



UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE QUERÉTARO

FACULTAD DE INGENIERÍA

INGENIERÍA EN AUTOMATIZACIÓN

T.D.T.A. IV

**Sistema Automatizado de Corrección y Monitoreo Energético
(SACME)**

Profesor:

Dr. Gonzalo Macías Bobadilla

Integrantes:

Zúñiga Fragoso Diego Joel

Manríquez Navarro Daniela del Carmen

Zeron Marin Luis Alejandro

González Caballero Luis Fernando

Fecha de entrega: 15 de marzo del 2025

Índice general

1. Resumen	1
2. Introducción	2
2.1. Planteamiento del problema	2
2.2. Objetivos generales	2
2.3. Objetivos específicos	2
3. Fundamentación teórica	3
3.1. Potencia eléctrica	3
3.1.1. Potencia eléctrica en circuitos de corriente directa (DC)	3
3.1.2. Triangulo de potencia	3
3.2. Definición e impacto del factor de potencia	4
3.2.1. Elementos que afectan al factor de potencia	5
3.2.2. Consecuencias de un bajo factor de potencia	5
3.3. Corrección del factor de potencia	5
3.3.1. Métodos actuales de corrección del factor de potencia	6
4. Metodología	7
4.1. Especificación	7
4.1.1. Requerimientos funcionales	7
4.1.2. Especificaciones técnicas	7
4.2. Diseño	8
4.2.1. Evaluación de plataformas de procesamiento	8
4.2.2. Diseño del subsistema de adquisición de datos	9
4.2.3. Diseño del subsistema de control	9
4.2.4. Diseño del subsistema de conectividad IoT	10
4.3. Implementación	10
4.3.1. Desarrollo de hardware	10
4.3.2. Desarrollo de firmware	11
4.3.3. Desarrollo de software	12
4.3.4. Integración y ensamblaje	12
4.4. Validación y pruebas	13
4.4.1. Pruebas de laboratorio	13
4.4.2. Pruebas de campo	13
4.4.3. Verificación de conformidad	13
4.4.4. Evaluación de rendimiento IoT	14
4.5. Proceso de optimización	14
5. Resultados y discusión	16
6. Conclusiones	17
7. Referencias	18

Índice de figuras

3.1. Imagen ilustrativa del triangulo de potencia	4
4.1. Arquitectura del subsistema de adquisición de datos	9
4.2. Arquitectura del subsistema de control	9
4.3. Arquitectura de la solución IoT para el SACME	10
4.4. Prototipo del SACME ensamblado en gabinete industrial	12
4.5. Ciclo de optimización iterativa del SACME	14

Índice de cuadros

4.1. Comparativa entre plataformas ESP32 y FPGA	8
4.2. Protocolo de pruebas de laboratorio	13

Capítulo 1

Resumen

Este proyecto desarrolla un Sistema Automatizado de Corrección y Monitoreo Energético (SACME), diseñado para optimizar el consumo eléctrico en instalaciones industriales y comerciales. El sistema corrige el factor de potencia en tiempo real mediante la conexión y desconexión automática de bancos de capacitores, evitando penalizaciones por bajo factor de potencia y reduciendo las pérdidas de energía. Además, integra un módulo de monitoreo remoto basado en IoT (Internet de las Cosas), que permite visualizar los parámetros eléctricos a través de una plataforma web o aplicación móvil.

El dispositivo utiliza sensores y medidores robustos para capturar datos en tiempo real, como voltaje, corriente, potencia activa, reactiva y factor de potencia. Estos datos son procesados por un controlador central que activa los bancos de capacitores según la demanda reactiva. La conectividad IoT permite el envío de datos a un servidor en la nube, donde se generan reportes y alertas para el usuario, facilitando la identificación de anomalías y la toma de decisiones informadas.

Capítulo 2

Introducción

El factor de potencia es un parámetro clave en la eficiencia energética de cualquier instalación eléctrica. Un bajo factor de potencia genera pérdidas económicas y problemas en la red. En este trabajo se desarrolla un banco de capacitores automático capaz de corregir el factor de potencia en tiempo real y permitir su monitoreo remoto mediante IoT.

2.1. Planteamiento del problema

2.2. Objetivos generales

2.3. Objetivos específicos

Capítulo 3

Fundamentación teórica

La monitorización y optimización de la potencia eléctrica son procesos fundamentales para garantizar la eficiencia energética en instalaciones industriales y comerciales. Para lograr una gestión efectiva de la energía, es necesario comprender los factores que afectan negativamente su consumo, así como las tecnologías y metodologías disponibles para mitigar estos efectos. Este marco teórico tiene como objetivo proporcionar los fundamentos conceptuales y técnicos que sustentan el desarrollo del SACME, enfocándose en la corrección del factor de potencia y la monitorización en tiempo real de parámetros eléctricos.

