

Embedded Artificial Intelligence System for High Impedance Fault Detection in Distribution Feeders: A Case Study from La Libertad Substation

PROBLEMA

Las fallas de alta impedancia (HIF) en las redes de distribución de media tensión representan un desafío persistente para los sistemas de protección debido a su baja magnitud de corriente de falla y su comportamiento no lineal. Estas fallas a menudo no logran activar los relés de sobrecorriente convencionales, lo que puede causar riesgos de seguridad, daños no detectados en los equipos y condiciones de falla prolongadas. Los métodos tradicionales basados en señales (como el análisis de armónicos o reconocimiento de patrones) tienden a tener una robustez limitada bajo condiciones variables de carga y de superficie.

OBJETIVO GENERAL

Presentar una metodología estructurada para la simulación, el entrenamiento y la implementación de modelos basados en Inteligencia Artificial (IA) para la detección de fallas de alta impedancia en sistemas de distribución.

PROPUESTA

Modelar un alimentador de distribución realista de la subestación "La Libertad" en Ecuador utilizando el software MATLAB/SIMULINK.

Simular eventos HIF bajo diferentes condiciones de superficies no conductoras (como ramas de árboles, pasto seco, arena húmeda) utilizando el modelo de arco de Emanuel.

Entrenar y comparar múltiples modelos basados en IA: Perceptrón Multicapa (MLP), Redes Neuronales Convolucionales (CNN) y Máquinas de Vectores de Soporte (SVM).

Desplegar los modelos entrenados en una plataforma embebida (Raspberry Pi 4) y evaluar su rendimiento utilizando señales oscilográficas reales obtenidas de relés de protección.

RESULTADOS

El modelo basado en CNN (arquitectura de 12 capas) logró la precisión de detección más alta con un 99.98% en el conjunto de datos generado y un tiempo de respuesta de 40 ms.

En la validación con datos reales de oscilografía, el modelo CNN de 12 capas fue el único que clasificó correctamente tanto las condiciones normales como los eventos de falla, logrando un éxito del 100% en esos datos (y un 95% de precisión general en condiciones del mundo real).

El modelo basado en MLP alcanzó una precisión del 95.03% y logró reducir el tiempo de inferencia a 16.9 ms.

El modelo basado en SVM alcanzó una precisión del 96.3% con una latencia de inferencia de 12.5 ms, aunque no logró detectar la falla en la validación con datos oscilográficos reales.

CONCLUSIONES

- El modelo basado en CNN alcanzó una precisión del 99.98% y un tiempo de inferencia de 40 ms, lo que confirma su efectividad para la clasificación de fallas en tiempo real.
- Al realizar pruebas con datos reales de oscilografía de relés, los modelos alcanzaron niveles de precisión de hasta el 95%, exhibiendo una generalización robusta frente a escenarios de falla no vistos previamente.

