



Summit

Energy Automation

20
24



¡Eficiencia energética!



Conocimiento & Conexiones



Summit
Energy Automation

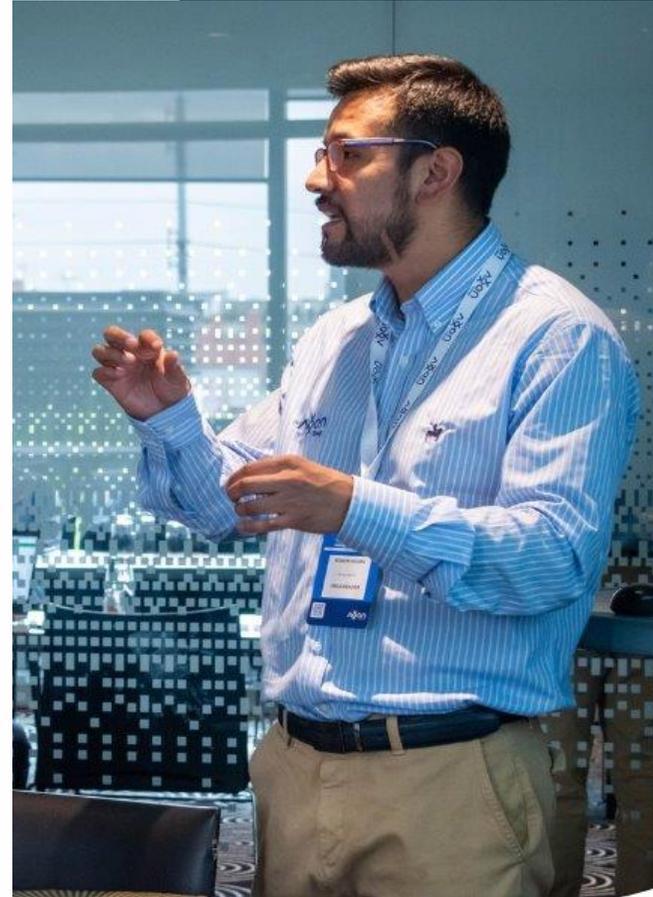
20
24

Análisis de fallas en sistemas de protección

Edison Guama

Magíster en ingeniería eléctrica

Conocimientos en sistemas de protección, inteligencia artificial aplicado al análisis de fallas, simulación de sistemas de potencia, optimización y planeamiento en sistemas eléctricos. Servicios y protocolos de comunicación del estándar IEC61850 para la gestión de la información. Lenguajes de programación C#, Python, C++, JavaScript.



TEMARIO

1. Introducción fallas en sistemas de potencia

- Tipos de fallas
- Fuentes de información

2. Localización de fallas en sistemas de potencia

- Reactancia simple
- 2 extremos de Takagi
- Sin parámetros de línea

3. Estimación de impedancia de secuencia cero y resistencia de falla en líneas de transmisión.

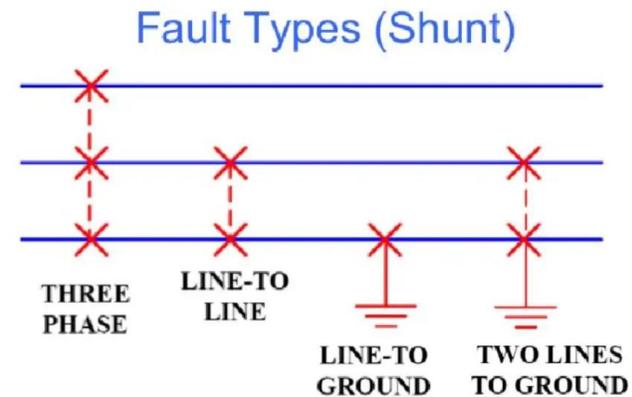
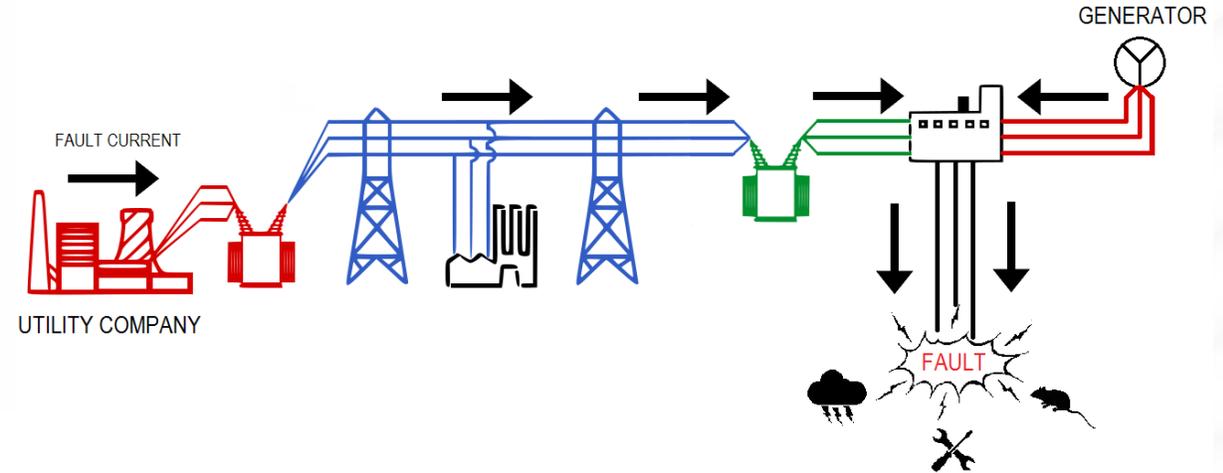
4. Clasificación de causa de falla mediante inteligencia artificial.

