde se muestra todo el código por completo.

5.2.6. Configuración de la Transmisión de Datos. La configuración tomada como protocolo se basa en 4 pasos. Los cuales son:

- **Wifi (IEEE 802.11):** Para la conectividad a la red.
- **HTTP/HTTPS:** Para la comunicación entre el ESP8266 y el servidor web, y para la interacción con la base de datos InfluxDB.
- **Protocolo de InfluxDB:** Se uso HTTP/HTTPS para escribir datos de series temporales a la base de datos en la nube.
- **TLS/SSL:** Se usa para asegurar las conexiones HTTPS entre el cliente InfluxDB y el servidor de InfluxDB Cloud.

5.2.7. Definición de requisitos. En este apartado se definirán la recolección de datos, como será su estructura para la base de datos, la capacidad de almacenamiento de la base de datos y como serán las consultas y la seguridad de estas. También es importante que esta se pueda integrar a la plataforma IDE de Arduino de forma simple.

Recolección de datos: Los datos recolectados serán los antes mencionados en el 5.2.1 gracias a los sensores.

Estructura de la base de datos: Los datos tomados tienen la misma jerarquía para toda la estructura del programa, Pero estas tienen sus nombres e identificaciones para hacer más organizado estos datos.

Tabla 2.

Tabla de sensores y sus nombres.

| Ítem | Id sensor | Tipo | Ubicación |
|------|-----------|-----------|-------------------------------|
| 1 | Pzem1 | PZEM-004T | Integrado en la caja plástica |
| 2 | Pzem2 | | |
| 3 | Pzem3 | | |

Fuente: Autores.

Tabla 3.
Tabla de mediciones 1.

| Ítem | Id sensor | Voltaje (V) | corriente (A) | Factor de potencia | Marca de tiempo (s) |
|------|-----------|-------------|---------------|--------------------|---------------------|
| 1 | Pzem1 | voltaje1 | coriente1 | fp1 | Tiempo real |
| 2 | Pzem2 | voltaje2 | coriente2 | fp2 | |
| 3 | Pzem3 | voltaje3 | coriente3 | fp3 | |

Fuente: Autores

Tabla 4.
Tabla de mediciones 2.

| Ítem | Potencia activa | Potencia aparente | Potencia reactiva | Marca de tiempo (s) |
|------|---------------------|-----------------------|-----------------------|---------------------|
| 1 | potenciaactivatotal | potenciaaparentetotal | potenciareactivatotal | Tiempo real |
| 2 | | | | |
| 3 | | | | |

Fuente: Autores

Capacidad de almacenamiento: El almacenamiento de los datos debe estar dado al menos de manera gratuita por alrededor de 30 días.

Consultas y reportes: La cantidad de consultas debe ser en tiempo real y los reportes deben de ser de igual medida a las consultas dependiendo del tope máximo de capacidad de almacenamiento de manera gratuita.

Seguridad y acceso: La seguridad debe de estar dada por una llave que solo permita este cruce de datos a la plataforma.

5.2.8. Selección de base de datos. En la selección de la base de datos se tuvo en cuenta lo antes mencionado y se vieron 5 de estas páginas en las cuales se mencionan en la siguiente tabla.

Tabla 5.
Comparación de base de datos.

| Base de Datos | Características | Ideal para | Integración con Arduino |
|-------------------|---|---|---|
| InfluxDB | Altamente escalable, optimizada para datos en tiempo real, soporta consultas avanzadas. | Monitoreo de métricas, IoT, análisis de datos en tiempo real. | InfluxDB tiene bibliotecas de cliente (como InfluxDB-Client) que pueden usarse en proyectos de Arduino, pero requiere configurar un servidor o usar una versión en la nube. |
| TimescaleDB | Basada en PostgreSQL, soporte SQL avanzado, diseñada para series temporales. | Proyectos que requieren consultas complejas y alta flexibilidad con datos. | Se puede integrar con Arduino mediante bibliotecas, pero la configuración es más compleja debido a su base en SQL. |
| Amazon Timestream | Totalmente gestionada, escalable, optimizada para AWS. Soporta seguridad y rendimiento. | Proyectos que ya están en AWS y necesitan un sistema gestionado de series temporales. | La integración directa con Arduino puede ser complicada. Puede requerir configurar un puente para enviar datos desde Arduino. |
| Prometheus | Solución de monitoreo en tiempo real, almacena datos multidimensionales. | Monitoreo de infraestructura, métricas en tiempo real. | No está diseñada para ser fácilmente integrada con dispositivos de bajo nivel como Arduino. |
| Graphite | Visualización en tiempo real, almacenamiento simple de series temporales. | Visualización en tiempo real de métricas e informes. | Es posible integrarlo con Arduino mediante HTTP o MQTT, aunque generalmente se usa para métricas más grandes. Requiere configurar Graphite en un servidor y hacer que Arduino envíe datos mediante una API o protocolo como JSON. |

Fuente: Autores.