3.1. Potencia eléctrica

La potencia eléctrica es la tasa a la que se transfiere o se transforma energía en un sistema eléctrico. Se mide en vatios (W) y es fundamental para determinar la capacidad de un circuito o dispositivo para realizar trabajo, ya sea en forma de calor, movimiento o luz.

En términos generales, la potencia eléctrica indica cuánta energía se consume o se genera por unidad de tiempo.

3.1.1. Potencia eléctrica en circuitos de corriente directa (DC)

En un circuito de corriente continua (DC), la potencia eléctrica es directamente proporcional al voltaje aplicado y a la corriente que fluye a través del circuito. Dado que en estos circuitos la impedancia está compuesta únicamente por elementos resistivos, la ecuación que describe la potencia es sencilla y se expresa de la siguiente manera:

$$P = V * I \tag{3.1}$$

Donde:

- P : Es la potencia eléctrica en watts [W]
- V : Es la tensión o voltaje en voltios [V]
- I : Es la corriente eléctrica en amperios [A]

3.1.2. Triángulo de potencia

El Triángulo de Potencia es una representación gráfica que permite visualizar y relacionar las tres magnitudes fundamentales en un sistema de corriente alterna: la potencia activa, la potencia reactiva y la potencia aparente. Este diagrama facilita el análisis del comportamiento del sistema y la eficiencia en el uso de la energía.

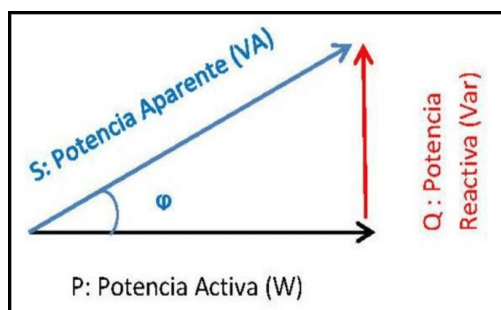


Figura 3.1: Imagen ilustrativa del triángulo de potencia

Donde:

- Potencia Activa (P):
Representa la energía que efectivamente se convierte en trabajo útil (calor, movimiento, luz, etc.) y se mide en vatios [W]. Se ubica en el eje horizontal.
- Potencia Reactiva (Q):
Es la energía que oscila entre la fuente y la carga, debida a los elementos inductivos y capacitivos, y se mide en voltamperios reactivos [VAR]. Se ubica en el eje vertical.
- Potencia Aparente (S):
Es el vector resultante que combina la potencia activa y reactiva, y se mide en voltamperios [VA]. Es la hipotenusa del triángulo.

Debido a la existencia de la potencia reactiva en circuitos de corriente alterna, no toda la potencia se convierte en trabajo debido al desfase entre el voltaje y la corriente. Por lo tanto, la fórmula de la potencia quedara expresada de la siguiente manera:

$$P = V * I * \cos(\phi) \quad (3.2)$$

Donde:

- $\cos(\phi)$: Es el factor de potencia

3.2. Definición e impacto del factor de potencia

El factor de potencia (FP) es un indicador que mide la eficiencia con la que se utiliza la energía eléctrica. Matemáticamente, se define como la relación entre la potencia activa (P) y la potencia aparente (S), y coincide con el coseno del ángulo de desfase (ϕ) entre la tensión y la corriente.

$$FP = \frac{P}{S} = \cos(\phi) \quad (3.3)$$

El factor de potencia puede tomar valores entre 0 y 1, donde:

- FP = 1: Indica un circuito puramente resistivo donde toda la energía consumida se convierte en trabajo útil.
- FP = 0: Representa un circuito puramente inductivo o capacitivo donde toda la energía oscila entre la fuente y la carga sin producir trabajo útil.

En instalaciones industriales, un factor de potencia óptimo se considera por encima de 0.95. La Comisión Federal de Electricidad (CFE) en México establece penalizaciones económicas para consumidores con un factor de potencia inferior a 0.9, mientras que ofrece bonificaciones para aquellos que mantienen valores superiores a este umbral.