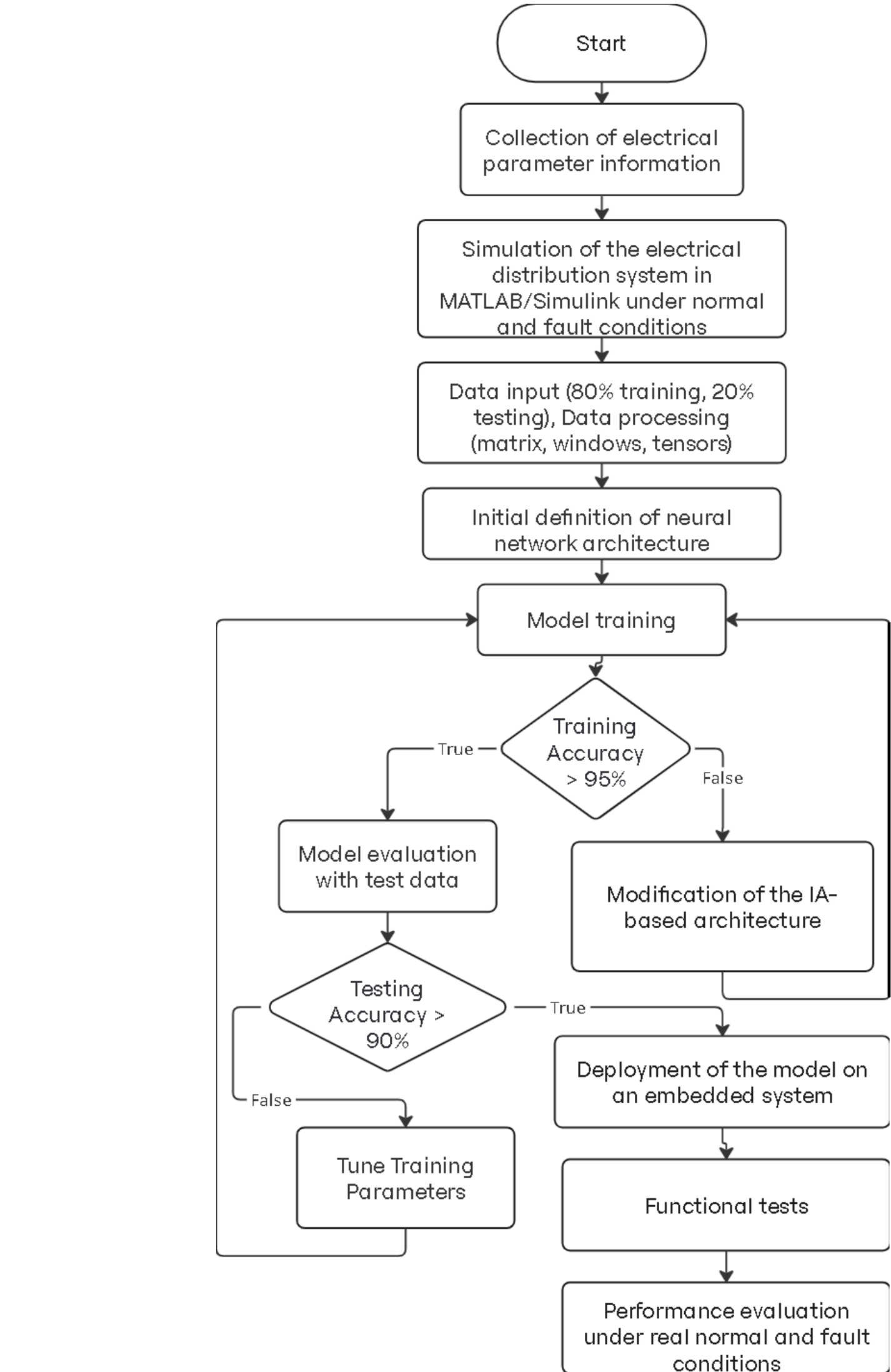


Fig. 1: Diagrama de flujo de la metodología propuesta



Fig. 2: Comparación de métricas de los modelos entrenados

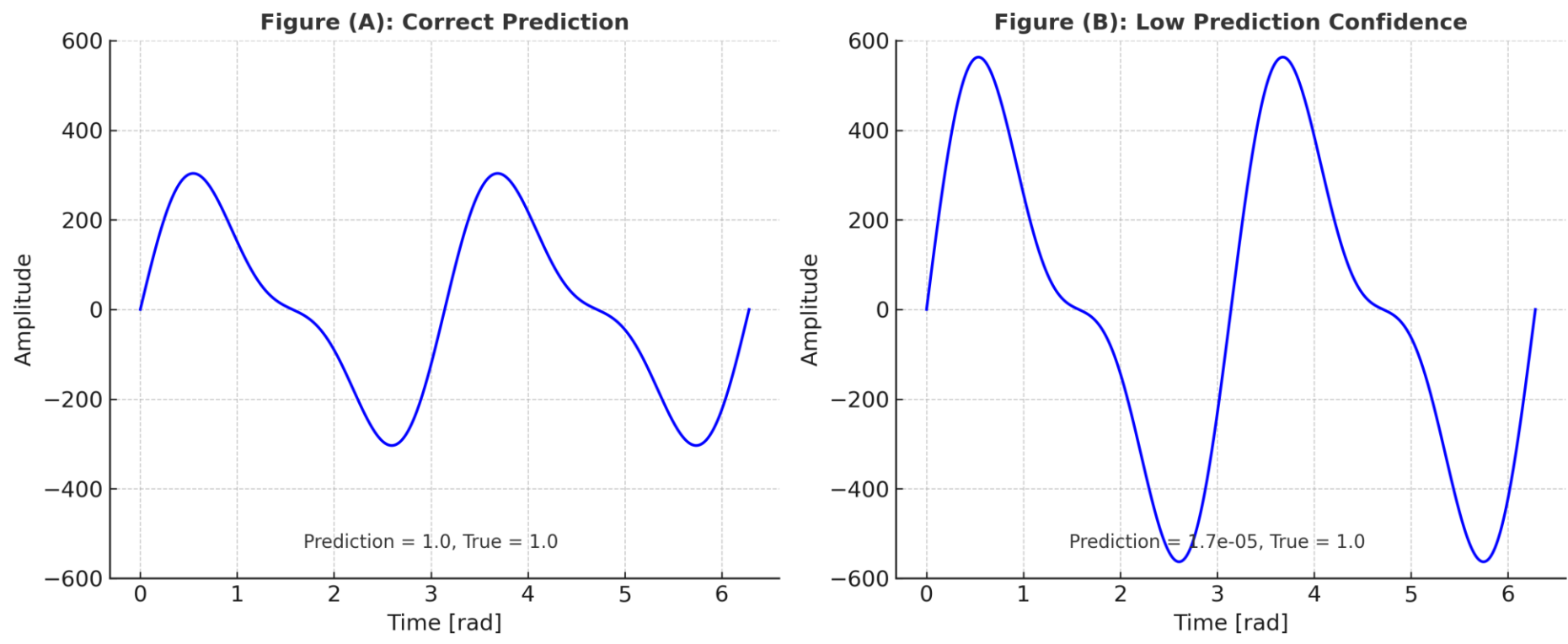


Fig. 3: Predicciones de falla de alta impedancia

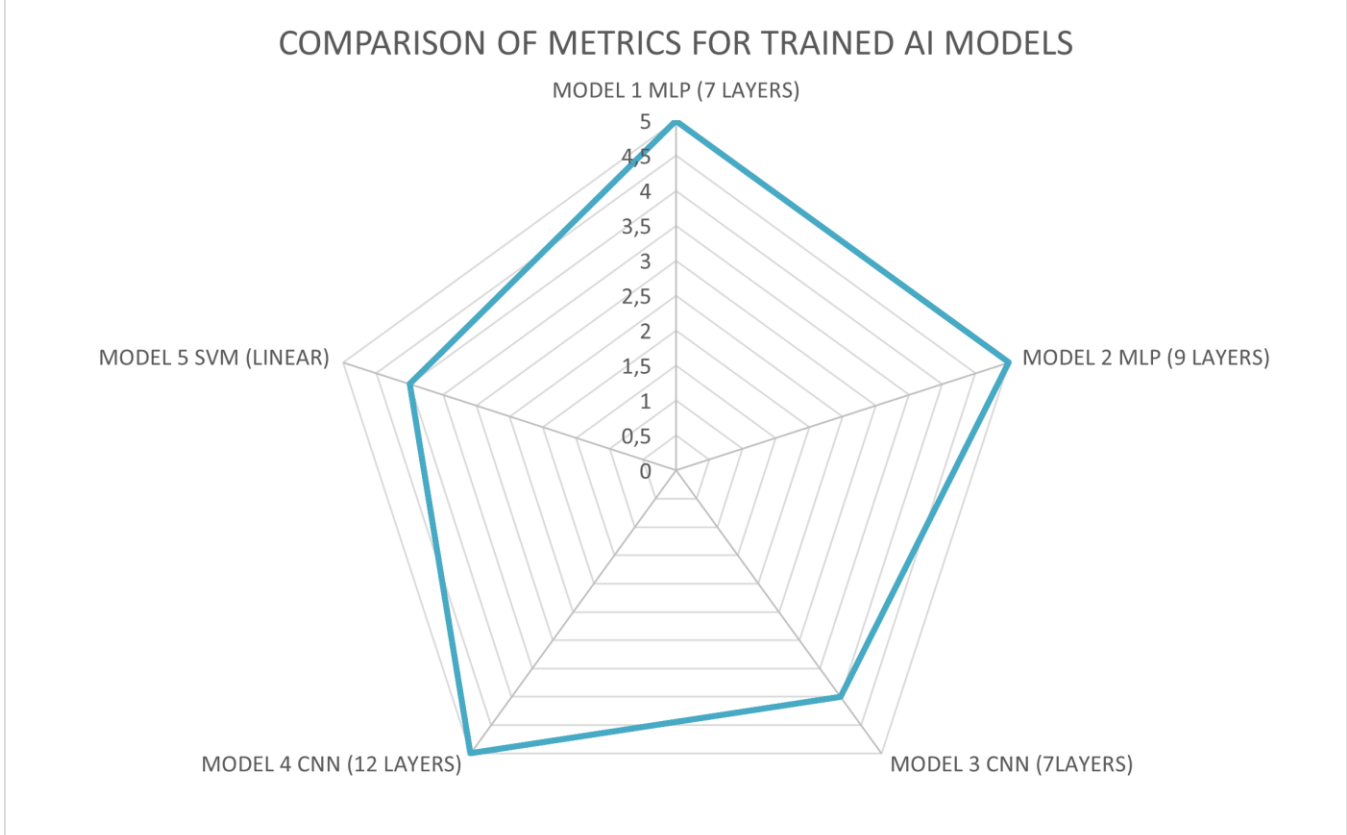


Fig. 4: Comparación de los métodos empleados.

RECONOCIMIENTOS

- Extendemos nuestro sincero reconocimiento a Sara Guerrero, de la Facultad de Arquitectura y Diseño de la UEES, y a Ronald Suarez, de la Facultad de Ingeniería Eléctrica y Ciencias de la Computación de la Universidad de Santa Elena, por ser coautores de este artículo científico y por su importante contribución técnica e intelectual en este trabajo.