Las dos bases de datos más fácilmente aplicables al proyecto son InfluxDB y TimescaleDB, aunque este último es un poco más complejo debido a diferentes tipos de configuración para enviar los datos. Por lo cual se ha elegido la primera opción, pero en su versión en la nube.

5.2.9. Diseño del esquema de la base de datos. Para hacer el diseño es importante tener definido algunos conceptos de la plataforma seleccionada como lo son:

- **Medición (Measurement):** Es el nombre del tipo de datos que se almacena en él se utiliza una etiqueta para hacer una única medición donde se almacenara todos los parámetros relacionados con los sensores de energía. Esta se llamará “Trabajogrado”
- **Etiquetas (Tags):** Son etiquetas que se les dan a los sensores para identificar si estos están en varias partes. En este caso se le coloco “Power”
- **Campos (Fields):** Estos son los valores que varían con el tiempo. como los datos de cada parámetro medido por los sensores. ver tabla 3 y 4.
- **Tiempo (Timestamp):** Es la asociación de los datos de los sensores con una marca de tiempo. El tiempo es esencial debido a que es lo que permite almacenar series temporales y hacer consultas sobre datos de diferentes periodos de tiempo.

5.2.10. Definición del plan de pruebas. El objetivo principal es validar las funcionalidades del sistema y asegurar que se cumplan los requisitos establecidos que son las mediciones de las variables (Voltaje, corriente, factor de potencia, entre otros), en el entorno controlado del laboratorio de eléctrica y la transmisión de datos donde se puedan visualizar y analizar.

Identificación de características: Este tendrá 5 momentos en los cuales se pondrán a prueba las bases de funcionamiento del hardware (microcontrolador, sensores y circuitos) como de software (medición, transmisión, almacenamiento y visualización de datos).

1. Medición de Parámetros Eléctricos

- Voltaje: Verificar que los sensores mida correctamente el voltaje en cada fase del sistema trifásico (L1, L2, L3).
- Corriente: Verificar que la medición de corriente sea precisa y se ajuste a las especificaciones.
- Potencia Activa: Comprobar que la potencia activa calculada esté dentro de los márgenes esperados.
- Potencia Aparente: Asegurar que los valores de potencia aparente sean correctos en todas las fases.
- Potencia Reactiva: Verificar que la medición de potencia reactiva sea precisa.
- Factor de Potencia: Verificar que el factor de potencia sea calculado correctamente para cada fase.

2. Transmisión de Datos

- Comunicación del ESP8266 con los Sensores: Comprobar que el microcontrolador pueda leer los datos de los sensores correctamente.
- Envío de Datos a InfluxDB Cloud: Verificar que los datos se transmitan correctamente desde el ESP8266 al servidor de InfluxDB Cloud.
- Frecuencia de Transmisión: Asegurarse que los datos se transmitan con la frecuencia correcta.

3. Almacenamiento de Datos en InfluxDB Cloud

- Estructura de la Base de Datos: Verificar que los datos se almacenen correctamente en la base de datos con la estructura definida (mediciones, etiquetas y campos).
- Retención de Datos: Confirmar que los datos se conserven durante el período adecuado y que las políticas de retención estén configuradas correctamente.

4. Visualización y Consulta de Datos

- Interfaz Gráfica: Asegurarse de que los datos se visualicen correctamente en la interfaz gráfica de usuario.
- Gráficos y Tablas: Verificar que los gráficos y tablas muestren los parámetros eléctricos correctamente (evolución de voltaje, corriente, potencia a lo largo del tiempo).
- Consultas de Rendimiento: Realizar consultas sobre los datos y verificar que los resultados sean correctos.

5. Interacción del Sistema en el Laboratorio de Eléctrica

- Prueba en Condiciones Reales: Evaluar cómo se comporta el sistema en condiciones reales del laboratorio.

En todas estas pruebas se espera que el margen de error sea de más menos un 2%.