3.2.1. Elementos que afectan al factor de potencia

Diversos elementos presentes en las instalaciones eléctricas pueden reducir el factor de potencia debido a su comportamiento inductivo o capacitivo. Los más comunes son:

- **Motores eléctricos de inducción:** Representan la carga inductiva más significativa en la industria. Consumen potencia reactiva para generar sus campos magnéticos, especialmente cuando operan por debajo de su capacidad nominal.
- **Transformadores:** Requieren potencia reactiva para la magnetización de sus núcleos. Cuando operan con baja carga, el consumo de potencia reactiva puede ser proporcionalmente alto.
- **Equipos de iluminación con balastos electromagnéticos:** Particularmente las lámparas fluorescentes y de descarga de alta intensidad tradicionales que utilizan balastos inductivos.
- **Máquinas de soldar:** Los equipos de soldadura por arco eléctrico tienen un factor de potencia inherentemente bajo debido a su alta inductancia.
- **Hornos de inducción:** Utilizan campos electromagnéticos para calentar materiales, lo que genera un consumo elevado de potencia reactiva.
- **Equipos electrónicos con fuentes conmutadas:** Aunque individualmente pueden tener un impacto menor, su proliferación en entornos industriales y comerciales suma un efecto considerable.

3.2.2. Consecuencias de un bajo factor de potencia

Un factor de potencia deficiente tiene implicaciones técnicas y económicas significativas:

- **Penalizaciones económicas:** Las empresas suministradoras de energía aplican recargos en la facturación cuando el factor de potencia está por debajo de ciertos límites (típicamente 0.9), pudiendo incrementar el costo de la energía hasta en un 20 %.
- **Sobrecarga en conductores:** La corriente total que circula aumenta inversamente proporcional al factor de potencia, causando mayores pérdidas por efecto Joule (I^2R) y exigiendo conductores de mayor sección.
- **Sobrecarga en transformadores:** Reduce la capacidad efectiva de los transformadores para suministrar potencia activa, ya que parte de su capacidad se destina a la potencia reactiva.
- **Caídas de tensión:** El incremento de corriente provoca mayores caídas de tensión en la línea, afectando la calidad del suministro y el funcionamiento de equipos sensibles.
- **Reducción de la capacidad del sistema eléctrico:** Limita la cantidad de carga útil que puede conectarse a la red existente, pudiendo requerir ampliaciones innecesarias de la instalación.
- **Mayor desgaste en equipos de distribución:** Interruptores, seccionadores y protecciones sufren mayor estrés debido a las corrientes elevadas.

En términos cuantitativos, cuando el factor de potencia disminuye de 0.95 a 0.75, la capacidad del sistema se reduce aproximadamente en un 21 %, mientras que las pérdidas en conductores aumentan en un 60 %.

3.3. Corrección del factor de potencia

La corrección del factor de potencia consiste en la instalación de dispositivos que compensen la potencia reactiva consumida por las cargas inductivas. El objetivo es acercar el factor de potencia lo más posible a la unidad, minimizando así la potencia reactiva que debe suministrar la red eléctrica.

El método más común de corrección es la instalación de capacitores, que proporcionan potencia reactiva de carácter opuesto a la consumida por las cargas inductivas. La capacidad necesaria para la corrección se puede calcular mediante la siguiente fórmula:

$$Q_c = P \times (\tan \phi_1 - \tan \phi_2) \quad (3.4)$$

Donde:

- Q_c : Potencia reactiva capacitiva necesaria en VAR
- P : Potencia activa consumida en W
- ϕ_1 : Ángulo del factor de potencia inicial
- ϕ_2 : Ángulo del factor de potencia deseado

3.3.1. Métodos actuales de corrección del factor de potencia

Existen diferentes enfoques para implementar la corrección del factor de potencia, cada uno con sus propias ventajas y aplicaciones:

- **Corrección individual:** Consiste en instalar capacitores directamente en los bornes de cada equipo con bajo factor de potencia. Presenta ventajas como la descarga de los conductores desde la fuente hasta la carga y la automatización intrínseca (los capacitores operan solo cuando el equipo está en funcionamiento). Es ideal para motores y equipos de gran potencia con ciclos prolongados de operación.
- **Corrección por grupos:** Se aplica cuando un conjunto de cargas opera simultáneamente. Los capacitores se instalan en un punto común que alimenta a todo el grupo, como un tablero de distribución secundario. Ofrece un equilibrio entre costo y eficiencia, reduciendo el número de capacitores necesarios.
- **Corrección centralizada:** Un banco de capacitores se instala en el punto principal de alimentación, generalmente junto al transformador o en el tablero general. Este método requiere un sistema de control automático para ajustar la capacitancia según la demanda variable de potencia reactiva.
- **Bancos automáticos de capacitores:** Utilizan controladores electrónicos que monitorean continuamente el factor de potencia y conectan o desconectan escalones de capacitores según sea necesario. Estos sistemas incluyen:
 - Sensores de voltaje y corriente
 - Relés varimétricos que detectan cambios en la potencia reactiva
 - Controladores microprocesados que determinan qué pasos de capacitores activar
 - Contactores para la conexión/desconexión física de los capacitores
 - Resistencias de descarga para proteger los capacitores durante la conmutación
- **Filtros activos:** Dispositivos electrónicos de potencia que generan corrientes armónicas de igual magnitud pero fase opuesta a las generadas por las cargas no lineales. Además de corregir el factor de potencia, estos sistemas mejoran la calidad de la energía eliminando armónicos. Son especialmente útiles en instalaciones con alta presencia de equipos electrónicos y variadores de frecuencia.
- **Compensadores síncronos:** Motores síncronos que funcionan en vacío, pudiendo generar o absorber potencia reactiva mediante el ajuste de su excitación. Aunque presentan ventajas en aplicaciones de gran escala, su uso ha disminuido debido a su alto costo y mantenimiento frente a soluciones más modernas.

La elección del método más adecuado depende de varios factores, incluyendo el tipo de carga, el patrón de consumo, la estabilidad de la demanda y las consideraciones económicas. En instalaciones industriales modernas, la tendencia es hacia sistemas automatizados con monitoreo en tiempo real que permitan una respuesta dinámica a las variaciones de carga y optimicen el consumo energético global.

Capítulo 4

Metodología

Para el desarrollo del SACME, se implementó una metodología estructurada basada en el diseño de sistemas embebidos, integrando consideraciones específicas para aplicaciones industriales de potencia y conectividad IoT. El proceso se dividió en varias etapas interrelacionadas que permitieron avanzar desde la concepción teórica hasta la implementación y validación del sistema final.

4.1. Especificación

El primer paso consistió en definir las especificaciones técnicas y funcionales que debía cumplir el sistema, basadas en los requerimientos de instalaciones industriales típicas y las limitaciones identificadas en soluciones existentes.

4.1.1. Requerimientos funcionales

Se establecieron los siguientes requerimientos funcionales esenciales:

- **Corrección automática del factor de potencia:** El sistema debe mantener un factor de potencia superior a 0.95 bajo condiciones variables de carga, mediante la conexión y desconexión controlada de bancos de capacitores.
- **Medición precisa de parámetros eléctricos:** Capacidad para medir voltaje, corriente, potencia activa, potencia reactiva, factor de potencia y componentes armónicos con precisión de clase 0.5 o superior según IEC 62053-22.
- **Monitoreo remoto:** Transmisión segura de datos a una plataforma en la nube, con accesibilidad mediante interfaz web y aplicación móvil.
- **Alertas y notificaciones:** Generación automática de alertas ante condiciones anómalas, como factor de potencia por debajo del umbral establecido, sobrecalentamiento de capacitores o fallos en el sistema.
- **Registro histórico:** Almacenamiento y visualización de datos históricos para análisis de tendencias y generación de informes.
- **Operación autónoma:** Funcionamiento continuo sin intervención manual, con capacidad de autodiagnóstico y recuperación ante fallos.

4.1.2. Especificaciones técnicas

Con base en los requerimientos funcionales, se establecieron las siguientes especificaciones técnicas:

- **Tensión nominal:** Sistema trifásico 220/440 VAC, compatible con configuraciones delta y estrella.
- **Capacidad de corrección:** Hasta 100 kVAR, distribuidos en módulos de 5 kVAR para permitir una corrección escalonada.
- **Resolución de medición:**

- Voltaje: $\pm 0.5\%$ en rango 80-500 VAC
 - Corriente: $\pm 0.5\%$ en rango 1-1000 A (mediante transformadores de corriente)
 - Factor de potencia: ± 0.01
 - Armónicos: Hasta el 25º orden con precisión de $\pm 2\%$
- **Frecuencia de muestreo:** 12.8 kHz para análisis de calidad de energía (256 muestras por ciclo en red de 50 Hz).
 - **Tiempo de respuesta:** Menos de 5 segundos para cambios significativos en la demanda de potencia reactiva.
 - **Conectividad:** Ethernet industrial (Modbus TCP/IP), Wi-Fi (802.11b/g/n) y comunicación celular 4G como respaldo.
 - **Condiciones ambientales:** Operación en entornos industriales con temperatura ambiente -10°C a 60°C y humedad relativa hasta 95 % sin condensación.
 - **Normativas aplicables:** Cumplimiento con normas IEC 61000-4 (EMC), IEC 60831 (capacitores de potencia), IEC 61010 (seguridad) y UL 508A (paneles de control industrial).

