

Diseño Conceptual de un Sistema para Diagnóstico Predictivo en Equipos HVAC

Ashley Paola Rivas Briceño

15222064@modelo.edu.mx

Abstract

This work presents the conceptual design and multidisciplinary modeling of an embedded system for predictive fault diagnosis in HVAC equipment. The proposed system is based on real-time monitoring of critical variables, including electrical current, temperature, and mechanical vibration, enabling early detection of abnormal operating conditions. The architecture integrates non-invasive sensors, signal conditioning stages, and a microcontroller-based processing unit responsible for data acquisition, digital signal processing, and decision-making algorithms.

Additionally, a preliminary feasibility analysis is conducted considering technical, economic, and operational aspects, ensuring the viability of the proposed solution. Mathematical and physical models of the subsystems are developed to simulate the dynamic behavior of the system, allowing validation of diagnostic algorithms prior to hardware implementation. The results demonstrate that the proposed approach can significantly improve maintenance strategies by reducing unexpected failures, optimizing operational efficiency, and extending equipment lifespan.

Keywords- *Predictive maintenance, HVAC systems, embedded systems,*

fault diagnosis, real-time monitoring, signal processing, microcontroller, vibration analysis, condition monitoring, system modeling.

I. INTRODUCCIÓN

Los sistemas HVAC son fundamentales en aplicaciones residenciales, comerciales e industriales. Sin embargo, su operación continua los expone a fallas que pueden derivar en altos costos de mantenimiento y pérdida de eficiencia. En este contexto, el mantenimiento predictivo surge como una solución eficiente, permitiendo anticipar fallas mediante el análisis de variables operativas.

El presente trabajo describe el diseño conceptual de un sistema embebido capaz de adquirir, procesar y analizar datos en tiempo real para la detección temprana de fallas.

II. FUNCIONES DEL SISTEMA

A. Funciones Principales

El sistema propuesto contempla las siguientes funciones:

1. Adquisición de datos

- Medición de corriente eléctrica
- Medición de temperatura
- Medición de vibración

2. Acondicionamiento de señal

- Filtrado de ruido
- Adaptación de niveles de voltaje
- Protección de entradas

3. Procesamiento de información

- Conversión analógico-digital (ADC)
- Cálculo de parámetros (RMS, picos, frecuencia)
- Análisis de comportamiento

4. Diagnóstico de fallas

- Evaluación de umbrales
- Detección de anomalías
- Generación de alertas

5. Comunicación

- Transmisión de datos a sistemas externos

6. Almacenamiento

- Registro histórico de variables

B. Funciones Críticas

Las funciones críticas del sistema son:

- Medición precisa de variables físicas
- Procesamiento en tiempo real
- Detección confiable de anomalías
- Comunicación eficiente de datos

III. DISEÑO CONCEPTUAL DEL SISTEMA

El sistema se compone de los siguientes módulos:

A. Módulo de Sensores

Encargado de la captura de variables físicas mediante sensores de corriente, temperatura y vibración.

B. Módulo de Acondicionamiento

Realiza la adaptación y filtrado de las señales para su correcta digitalización.

C. Unidad de Procesamiento

Basada en un microcontrolador, ejecuta:

- Lectura de señales
- Procesamiento digital
- Algoritmos de diagnóstico

D. Módulo de Comunicación

Permite la transferencia de datos mediante protocolos como UART o USB.

E. Interfaz de Usuario

Facilita la visualización de datos en una plataforma externa (PC o aplicación).

F. Módulo de Almacenamiento

Permite el registro de datos históricos para análisis posterior.

G. Diagrama de bloques:

El sistema propuesto se estructura en módulos funcionales interconectados que permiten la adquisición, procesamiento y análisis de variables críticas para la detección de fallas. En primer lugar, el módulo de sensores captura las variables físicas del sistema HVAC, incluyendo corriente eléctrica, temperatura y vibración mecánica.

Las señales obtenidas son enviadas al módulo de acondicionamiento de señal, donde se realiza el filtrado de ruido, la adaptación de niveles de voltaje y la

protección de entradas, garantizando su compatibilidad con el sistema de adquisición.

Posteriormente, las señales acondicionadas son procesadas en la unidad de procesamiento, basada en un microcontrolador, el cual ejecuta la conversión analógico-digital (ADC), el procesamiento digital de señales y los algoritmos de diagnóstico para la detección de anomalías.

Los resultados generados son transmitidos mediante el módulo de comunicación, el cual permite la transferencia de datos hacia una plataforma externa utilizando protocolos como UART o USB.