5.2.11. Preparación del entorno de pruebas. Se configura el laboratorio para que las pruebas se realicen en condiciones controladas y seguras. Esto se hace en el módulo 104 LEYBOLD de máquinas eléctricas 1.

Simulación de Señales Eléctricas: Se generará señales eléctricas de voltaje y frecuencias específicas (220V entre fases, 60Hz de frecuencia), estas se medirán con multímetros y un analizador de redes FLUKE 434.

En un laboratorio de pruebas, puedes usar un **generador de señales** para simular las señales de voltaje y corriente que el sistema va a medir. Esto es importante porque te permite crear condiciones controladas sin depender de un sistema eléctrico real, lo que ayuda a evitar problemas de seguridad.

Conexión de prototipo de medición: El dispositivo se conectará en paralelo con las fases y neutro (L1, L2, L3, N), y los CTS a las líneas de carga.

5.3. Instrumentos de recolección de información

5.3.1. Fuentes primarias. los libros se utilizan como fuente principal, ya que generalmente son escritos por expertos y académicos en sus respectivos campos.

5.3.2. Fuentes secundarias. Se utilizan diversos artículos científicos y tesis académicas. Estos son importantes porque proporcionan antecedentes y experiencias pertinentes que guían las estrategias de investigación aplicadas en este estudio.

6. Resultados

En esta sección se presentan los resultados obtenidos durante las pruebas realizadas al prototipo desarrollado para la medición y transmisión en tiempo real de parámetros eléctricos en un sistema trifásico. Los datos recolectados incluyen mediciones de voltaje, corriente, potencia activa, aparente y reactiva, así como el factor de potencia. Los resultados han sido evaluados tanto en términos de precisión de las mediciones como en la capacidad de transmisión y almacenamiento de datos en la base de datos en la nube (InfluxDB).

6.1. Componentes de prueba y laboratorio

6.1.1. Banco de pruebas. En el módulo que se puede apreciar en la figura 8 se realizaron las pruebas. Este módulo cuenta (el de potencia), con unas perillas que permiten regular el voltaje y otras de poder saber la medida entre fases y neutro. Con lo cual se tiene un punto de referencia para poder tener la simulación de señales requerida. En cuanto a la frecuencia este la toma desde la red, lo cual es de 60Hz.



Figura 8. Modulo 104 LEYBOLD.

Fuente: Autores

6.1.2. Pinzas voltiamperimetricas. Estas pinzas son de la marca UNI-T UT202+ las cuales tienen un rango de voltaje fase neutro de hasta 600V con una desviación de más o menos de 0.8%+5 y una desviación en la corriente de más o menos de 2%+10 (uni-trend, 2024).



Figura 9. Pinza UNI-T UT202+.

Fuente: <https://lc.cx/sjjAv0>

6.1.3. Analizador de energía. Este analizador de energía de la marca FLUKE 434 tiene un rango de voltaje fase neutro de hasta 1000V con una desviación de más o menos de 0.1%+5 y una desviación en la corriente de más o menos de 0.5%+5 (fluke, 2024).



Figura 10. Analizador de energía FLUKE 434.

Fuente: <https://lc.cx/locwae>

6.1.4. Analizador prototipo. Este analizador que es el prototipo propuesto tiene como sensores los PZEM-004T los cuales tienen un rango de voltaje fase neutro 260V con una desviación de más o menos 0.5% y una desviación en la corriente de más o menos de 0.5.% (suconel, 2024).



Figura 11. Prototipo de analizador.
Fuente: Autores.

6.1.5. Carga (Motor). El motor tiene dos configuraciones de conexión, Delta y estrella con un voltaje de 400V y 230V respectivamente. Hace parte de la misma marca del banco de prueba, con una potencia de 0.25kW.



Figura 12. Motor de pruebas.

Fuente: Autores.

6.2. Resultados de las Mediciones Eléctricas

6.2.1. Voltaje. Los valores de voltaje en las tres fases (L1, L2, L3) fueron registrados de manera puntual durante el período de prueba. Los resultados muestran que el voltaje se mantiene dentro de los rangos esperados para un sistema trifásico de 230 V. Esto se puede ver en la tabla 6.

Tabla 6.