4.2. Diseño

La fase de diseño se dividió en tres subsistemas interconectados: adquisición de datos, procesamiento y control, y conectividad IoT. Para cada uno se evaluaron distintas alternativas tecnológicas, seleccionando finalmente la arquitectura más adecuada para cumplir con los requerimientos establecidos.

4.2.1. Evaluación de plataformas de procesamiento

Se realizó un análisis comparativo entre plataformas ESP32 y FPGA, considerando aspectos críticos para la aplicación:

Criterio	ESP32	FPGA
Capacidad de procesamiento	Dual-core hasta 240 MHz, suficiente para cálculos básicos de potencia	Superior, permite procesamiento paralelo para análisis avanzado en tiempo real
Velocidad de muestreo	Limitada por ADC (hasta 500 ksps)	Superior, permitiendo muestreo simultáneo de múltiples canales a alta frecuencia
Conectividad integrada	Wi-Fi y Bluetooth incorporados	Requiere componentes adicionales
Complejidad de desarrollo	Programación en C/C++, amplia disponibilidad de bibliotecas	Mayor complejidad, lenguajes HDL (VHDL/Verilog)
Costo	Bajo (5-15 USD)	Moderado a alto (50-300 USD)
Escalabilidad	Limitada por recursos de hardware	Alta, configurable según necesidades
Consumo energético	Bajo, modos de ahorro de energía	Variable, típicamente mayor
Robustez industrial	Limitada, requiere acondicionamiento	Mayor tolerancia a entornos industriales

Cuadro 4.1: Comparativa entre plataformas ESP32 y FPGA

Tras evaluar las ventajas y limitaciones de cada plataforma, se optó por una arquitectura híbrida que combina:

- **FPGA Xilinx Artix-7** como núcleo de procesamiento para la adquisición de datos y cálculos de parámetros eléctricos en tiempo real, aprovechando su capacidad de procesamiento paralelo y alta velocidad de muestreo.

- **Microcontrolador ARM Cortex-M4F** para la implementación de algoritmos de control, gestión de interfaces de usuario locales y coordinación general del sistema.
- **Módulo ESP32** dedicado a la conectividad IoT, permitiendo la comunicación inalámbrica con la plataforma en la nube, con capacidad de actualización remota de firmware.

Esta arquitectura permitió optimizar el balance entre rendimiento, flexibilidad y costo, asegurando el cumplimiento de los requerimientos técnicos establecidos para el sistema.

4.2.2. Diseño del subsistema de adquisición de datos

El subsistema de adquisición se diseñó para capturar con precisión los parámetros eléctricos fundamentales para el cálculo del factor de potencia y la calidad de energía. Se optó por una arquitectura modular que incluye:

Figura 4.1: Arquitectura del subsistema de adquisición de datos

- **Acondicionamiento de señales:**
 - Transformadores de voltaje con aislamiento galvánico 4 kV para muestreo de voltaje de línea.
 - Transformadores de corriente de núcleo dividido (split-core) con relación configurable hasta 1000:5A.
 - Circuitos de protección contra sobretensiones y filtros antialiasing.
- **Conversión analógica-digital:**
 - Convertidores ADC simultáneos de 16 bits, 1 MSPS (ADS8688) para voltajes y corrientes.
 - Sincronización de muestreo mediante PLL para mantener precisión de fase entre señales.
- **Procesamiento de señales en FPGA:**
 - Implementación de algoritmos DFT (Discrete Fourier Transform) para análisis de componentes armónicos.
 - Cálculo en tiempo real de valores RMS, potencia activa, reactiva y aparente mediante bloques DSP dedicados.
 - Detección de eventos transitorios mediante análisis wavelet.

4.2.3. Diseño del subsistema de control

El subsistema de control se diseñó para implementar los algoritmos adaptativos que determinan la conexión óptima de escalones de capacitores según las condiciones detectadas. La arquitectura incluye:

Figura 4.2: Arquitectura del subsistema de control

- **Algoritmo principal de corrección:** Implementación de un controlador PID adaptativo que determina la potencia reactiva capacitiva necesaria para mantener el factor de potencia objetivo, considerando:
 - Filtrado digital de las variaciones rápidas para evitar oscilaciones.
 - Predicción de tendencias mediante modelos ARX (AutoRegressive with eXogenous inputs).
 - Compensación de armónicos para evitar resonancias entre capacitores y la inductancia de la red.
- **Etapas de potencia para conexión de capacitores:**
 - Tiristores en configuración back-to-back para conmutación suave en el cruce por cero.
 - Circuitos de amortiguamiento (snubber) para reducir transitorios de conmutación.
 - Resistencias de descarga para evitar reconexión con capacitores cargados.
 - Sensores de temperatura en cada banco para protección térmica.