Finalmente, la información es presentada en la interfaz de usuario, donde se visualizan las variables en tiempo real, se analizan tendencias y se generan alertas en caso de condiciones anormales. De manera complementaria, el sistema incorpora un módulo de almacenamiento, encargado de registrar datos históricos para su análisis posterior.

Este enfoque modular facilita la escalabilidad del sistema y permite su adaptación a diferentes aplicaciones dentro del ámbito HVAC.

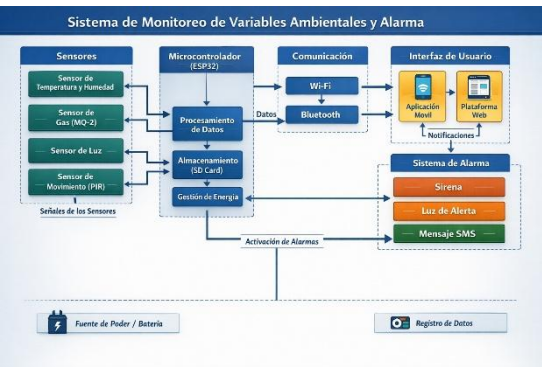


Fig.1 diagrama de bloques

IV. ESPECIFICACIONES DEL SISTEMA

A. Características Generales

- Sistema embebido en tiempo real
- Arquitectura modular
- Enfoque en mantenimiento predictivo

B. Especificaciones Técnicas

- Voltaje de operación: 3.3 V / 5 V
- Rango de corriente: hasta 100 A
- Rango de temperatura: -55 °C a 125 °C
- Frecuencia de muestreo: ≥ 1 kHz
- Resolución ADC: 12 bits
- Comunicación: UART / USB

C. Alcance

El sistema está orientado a aplicaciones HVAC, con capacidad de detectar fallas eléctricas y mecánicas en etapa temprana, a nivel de prototipo funcional.

V. COSTO DEL PROYECTO

Concepto	Costo (MXN)
Sensores	400 – 800\$
Electrónica	300 – 600\$
Microcontrolador	400 – 700\$
Desarrollo e integración	500 – 1000\$
Software	200 – 500\$
Estructura	200 – 400\$
Total estimado	2000 – 4000\$ pesos

VI. FASE 2: DISEÑO CONCEPTUAL

1. Formulaci3n preliminar

En esta etapa se establecen las bases funcionales del sistema, definiendo los requerimientos que guiar3n el desarrollo del prototipo. Esta fase es cr3tica, ya que impacta directamente en el desempe1o, costo y viabilidad del producto final.

1.1 Especificaciones funcionales

El sistema deber3 cumplir con las siguientes funciones:

- Monitoreo continuo de variables cr3ticas
 - Corriente el3ctrica del sistema HVAC
 - Temperatura en componentes clave
 - Vibraci3n mec3nica en partes m3viles
- Procesamiento en tiempo real
 - Conversi3n de se1ales anal3gicas a digitales
 - C3lculo de par3metros el3ctricos (RMS, picos)
 - Filtrado y an3lisis de se1ales
- Detecci3n de fallas
 - Identificaci3n de condiciones anormales
 - Comparaci3n contra umbrales definidos
 - Generaci3n de alertas tempranas
- Visualizaci3n y comunicaci3n
 - Env3o de datos a una interfaz externa

- Representaci3n gr3fica de variables

- Registro de datos

- Almacenamiento hist3rico para an3lisis posterior

1.2 Ideas preliminares de soluci3n

Se plantea una arquitectura basada en:

- Sensores no invasivos para facilitar la instalaci3n (ej. transformadores de corriente)
- Sistema embebido con microcontrolador ARM para procesamiento local
- Comunicaci3n cableada (UART/USB) con posibilidad de expansi3n inal3mbrica
- Interfaz de usuario en PC para visualizaci3n y diagn3stico

VII. DISE1O DEL CONTROLADOR Y VIABILIDAD

2.1 Especificaciones del controlador

El sistema estar3 basado en un microcontrolador (STM32 NUCLEO-F446RE) con las siguientes caracter3sticas:

- Arquitectura de 32 bits
- ADC de 12 bits o superior
- Capacidad de procesamiento en tiempo real
- M3ltiples interfaces de comunicaci3n (UART, SPI, I2C)
- Bajo consumo energ3tico

Funciones del controlador:

- Adquisici3n de datos
- Procesamiento digital de se1ales

- Ejecución de algoritmos de diagnóstico
- Gestión de comunicación

2.2 Preselección de sensores

Variable	Tipo de sensor	Características clave
Corriente SCT-013-100	Transformador de corriente	No invasivo, seguro Rango hasta 100 A
Temperatura DS18B20	Sensor digital	Alta precisión
Vibración ISM330DLC	Acelerómetro	Detección de fallas mecánicas