Voltajes y porcentaje de desviación con respecto al banco de pruebas.

| Fase | Voltaje banco (V) | Voltaje pinza (V) | Desviación (%) | Voltaje Fluke (V) | Desviación (%) | Voltaje prototipo(V) | Desviación (%) |
|------|-------------------|-------------------|----------------|-------------------|----------------|----------------------|----------------|
| L1 | 230.4 | 230.4 | 0 | 230.4 | 0 | 230.4 | 0 |
| L2 | 228.6 | 228.6 | 0 | 228.6 | 0 | 228.6 | 0 |
| L3 | 232.1 | 232.1 | 0 | 230.4 | 0.75 | 226.9 | 2,24 |

Fuente: Autores.

La desviación correspondiente del voltaje se toma con referencia el suministrado por el banco de pruebas. Según la tabla 6 se puede decir que las mediciones del banco y la pinza coinciden perfectamente entre sí para las tres fases, lo que sugiere que estas herramientas están

proporcionando resultados consistentes y confiables, en cambio las mediciones con el FLUKE y el prototipo discrepan un poco de los resultados de la tercera línea. Esto puede deberse a algún error con las mediciones de la fase en particular.

6.2.2. Corriente de línea (A). La corriente medida en cada fase mostro un comportamiento irregular con la carga puesta. Esto se puede ver en la tabla 7

Tabla 7.

Corrientes y porcentaje de desviación con respecto al banco de pruebas.

| Fase | Corriente banco (A) | Corriente pinza (A) | Desviación (%) | Corriente Fluke (A) | Desviación (%) | Corriente prototipo(A) | Desviación (%) |
|------|---------------------|---------------------|----------------|---------------------|----------------|------------------------|----------------|
| L1 | 0,27 | 0,31 | 14,81 | 0,6 | 122,22 | 0,31 | 14,81 |
| L2 | 0,24 | 0,26 | 8,33 | 0,3 | 25,00 | 0,27 | 12,50 |
| L3 | 0,31 | 0,34 | 9,68 | 0,5 | 61,29 | 0,35 | 12,90 |

Fuente: Autores

La desviación de corriente se toma con respecto a lo mostrado en el banco de pruebas. Según la tabla anterior se puede decir que las mediciones discrepan mucho de lo mostrado por los demás analizadores, los únicos más cercanos son las pinzas y el prototipo. Esto puede deberse algún error de calibración entre los componentes de la medición.

6.2.3. Potencia Activa, Potencia Aparente, Potencia Reactiva. Las medidas de las potencias solo se lograron realizar con los datos del Fluke y el prototipo, debido a que el banco y la pinza no tienen forma de medir el factor de potencia. Los resultados se muestran en las tablas 8, 9 y 10.

Tabla 8.

Potencia Activa y porcentaje de desviación con respecto al analizador FLUKE.

| Fase | Potencia Activa Fluke (W) | Potencia Activa Prototipo (W) | Desviación (%) |
|------|---------------------------|-------------------------------|----------------|
| L1 | 50,27 | 54,42 | 8,25 |
| L2 | 24,95 | 25,66 | 2,86 |
| L3 | 41,90 | 33,01 | 21,20 |

Fuente: Autores.

Tabla 9.

Potencia Aparente y porcentaje de desviación con respecto al analizador FLUKE.

| Fase | Potencia Aparente Fluke (VA) | Potencia Aparente Prototipo (VA) | Desviación (%) |
|------|------------------------------|----------------------------------|----------------|
| L1 | 239,4 | 123,69 | 48,33 |
| L2 | 118,8 | 106,92 | 10,00 |
| L3 | 199,5 | 137,55 | 31,05 |

Fuente: Autores.

Tabla 10.

Potencia Reactiva y porcentaje de desviación con respecto al analizador FLUKE.

| Fase | Potencia Reactiva Fluke (VAR) | Potencia Reactiva Prototipo (VAR) | Desviación (%) |
|------|-------------------------------|-----------------------------------|----------------|
| L1 | 234,06 | 111,07 | 52,55 |
| L2 | 116,15 | 103,80 | 10,64 |
| L3 | 195,05 | 133,53 | 31,54 |

Fuente: Autores.

Lo antes mencionado en las tablas anteriores se puede decir que las mediciones discrepan de manera significativa. Esto se puede deber a que el analizador Fluke no está diseñado para potencias tan bajas, y los errores de medición pueden ser significativos con respecto al prototipo.

6.2.4. Factor de Potencia (FP). El factor de potencia para cada fase discrepo de manera significativa en la L1 entre el Fluke y el prototipo. Esto se muestra en la tabla 11.

Tabla 11.