5. Tutorial integración de IEDs a Axon Comtrade

Introducción fallas en sistemas de potencia

Condiciones anormales en los sistemas eléctricos pueden generar fallas en cualquier elemento.

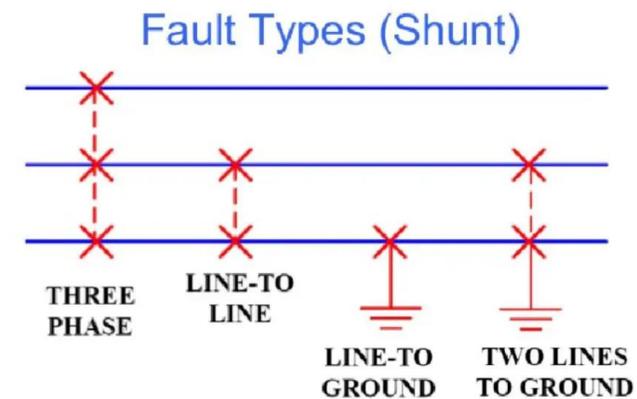
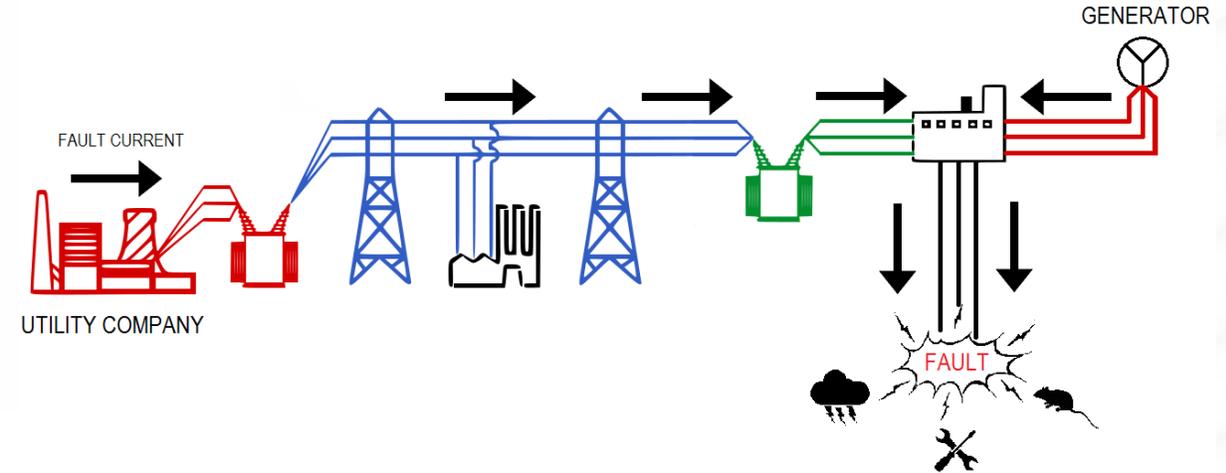
Los dispositivos de protección ayudan a mitigar el impacto cuando se detecta una perturbación. Sin embargo, su operación puede fallar.



Introducción fallas en sistemas de potencia

Tipos de falla:

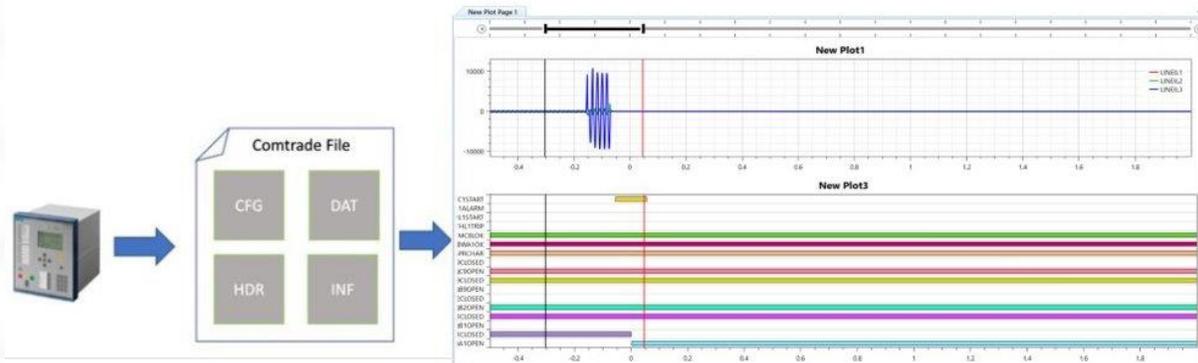
- Cortocircuitos(shunt)
- Deterioro de aislamiento en transformadores por sobrevoltajes
- Daños a estructuras de las líneas de transmisión
- Descargas atmosféricas
- Ruptura del conductor
- Oscilaciones de potencia
- Contacto con objeto



Fuentes de información

COMTRADE

Es un estándar internacional que define un formato para archivos que contienen registros oscilográficos y datos de eventos del sistema eléctrico.



Secuencia de eventos

44:02:23:13.0 1871	Line 1:27 Undervolt.-3ph 1:Definite-T 1	Health	alarm
44:02:23:13.0 1870	Line 1:27 Undervolt.-3ph 1:General	Current crit. fulf.	false
44:02:23:13.0 1869	Line 1:50N/51N OC-gnd-A1:Inverse-T 1	Inactive	true
44:02:23:13.0 1868	Line 1:50N/51N OC-gnd-A1:Inverse-T 1	Health	alarm
44:02:23:13.0 1867	Line 1:50/51 OC-3ph-A1:Definite-T 1	Health	alarm
44:02:23:13.0 1866	Line 1:50/51 OC-3ph-A1:Inverse-T 1	Health	alarm
44:02:23:13.0 1865	Line 1:General	Health	alarm
44:02:23:13.0 1864	Line 1:21 Distance prot. 1:General	Health	alarm
44:02:23:13.0 1863	Line 1:Mes.v.fail.det	Inactive	true
44:02:23:13.0 1862	Line 1:Mes.v.fail.det	Health	alarm
44:02:23:13.0 1861	Alarm handling	Group warning	true
44:02:23:13.0 1860	Alarm handling	>Group Warning	true
44:02:23:13.0 1859	Power system:TI 21 3P:Supv.ADC sum I	Failure	true

Ajustes

122	W1CT	= Y	W2CT	= Y
123	CTR1	= 600	CTR2	= 120
124	MVA	= 50.0	ICOM	= Y
125	W1CTC	= 1	W2CTC	= 12
126	VWDG1	= 12.00	VWDG2	= 69.00
127	PTR	= 100	COMPANG	= 0
128				
129	TAP1	= 4.01	TAP2	= 3.49
130	O87P	= 0.30	SLP1	= 40
131	U87P	= 10.0	PCT2	= 20
132	TH5P	= OFF	THBL	= Y

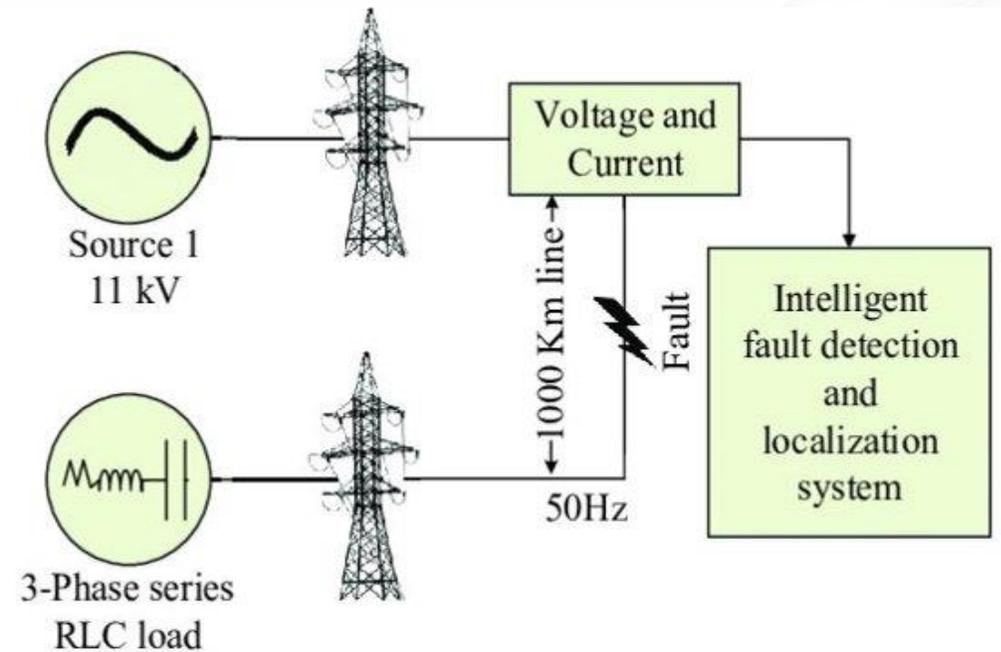
Localización de fallas en líneas de transmisión

Se utiliza las señales de corriente y voltaje capturada por algún dispositivos o IED cuando ocurre la falla.