■ **Capacitores de potencia:**

- Capacitores trifásicos auto-regenerativos con dieléctrico de polipropileno metalizado.
- Especificación para soportar 1.5 veces la corriente nominal debido a armónicos.
- Fusibles individuales para protección contra cortocircuitos.
- Disposición modular para facilitar mantenimiento y expansión.

4.2.4. Diseño del subsistema de conectividad IoT

La arquitectura IoT se diseñó siguiendo un modelo de capas que asegura la transmisión confiable de datos desde el dispositivo hasta el usuario final:

Figura 4.3: Arquitectura de la solución IoT para el SACME

■ **Capa de dispositivo:**

- Módulo ESP32-WROOM-32 con antena externa para mejor conectividad.
- Módulo 4G (SIM7600E) como respaldo para entornos sin Wi-Fi disponible.
- Interfaz RS-485 con aislamiento para integración con sistemas SCADA existentes.

■ **Capa de comunicación:**

- Protocolo MQTT con TLS 1.2 para comunicación segura y eficiente.
- Implementación de mecanismos store-and-forward para operación confiable con conectividad intermitente.
- Compresión de datos para optimizar ancho de banda.

■ **Capa de plataforma:**

- Backend basado en arquitectura serverless (AWS Lambda).
- Base de datos de series temporales (InfluxDB) para almacenamiento eficiente de datos históricos.
- Implementación de APIs RESTful para integración con sistemas externos.

■ **Capa de aplicación:**

- Aplicación web responsiva desarrollada en React.js.
- Aplicación móvil nativa para Android e iOS.
- Dashboards interactivos con Grafana para visualización avanzada de datos.

4.3. Implementación

La fase de implementación se dividió en desarrollo de hardware, firmware y software, seguida de la integración de los componentes en un prototipo funcional.

4.3.1. Desarrollo de hardware

Se diseñaron y fabricaron las siguientes PCBs (Printed Circuit Boards):

■ **Placa principal de adquisición y procesamiento:**

- FPGA Xilinx Artix-7 (XC7A35T) con 33,280 celdas lógicas.
- Microcontrolador STM32F407 (ARM Cortex-M4F a 168 MHz).
- 8 canales de entrada analógica aislados (4 voltajes, 4 corrientes).
- Memoria SDRAM de 64 MB para almacenamiento temporal de formas de onda.

- Memoria Flash de 32 MB para almacenamiento de firmware y configuraciones.
- **Placa de interfaz de potencia:**
 - Módulos de drivers para tiristores con aislamiento óptico.
 - Circuitos de detección de cruce por cero para cada fase.
 - Protecciones contra sobretensiones y sobrecorrientes.
 - Sensores de temperatura digitales DS18B20 para monitoreo térmico.
 - LEDs indicadores de estado para diagnóstico visual.
- **Placa de conectividad IoT:**
 - Módulo ESP32 con Wi-Fi dual-band y Bluetooth 5.0.
 - Módulo celular 4G con slot para tarjeta SIM.
 - Transceptor RS-485 con aislamiento galvánico.
 - Circuito de watchdog externo para garantizar disponibilidad.
 - Fuente de alimentación redundante con capacidad de operación en modo de bajo consumo.

Todas las PCBs se diseñaron siguiendo las normativas IPC-2221 para diseño de circuitos impresos industriales, con consideraciones específicas para EMI/EMC y robustez en entornos industriales. Se utilizaron componentes con grado industrial (-40°C a 85°C) y se implementaron técnicas de diseño para alta disponibilidad, como redundancia en los sistemas críticos.