Factor de potencia y porcentaje de desviación con respecto al analizador FLUKE.

| Fase | FP Fluke | FP Prototipo | Desviación (%) |
|------|----------|--------------|----------------|
| L1 | 0,21 | 0,44 | 109,52 |
| L2 | 0,21 | 0,24 | 14,29 |
| L3 | 0,21 | 0,24 | 14,29 |

Fuente: Autores

Como se puede ver en la tabla 11. En la L1 el porcentaje de desviación es extremadamente alto lo que sugiere que se pueda tener un problema con las mediciones en esa fase y lo mostrado por el Fluke y el prototipo.

6.3. Transmisión de Datos y Almacenamiento en la Nube

6.3.1. Frecuencia de transmisión. La transmisión de datos se realizó con éxito cada 4 segundos, tal como se había establecido en la programación. Los datos fueron enviados a la base de datos InfluxDB Cloud sin problemas de conectividad o pérdidas significativas de datos.

6.3.2. Capacidad de almacenamiento. Los datos se almacenaron correctamente en la base de datos InfluxDB, y se verificó que la estructura de almacenamiento, incluyendo mediciones y campos, se ajustó a lo esperado. La base de datos mostró un buen rendimiento en términos de retención y consulta de los datos durante el tiempo de prueba.

6.4. Evaluación de la Interfaz Gráfica y Consulta de Datos

6.4.1. Visualización. La interfaz gráfica se puede ver en dos formas, la primera en forma de tablas donde se muestra cada uno de los aspectos transmitidos donde se tiene una columna donde muestra la fecha y la hora de la toma del dato, y la segunda en forma de grafico en forma de línea en el tiempo.

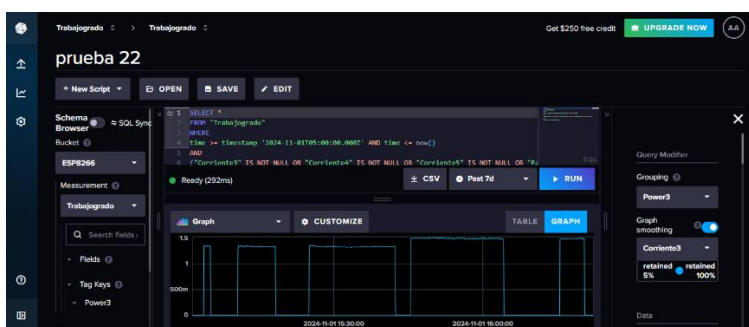


Figura 13. Interfaz gráfica de los datos en el tiempo.

Fuente: Autores

6.4.2. Consultas. Las consultas de cualquier punto de información son fáciles de ver, esto debido a que estos datos son transmitidos en una serie de tiempo, lo que facilita su consulta en cualquier punto de la tabla o de la gráfica logrando determinar en un punto exacto algún problema con la carga.

| Corriente3 | Corriente4 | Corriente5 | Factor de Potencia total3 | Frecuencia3 | pf3 | pf4 | pf5 | P |
|------------|------------|------------|---------------------------|-------------|-----|-----|-----|---|
| 0 | 0 | 0 | | 59.9 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 0 | 0 | 0 | | 60 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 0 | 0 | 0 | | 60 | 0 | 0 | 0 | 0 |

Figura 14. Interfaz gráfica de consulta de datos en el tiempo.

Fuente: Autores

6.5. Comportamiento del Sistema en el Laboratorio

El sistema fue probado en condiciones sin carga dentro del laboratorio de máquinas eléctricas, y se observó que las mediciones eran consistentes con las expectativas comparadas con varios analizadores. No se presentaron problemas de rendimiento en cuanto adquisición de datos, puesta en marcha e instalación de componentes, en cuanto a precisión es muy subjetivo debido a que los componentes con los cuales se comparó el prototipo están constantemente manipulados por todos los estudiantes y su precisión puede variar según se tome los datos de un día a otro, y el sistema del prototipo demostró ser robusto en la medición y transmisión de datos.

Las medidas tomadas en toda la comparativa se realizó en varias tomas compuestas de intervalos de 30 minutos. En la figura se puede ver el montaje.