El objetivo es estimar la impedancia aparente entre el dispositivo y la falla de cortocircuito sobre la línea de transmisión.

Algunas de las causas que pueden afectar la estimación de estos métodos son:

- Condiciones de carga
- Resistencia de falla
- Saturación CT
- Offset DC
- Líneas en derivación
- Sistemas de distribución

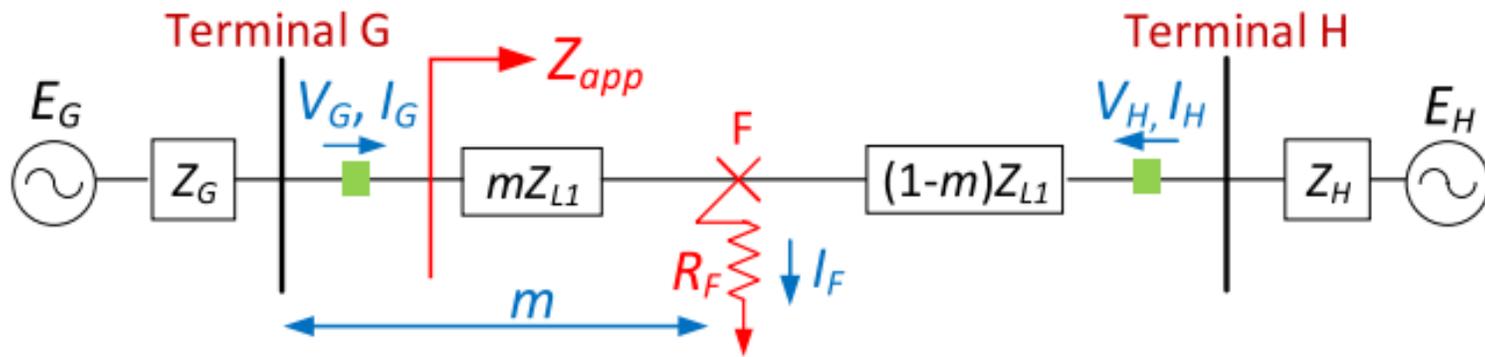


Localización de fallas en líneas de transmisión

Utilizando la ley de Kirchoff, se calcula la caída de voltaje en la terminal G.

La forma tomada por V_G e I_G depende del tipo de falla.

Incógnitas m , R_f , I_f .



$$V_G = mZ_{L1}I_G + R_F I_F$$

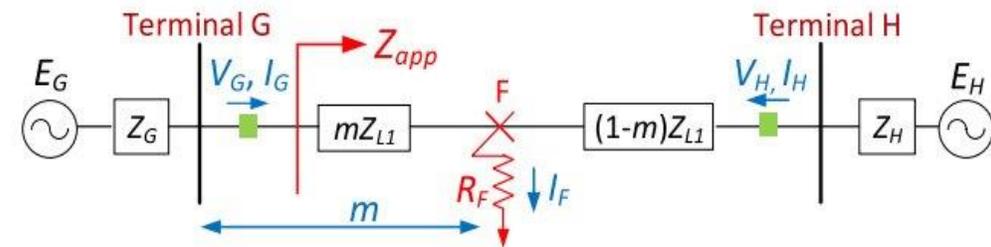
$$Z_{app} = \frac{V_G}{I_G} = mZ_{L1} + R_F \left(\frac{I_F}{I_G} \right)$$

Localización de fallas en líneas de transmisión

La forma tomada por V_G e I_G depende del tipo de falla.