4.3.2. Desarrollo de firmware

El desarrollo del firmware se realizó utilizando un enfoque modular basado en RTOS (Real-Time Operating System), permitiendo la ejecución concurrente de tareas con diferentes prioridades y requisitos temporales:

- **Firmware FPGA:**
 - Implementado en VHDL utilizando Xilinx Vivado Design Suite.
 - Diseño de IP Cores específicos para procesamiento de señales eléctricas.
 - Implementación de filtros digitales FIR para eliminación de ruido.
 - Algoritmos de transformación de Clarke y Park para análisis de componentes simétricas.
 - Sistema de detección de eventos y anomalías en tiempo real.
- **Firmware microcontrolador:**
 - Basado en FreeRTOS para gestión de tareas y recursos.
 - Implementación del algoritmo de control adaptativo para corrección del factor de potencia.
 - Máquina de estados para la gestión del banco de capacitores.
 - Interfaz de comunicación con FPGA mediante SPI de alta velocidad.
 - Sistema de logging para registro de eventos y diagnóstico.
- **Firmware ESP32:**
 - Basado en ESP-IDF con componentes personalizados.
 - Implementación de cliente MQTT con TLS para comunicación segura.
 - Sistema OTA (Over-The-Air) para actualizaciones remotas.
 - Gestión de conectividad con failover automático entre Wi-Fi y 4G.
 - Buffer circular para almacenamiento temporal de datos en caso de pérdida de conectividad.

4.3.3. Desarrollo de software

El desarrollo del software incluyó componentes tanto en la nube como aplicaciones cliente:

- **Backend en la nube:**

- Implementación de funciones serverless en AWS Lambda.
- Sistema de ingesta de datos basado en AWS IoT Core.
- Procesamiento de datos en tiempo real con Amazon Kinesis.
- Almacenamiento de datos históricos en InfluxDB.
- APIs RESTful para acceso a datos y configuración.

- **Aplicación web:**

- Frontend desarrollado en React.js con Material-UI.
- Visualización de datos en tiempo real mediante WebSockets.
- Gráficos interactivos utilizando D3.js y Recharts.
- Sistema de alertas y notificaciones.
- Panel de administración para configuración remota.

- **Aplicación móvil:**

- Desarrollo multiplataforma utilizando React Native.
- Notificaciones push para alertas críticas.
- Visualización optimizada para dispositivos móviles.
- Funcionalidad offline para consulta de datos históricos.

4.3.4. Integración y ensamblaje

La integración de los componentes hardware y software se realizó siguiendo un enfoque incremental, validando cada subsistema antes de su incorporación al prototipo completo:

Figura 4.4: Prototipo del SACME ensamblado en gabinete industrial

- **Ensamblaje mecánico:**

- Gabinete NEMA 4X con protección IP65 para entornos industriales.
- Diseño modular con secciones separadas para control, potencia y conectividad.
- Sistema de ventilación forzada con filtros para entornos con polvo.
- Elementos calefactores controlados por termostato para prevenir condensación.

- **Integración eléctrica:**

- Cableado según normativa IEC 60204 para seguridad en maquinaria.
- Implementación de protecciones eléctricas en cascada.
- Fuente de alimentación ininterrumpida para el sistema de control.
- Aislamiento galvánico entre subsistemas para prevenir interferencias.

- **Integración de software:**

- Configuración de comunicación entre subsistemas.
- Calibración de sensores mediante patrones certificados.
- Configuración de parámetros iniciales del sistema.
- Verificación de conectividad con la plataforma en la nube.

4.4. Validación y pruebas

Para asegurar el correcto funcionamiento del sistema y su conformidad con las especificaciones técnicas, se diseñó y ejecutó un programa integral de pruebas que abarcó desde componentes individuales hasta el sistema completo en condiciones reales de operación.

4.4.1. Pruebas de laboratorio

Tipo de prueba	Metodología	Criterios de aceptación
Precisión de medición	Comparación con analizador de redes certificado Fluke 435 II	Error máximo $\pm 1\%$ para V, I, P, Q
Respuesta dinámica	Introducción de cambios de carga mediante banco de pruebas programable	Estabilización del FP en menos de 5 segundos
Pruebas de estrés térmico	Operación continua a plena carga en cámara climática (50°C)	Sin degradación de rendimiento ni activación de protecciones
Inmunidad EMI/EMC	Según normativas IEC 61000-4-2/3/4/5/6	Operación normal durante y después de pruebas
Durabilidad de conmutación	Ciclos continuos de conexión/-desconexión (100,000 ciclos)	Sin degradación en tiempos de respuesta ni contactos

Cuadro 4.2: Protocolo de pruebas de laboratorio

4.4.2. Pruebas de campo

El prototipo se instaló en tres escenarios industriales diferentes para validar su comportamiento en condiciones reales:

- **Planta manufacturera:** Caracterizada por motores de gran potencia y variadores de frecuencia, presentando alto contenido armónico.
- **Centro de procesamiento de datos:** Con cargas no lineales de fuentes conmutadas y sistemas de UPS, generando perfiles de consumo complejos.
- **Instalación comercial:** Con predominio de sistemas de climatización y equipos de oficina, presentando variaciones cíclicas en la demanda.