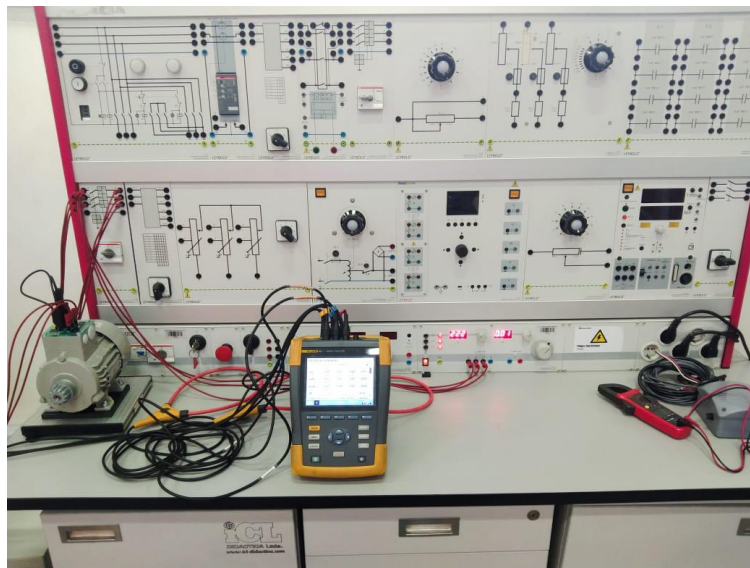


Figura 15. Montaje de laboratorio con motor en vacío.

Fuente: Autores

También podemos ver en las figuras 16, 17 y 18 como fue el comportamiento en los intervalos antes mencionados.

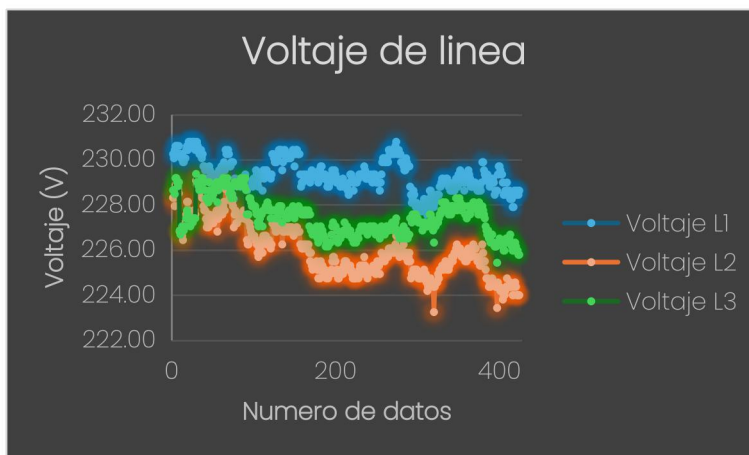


Figura 16. Voltajes de línea en un tiempo de 30 minutos.

Fuente: Autores

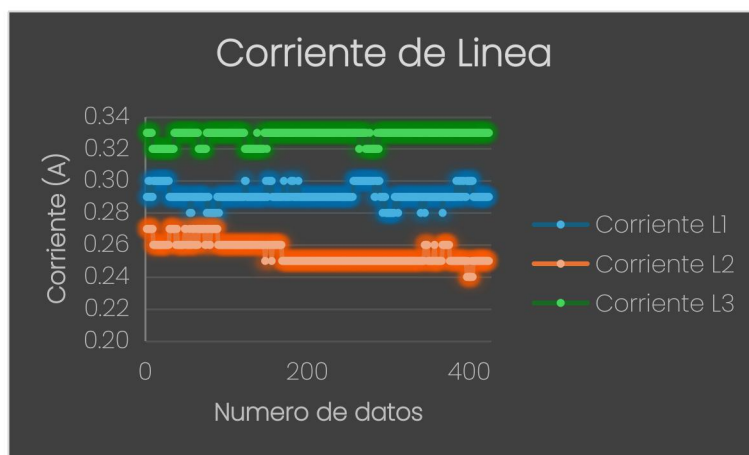


Figura 17. Corrientes de línea en un tiempo de 30 minutos.

Fuente: Autores

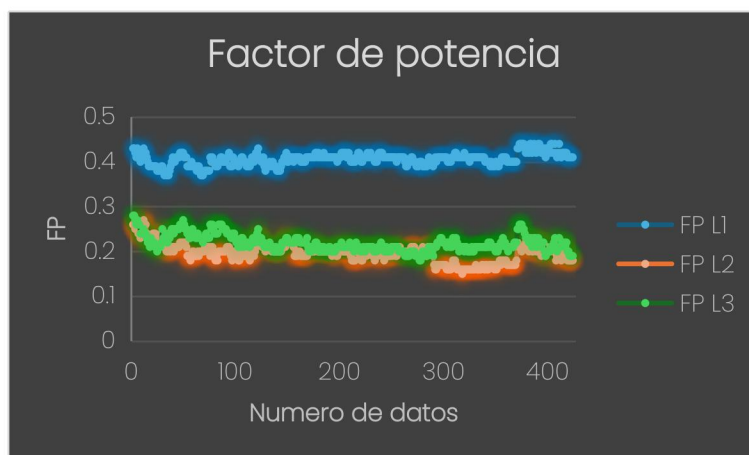


Figura 18. Factores de potencia de cada línea en un tiempo de 30 minutos.