Fault Type	V_G	I_G	ΔI_G
A-G	V_{AF}	$I_{AF} + kI_{G0}$	$I_{AF} - I_{Apre}$
B-G	V_{BF}	$I_{BF} + kI_{G0}$	$I_{BF} - I_{Bpre}$
C-G	V_{CF}	$I_{CF} + kI_{G0}$	$I_{CF} - I_{Cpre}$
AB, AB-G, ABC	$V_{AF} - V_{BF}$	$I_{AF} - I_{BF}$	$\begin{pmatrix} I_{AF} - I_{Apre} \\ I_{BF} - I_{Bpre} \end{pmatrix}$
BC, BC-G, ABC	$V_{BF} - V_{CF}$	$I_{BF} - I_{CF}$	$\begin{pmatrix} I_{BF} - I_{Bpre} \\ I_{CF} - I_{Cpre} \end{pmatrix}$
CA, CA-G, ABC	$V_{CF} - V_{AF}$	$I_{CF} - I_{AF}$	$\begin{pmatrix} I_{CF} - I_{Cpre} \\ I_{AF} - I_{Apre} \end{pmatrix}$

where $k = \frac{Z_{L0}}{Z_{L1}} - 1$

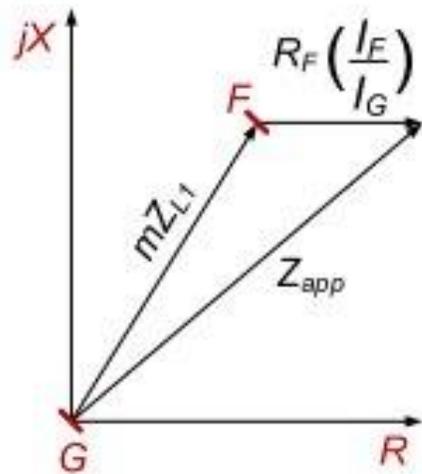


Localización de fallas en líneas de transmisión

REACTANCIA SIMPLE.

Este método toma ventaja al suponer que la resistencia de falla es puramente resistiva.

Además, asume que las corrientes I_f e I_g están en fase.



$$m = \frac{\text{imag} \left(\frac{V_G}{I_G} \right)}{\text{imag} (Z_{L1})}$$

$$Z_{app} = \frac{V_G}{I_G} = mZ_{L1} + R_F \left(\frac{I_F}{I_G} \right)$$

Localización de fallas en líneas de transmisión

REACTANCIA SIMPLE.

- Computacionalmente simple
- Requiere información mínima
- Severamente afectada si ante una condición de carga en particular existe un desfase entre I_f e I_g .
- La estimación se afecta si el sistema es no homogéneo
-

$$m = \frac{\text{imag} \left(\frac{V_G}{I_G} \right)}{\text{imag} (Z_{L1})}$$

$$Z_{app} = \frac{V_G}{I_G} = mZ_{L1} + R_F \left(\frac{I_F}{I_G} \right)$$

Localización de fallas en líneas de transmisión

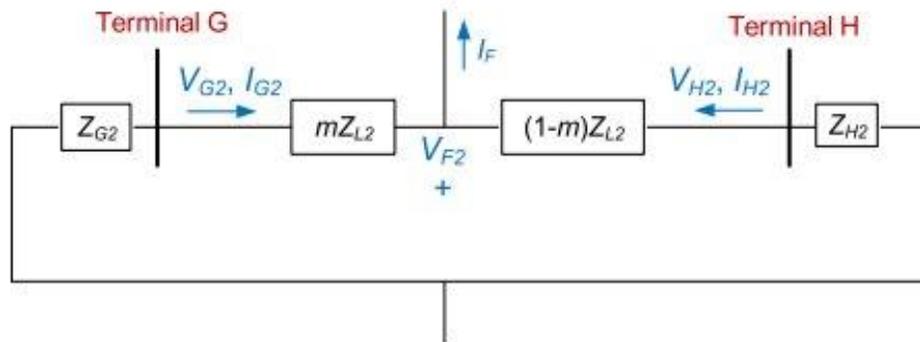
MÉTODO DE 2 EXTREMOS DE TAKAGI

- Este método requiere las medidas de corriente y voltaje de ambos extremos.
- Medidas debe estar sincronizadas.
- Estimación no es afectada por corriente de carga, sistema no homogéneo, resistencia de falla.
- No se requiere identificar el tipo de falla.

$$\text{Terminal G: } V_{F2} = V_{G2} - mZ_{L2}I_{G2}$$

$$\text{Terminal H: } V_{F2} = V_{H2} - (1 - m)Z_{L2}I_{H2}$$

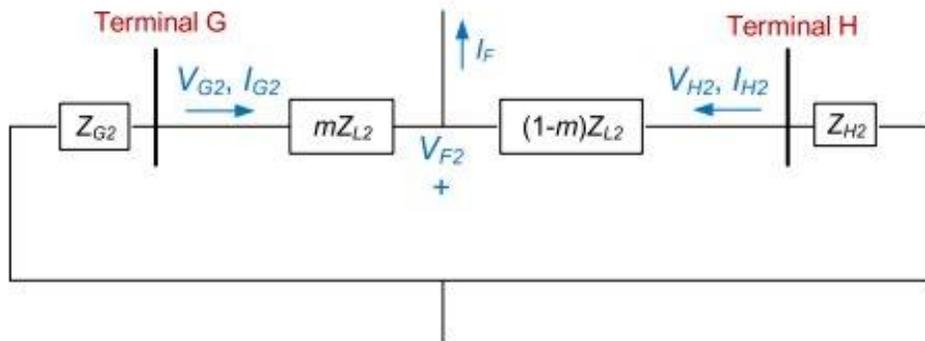
$$m = \frac{V_{G2} - V_{H2} + Z_{L2}I_{H2}}{(I_{G2} + I_{H2})Z_{L2}}$$