En cada instalación, se monitorearon los siguientes parámetros durante un período de 30 días:

- Factor de potencia antes y después de la corrección
- Potencia reactiva consumida
- Distorsión armónica total (THD)
- Temperatura de operación de los capacitores
- Número de operaciones de conmutación
- Disponibilidad del sistema y conectividad IoT

4.4.3. Verificación de conformidad

El sistema fue sometido a evaluación por laboratorios certificados para verificar su conformidad con las siguientes normativas:

- IEC 61010-1: Seguridad para equipos eléctricos de medida, control y uso en laboratorio
- IEC 61000-6-2: Compatibilidad electromagnética - Inmunidad para entornos industriales
- IEC 60831-1/2: Capacitores de potencia autorregenerables para sistemas AC

- UL 508A: Paneles de control industrial
- IEC 62053-22: Equipos de medida de la energía eléctrica - Clase 0.5S

4.4.4. Evaluación de rendimiento IoT

Se realizaron pruebas específicas para evaluar el desempeño de la conectividad IoT:

- Latencia en la transmisión de datos en diferentes condiciones de red
- Capacidad de recuperación ante pérdidas temporales de conectividad
- Consumo de ancho de banda en operación normal y durante eventos
- Efectividad de las actualizaciones OTA en diferentes escenarios
- Seguridad y resistencia a intentos de acceso no autorizado

4.5. Proceso de optimización

Con base en los resultados de las pruebas, se implementó un proceso iterativo de optimización para mejorar el rendimiento del sistema:

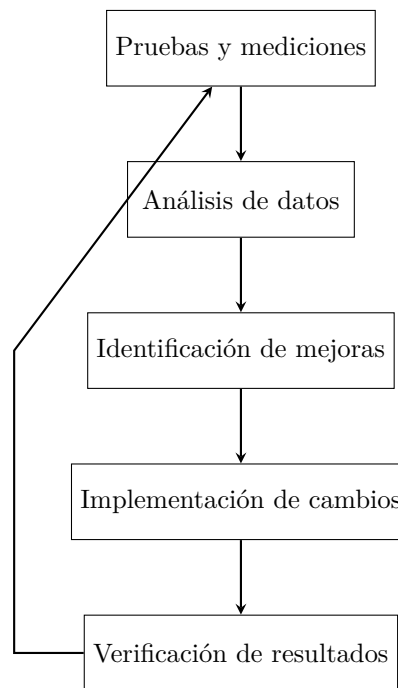


Figura 4.5: Ciclo de optimización iterativa del SACME

Las principales optimizaciones implementadas incluyeron:

- **Refinamiento de algoritmos:** Ajuste de parámetros de control PID basados en el análisis de datos de campo para mejorar la estabilidad y velocidad de respuesta.
- **Mejoras en la detección de armónicos:** Implementación de algoritmos wavelet para mejor identificación de componentes armónicas transitorias.
- **Optimización de conectividad:** Ajuste de intervalos de transmisión y compresión de datos para reducir consumo de ancho de banda manteniendo la fidelidad de la información.

- **Refinamiento térmico:** Mejora en los sistemas de disipación térmica basada en análisis de puntos calientes identificados durante pruebas de campo.
- **Mejoras en la interfaz de usuario:** Rediseño de dashboards con base en feedback de usuarios para mejorar la usabilidad y relevancia de la información presentada.

Cada ciclo de optimización fue documentado detalladamente, registrando las mejoras observadas y estableciendo una línea base para comparaciones futuras. Este proceso continuo permitió alcanzar un nivel de rendimiento que superó las especificaciones iniciales en varios aspectos clave.

Capítulo 5

Resultados y discusión

Se realizaron pruebas en distintas condiciones de carga. Los resultados mostraron una mejora en el factor de potencia del 0.75 al 0.98 en instalaciones con alto consumo de potencia reactiva.

El sistema mostró una respuesta eficiente en la corrección del factor de potencia. Sin embargo, en condiciones de variaciones bruscas de carga, se observó un ligero retraso en la activación de los capacitores.

Capítulo 6

Conclusiones

El sistema propuesto logra una corrección efectiva del factor de potencia, con la ventaja de monitoreo y control remoto a través de IoT. Como trabajo futuro, se sugiere optimizar la respuesta del sistema a cambios abruptos de carga.

Capítulo 7

Referencias