Fuente: Autores

7. Conclusiones

El presente trabajo tuvo como objetivo principal crear un prototipo funcional de adquisición de datos en tiempo real de parámetros eléctricos. A continuación, se presentan las principales conclusiones obtenidas a partir del análisis de los resultados.

Se logra desarrollar un sistema de monitoreo con un almacenamiento en la nube en tiempo real de parámetros eléctricos como lo son voltaje, corriente, potencias y factor de potencia. Lo cual facilita la posterior evaluación de manera grafica y por ende una implementación de medidas preventivas y correcticas. Evitando así recargos de energía por un bajo factor de potencia, proporcionando una herramienta funcional.

Se integraron sensores fiables y microcontroladores para la construcción del prototipo basada en el internet de las cosas. Siendo este eficiente, capas de transmitir datos en tiempo real a una plataforma centralizada, garantizando así la precisión y confiabilidad del monitoreo.

Se construyo un entorno gráfico amigable proporcionando una visualización y análisis en tiempo real de los datos recopilados, permitiendo a las empresas acceder a métricas relevantes sobre el factor de potencia.

Se llevó a cabo la ejecución de las pruebas para su inclusión en un entorno controlado en el laboratorio de eléctrica. Los resultados de estas comprobaciones corroboraron que el sistema funciona eficientemente con un tiempo de respuesta y estabilidad esperados. Se demostró que el prototipo funcionó adecuadamente para el monitoreo en tiempo real y es capaz de funcionar de manera continua en escenarios controlados. También cabe añadir que la perdida de datos fue nula con lo cual supero las expectativas del 5%.

El prototipo no solamente ofrece resultados satisfactorios en la medida de lo propuesto, sino que también constituye una respuesta económica para las empresas que se proponen controlar su factor de potencia y evitar pagar sanciones. Gracias al ser modular facilita futuras adiciones y modificaciones para cumplir con nuevos requisitos.

Los resultados obtenidos representan un avance en el estudio del Internet Industrial de las cosas (IIOT), proporcionando herramientas para la evaluación y análisis del consumo energético.

Si bien los resultados son significativos, la investigación estuvo limitada por no poseer datos con cargas más significativas (Motor en vacío), lo cual podría abordarse en futuros estudios.

En conclusión, esta investigación demuestra que la construcción de un prototipo y el almacenamiento en la nube establece las bases para futuras investigaciones y aplicaciones en el área de eficiencia energética.

8. Recomendaciones

Basado en los resultados de esta investigación, los autores hacen las siguientes recomendaciones para el futuro desarrollo del sistema, las perspectivas de su aplicación práctica y posibles líneas de investigación complementarias.

Se aconseja expandir el sistema a entornos industriales más complejos (no más de 100^a), estudiando su rendimiento en condiciones de alta carga y ruido eléctrico.

Se sugiere llevar a cabo estudios que evalúen la aplicación de algoritmos de IA que detecten anomalías en tiempo real y avisen de las mismas.

Realizar estudios donde el sistema esté instalado en redes eléctricas de diferentes configuraciones para probar su flexibilidad y robustez.

Se sugiere promover este tipo de sistema en pequeñas y medianas empresas, ya que en esas áreas son donde más se presentan multas por un mal factor de potencia.

La implementación de estas recomendaciones permitirá no solo mejorar el desempeño del sistema desarrollado, sino también avanzar en la investigación y desarrollo de soluciones innovadoras en el ámbito del monitoreo energético.