Localización de fallas en líneas de transmisión

Compensación de fase para señales desincronizadas

- Muchas veces las medidas de ambos extremos se encuentran en desfase por problemas del gps.
- Se puede estimar el error en la sincronización.
-



$$\text{Terminal G : } V_{F2} = V_{G2}e^{j\delta} - mZ_{L2}I_{G2}e^{j\delta} \quad (8)$$

$$\text{Terminal H : } V_{F2} = V_{H2} - (1-m)Z_{L2}I_{H2} \quad (9)$$

$$e^{j\delta} = \frac{V_{H2} - (1-m)Z_{L2}I_{H2}}{V_{G2} - mZ_{L2}I_{G2}}$$

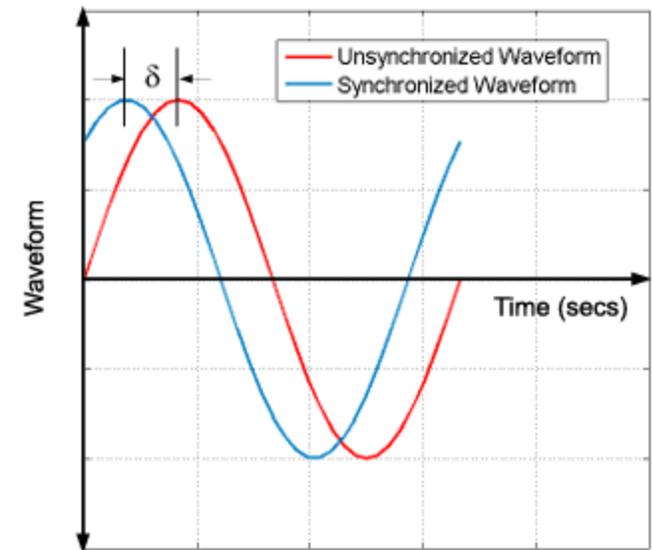
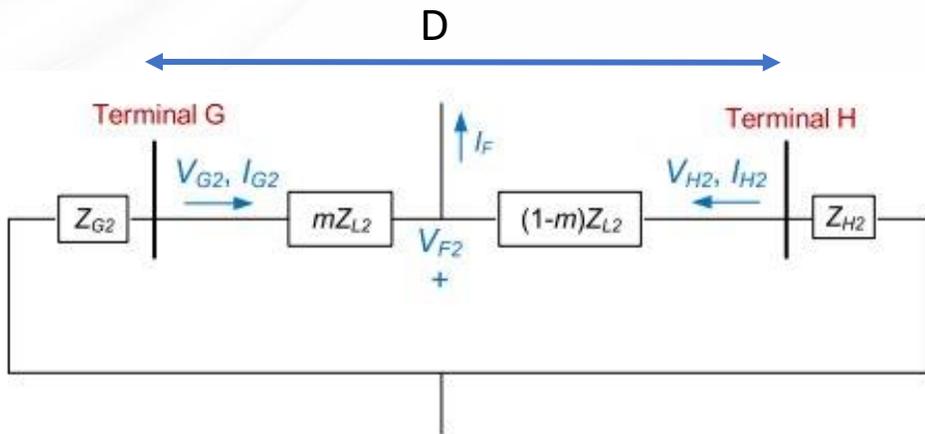


Fig. 5: Unsynchronized waveform phase-shifted with respect to the synchronized waveform.

Localización de fallas en líneas de transmisión

Localización de fallas sin parámetros de línea

- Este método requiere las medidas de corriente y voltaje de ambos extremos.
- Para fallas monofásicas a tierra pero se puede extender a los otros tipos de falla.
- Medidas sincronizadas



Mediante Kirchoff se construyen las ecuaciones para la red de secuencia positiva y negativa

$$V_{G1}\mathcal{E} - Z_{l1}mI_{G1}\mathcal{E} = V_{H1} - Z_{l1}(1 - m)I_{H1}$$

$$V_{G2}\mathcal{E} - Z_{l2}mI_{G2}\mathcal{E} = V_{H2} - Z_{l2}(1 - m)I_{H2}$$

Se determina que las incógnitas son $Z_{l1}m$ Y $Z_{l1}(1 - m)$ que se puede resolver de la siguiente forma:

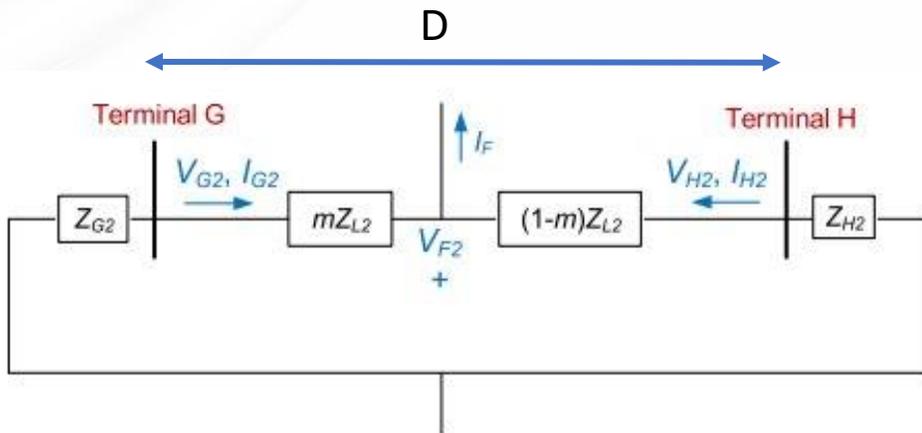
$$Z_{l1}m = \frac{(V_{G1}\mathcal{E} - V_{H1})I_{H2} - (V_{G2}\mathcal{E} - V_{H2})I_{H1}}{(I_{G1}I_{H2} - I_{G2}I_{H1})\mathcal{E}}$$

$$Z_{l1}(1 - m) = \frac{(V_{G1}\mathcal{E} - V_{H1})I_{G2} - (V_{G2}\mathcal{E} - V_{H2})I_{G1}}{I_{G1}I_{H2} - I_{G2}I_{H1}}$$

Localización de fallas en líneas de transmisión

Localización de fallas sin parámetros de línea

- Este método requiere las medidas de corriente y voltaje de ambos extremos.
- Para fallas monofásicas a tierra pero se puede extender a los otros tipos de falla.
- Medidas sincronizadas



La distancia de falla se puede expresar como:

$$m\% = \frac{Z_L m}{Z_L m + Z_L (1 - m)} \times 100$$

$$m\% = \frac{Y_1}{Y_1 + Y_2} \times 100$$

Finalmente, la distancia de falla se puede estimar mediante:

$$m\% = \frac{(V_{G1} - V_{H1})I_{H2} - (V_{G2} - V_{H2})I_{H1}}{(V_{G1} - V_{H1})(I_{G2} + I_{H2}) - (V_{G2} - V_{H2})(I_{G1} + I_{H1})}$$

Estimación de impedancia de secuencia cero para líneas de transmisión

- Generalmente es un parámetro que se estima con base en simulaciones mediante las ecuaciones de Carson.
- Se debe escribir en los ajustes del relé por parte de los ingenieros de protecciones.
- Importante para las funciones de protección de distancia y direccionales.
- Medición difícil dado que se requiere la resistividad de la tierra.
- Típicamente un valor de $100\Omega\text{-m}$ es aceptable.