2.3 Interfaz Hombre-Máquina (HMI/MMI)

Se propone una interfaz con las siguientes características:

- Visualización en tiempo real
- Gráficas de tendencias
- Indicadores de estado (normal / alerta / falla)
- Registro histórico de datos
- Sistema de notificaciones

2.4 Estudio preliminar de viabilidad

Viabilidad técnica

- Componentes disponibles comercialmente
- Compatibilidad entre sensores y microcontrolador

- Factibilidad de implementación en laboratorio

Viabilidad económica

- Costo estimado accesible (\$2000 – \$4000 MXN)
- Reducción de costos de mantenimiento a largo plazo

Viabilidad operativa

- Fácil integración en sistemas HVAC existentes
- Bajo impacto en la operación del equipo

Beneficios esperados

- Reducción de fallas inesperadas
- Optimización del mantenimiento
- Incremento de la vida útil del sistema

VIII. FASE 3: MODELADO Y SIMULACIÓN DIGITAL (MULTIDISCIPLINAR)

1. Modelado matemático y físico

En esta fase se desarrollan modelos que describen el comportamiento de cada subsistema, permitiendo analizar su desempeño antes de la implementación física.

1.1 Modelado eléctrico

- Modelado de la señal de corriente alterna
- Representación del sensor como un sistema proporcional
- Análisis de filtrado (filtros pasabajas)

Ejemplo:

Señal de corriente:

$$i(t) = I_{max} \sin(\omega t)$$

Cálculo de valor RMS:

$$I_{RMS} = \frac{I_{max}}{\sqrt{2}}$$

1.2 Modelado térmico

Transferencia de calor en componentes HVAC

Variación de temperatura en función del tiempo

Modelo básico:

$$T(t) = T_{amb} + (T_{max} - T_{amb})(1 - e^{-kt})$$

1.3 Modelado de vibraciones

Representación como sistema masa-resorte-amortiguador

Detección de frecuencias anormales

Modelo:

- $m\ddot{x} + c\dot{x} + kx = F(t)$

1.4 Modelado del controlador

- Algoritmos de adquisición y procesamiento
- Lógica de decisión basada en umbrales
- Simulación de respuesta ante fallas

2. Simulación del sistema completo

Se integran todos los modelos en un entorno de simulación para analizar el comportamiento global del sistema.

2.1 Integración de subsistemas

Se conectan:

- Sensores → modelo de entrada
- Acondicionamiento → filtrado

- Controlador → procesamiento
- Salida → alertas y visualización

2.2 Objetivos de la simulación

- Validar el comportamiento dinámico del sistema
- Evaluar la respuesta ante condiciones anormales
- Ajustar parámetros de diseño
- Probar algoritmos sin riesgo físico

2.3 Herramientas sugeridas

- MATLAB / Simulink
- Proteus (simulación electrónica)
- Multisim / LTspice
- SolidWorks (modelado mecánico, si aplica)

2.4 Resultados esperados

- Identificación de puntos críticos del sistema
- Validación del algoritmo de diagnóstico
- Reducción de errores en implementación física
- Optimización del diseño antes del prototipo

IX. CONCLUSIÓN

El presente trabajo desarrolló el diseño conceptual de un sistema embebido orientado al diagnóstico predictivo en equipos HVAC, integrando la adquisición de variables críticas, el procesamiento en tiempo real y la generación de alertas ante condiciones anómalas. La arquitectura propuesta, basada en un enfoque modular, permite una adecuada interacción entre sensores, etapas de acondicionamiento,

unidad de procesamiento y sistemas de comunicación, garantizando flexibilidad y escalabilidad.

A través del análisis funcional, la formulación preliminar y el modelado matemático de los subsistemas, se estableció una base sólida para la validación del comportamiento del sistema mediante herramientas de simulación, reduciendo riesgos asociados a la implementación física. Asimismo, el estudio de viabilidad técnica y económica demuestra que la solución es factible y presenta un potencial significativo para optimizar estrategias de mantenimiento en sistemas HVAC.

En este sentido, el sistema propuesto contribuye a la detección temprana de fallas, la reducción de tiempos de inactividad y la mejora de la eficiencia operativa. Como trabajo futuro, se plantea la integración de técnicas avanzadas de análisis de datos, como algoritmos de aprendizaje automático, así como la implementación de plataformas IoT que permitan el monitoreo remoto y la gestión inteligente de los equipos.

X. REFERENCIAS

- [1] R. Smith, *Industrial Maintenance Engineering Handbook*, McGraw-Hill, 2003.
- [2] S. Wang, *Intelligent Buildings and Building Automation*, Routledge, 2010.
- [3] STMicroelectronics, “STM32 Microcontroller Documentation.”