Bibliografía

- Arias Restrepo, J., & Varela Larrotta, L. (2019). *Anuario iberoamericano de derecho de la energía*. Obtenido de <https://books.google.com.co/>: <https://lc.cx/ZOSLRy>
- CREG. (2018). *Resolución CREG 015 DE 2018*. Obtenido de <https://www.celsia.com/>: <https://lc.cx/nCkoke>
- Diaz Muñoz, G. M. (2024). *Retos Y Oportunidades De Las Mipymes En Los Territorios De Colombia*. Uexternado.
- Dragičević, T., & Novak, M. (17 de Octubre de 2018). *Weighting Factor Design in Model Predictive Control of Power Electronic Converters*. Obtenido de ieeexplore.ieee.org: <https://lc.cx/B1HtWL>
- Dunning, T., & Friedman, E. (2015). *Time Series Databases: New Ways to Store and Access Data*. O'Reilly Media.
- Electrical4U. (20 de Abril de 2024). *High Voltage Transformer: Definition, Types, and Applications*. Obtenido de electrical4u.com: <https://lc.cx/1VLKdE>
- Faludi, R. (2010). *Building Wireless Sensor Networks: With ZigBee, XBee, Arduino, and Processing*. O'Reilly Media.
- fluke. (2024). *Analizadores de calidad eléctrica y energía 434-II y 435-II de Fluke*. Obtenido de fluke.com: <https://lc.cx/orUnNU>
- Glover, J., Sarma, M., & Overbye, T. (2016). *Power System Analysis and Design*. Cengage Learning.
- Grafana Labs. (2019). *Getting Started with Grafana and InfluxDB*. Obtenido de grafana.com: <https://lc.cx/HruFCZ>
- Hersent, O., Boswarthick, D., & Elloumi, O. (2012). *The Internet of Things: Key Applications and Protocols*. Wiley.

- IEEE Access. (2020). Leveraging InfluxDB for real-time data analysis in industrial IoT. *IEEE Access*, 123456-123465.
- IEEE Communications Magazine. (2018). Connectivity Solutions for IIoT Applications. *IEEE Communications Magazine*, 56(12), 112-119.
- IEEE Internet of Things Journal. (2019). Low-cost IoT solutions for power monitoring using ESP8266 and ESP32. *IEEE Internet of Things Journal*, 7357-7365.
- IEEE Sensors Journal. (2018). Low-cost power factor measurement and monitoring using IoT platforms. *IEEE Sensors Journal*, 2025-2033.
- IEEE Transactions on Industrial Electronics. (2018). Improving power factor: Techniques and benefits. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 2994-3003.
- IEEE Transactions on Industry Applications. (2015). The importance of power factor correction in industrial settings. *IEEE Transactions on Industry Applications*, 2205-2212.
- IoT For All. (2019). *The role of IoT in energy management*. Obtenido de iotforall.com: https://lc.cx/R_SFuJ
- IoT For All. (18 de septiembre de 2023). *Modbus Protocol: The Grandfather of IoT Communication*. Obtenido de iotforall.com: <https://lc.cx/MVHOqy>
- Jeschke, S., Brecher, C., Song, H., & B. Rawat, D. (2017). *Industrial Internet of Things: Cybermanufacturing Systems*. Springer.
- Kusko, A., & Thompson, M. (2007). *Power Quality in Electrical Systems*. McGraw-Hill Education.
- Muhammad , A., & Muhammad , A. (Noviembre de 2023). *Dynamic Power Factor Correction in Industrial Systems: An Automated Capacitor Bank Control Approach*. Obtenido de ieeexplore.ieee.org: https://lc.cx/_ESmEf
- Munirathinam, S. (28 de Junio de 2020). *Chapter Six - Industry 4.0: Industrial Internet of Things (IIOT)*. Obtenido de sciencedirect.com: <https://lc.cx/HzuNxm>
- P., S., & T., R. B. (Noviembre de 2022). *Power Factor Correction: Its Importance and Improvements*. Obtenido de ieeexplore.ieee.org: <https://lc.cx/eLQ8XQ>

R. Hambley, A. (2010). *Ingeniería Eléctrica: Principios y Aplicaciones*. Pearson Educación.

RaspberryPi.org. (2020). *Using Raspberry Pi for power monitoring*. Obtenido de RaspberryPi.org: <https://lc.cx/8wM2Bk>

suconel. (2024). *PZEM004T V3.0 Medidor multifunción con comunicación UART*. Obtenido de suconel.com: <https://lc.cx/lARDEO>

Svoboda, J., & Dorf, R. (2006). *Introduction to electric circuits*. Obtenido de <https://books.google.com.co/>: <https://lc.cx/WbkBrh>

uni-trend. (Noviembre de 2024). *UT200+ Series 400A/600A Digital Clamp Meters*. Obtenido de uni-trend.com: https://lc.cx/hvsAm_