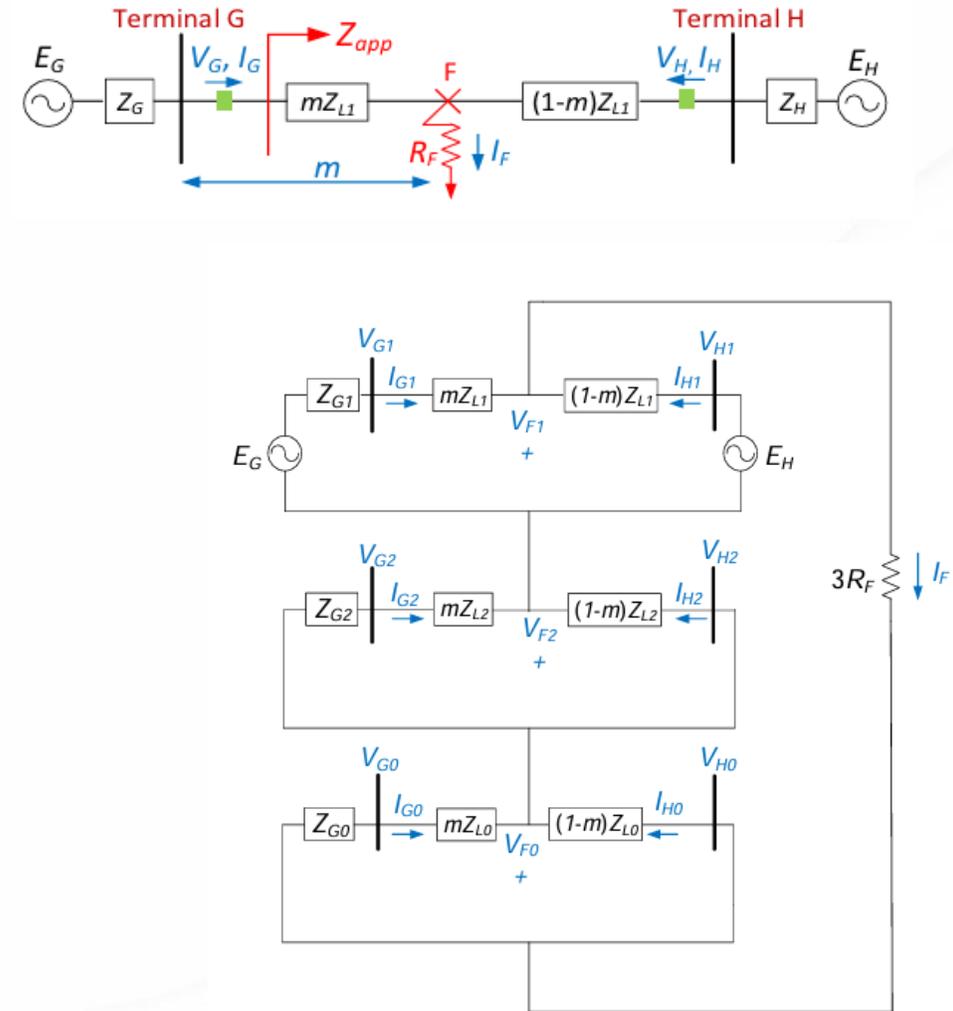
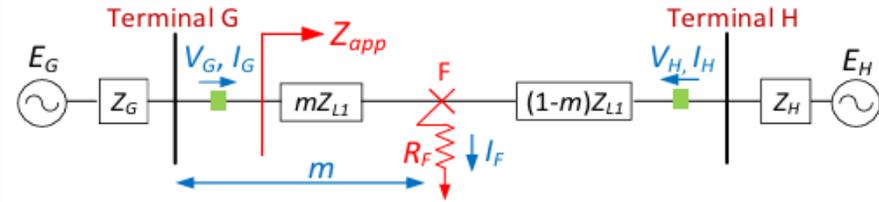


Fig. 3: Sequence network during a single line-to-ground fault.

Estimación de impedancia de secuencia cero para líneas de transmisión

- Generalmente es un parámetro que se estima con base en simulaciones mediante las ecuaciones de Carson.
- Se debe escribir en los ajustes del relé por parte de los ingenieros de protecciones.
- Importante para las funciones de protección de distancia y direccionales.
- Medición difícil dado que se requiere la resistividad de la tierra.
- Típicamente un valor de $100\Omega\text{-m}$ es aceptable.



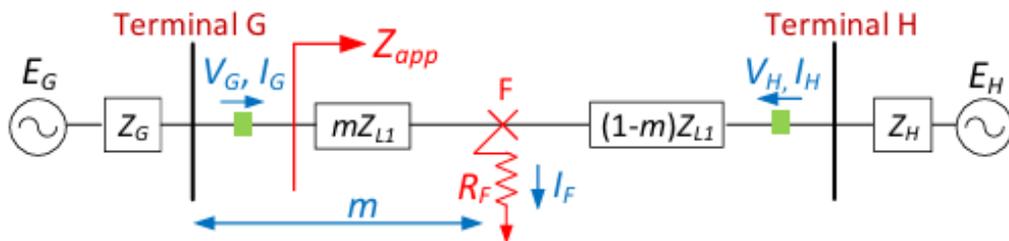
$$\text{Terminal G : } V_{F0} = V_{G0}e^{j\delta} - mZ_{L0}I_{G0}e^{j\delta}$$

$$\text{Terminal H : } V_{F0} = V_{H0} - (1 - m)Z_{L0}I_{H0}$$

$$Z_{L0} = \frac{V_{G0}e^{j\delta} - V_{H0}}{mI_{G0}e^{j\delta} - (1 - m)I_{H0}}$$

Estimación de resistencia de falla para líneas de transmisión

- Las señales de corriente y voltaje capturadas por los IED pueden ser utilizadas para calcular la magnitud de la resistencia de falla.
- Podría ayudar a identificar la causa raíz de la falla.
- Permite validar la exactitud del modelo de circuito del sistema.



Falla monofásica

$$R_F = \frac{V_G - mZ_{L2}(I_{G1} + I_{G2}) - mZ_{L0}I_{G0}}{3(I_{G0}e^{j\delta} + I_{H0})} \times e^{j\delta}$$

Falla bifásica

$$R_F = \frac{V_{G1} - V_{G2} - mZ_{L1}(I_{G1} - I_{G2})}{(I_{G1}e^{j\delta} + I_{H1})} \times e^{j\delta}$$

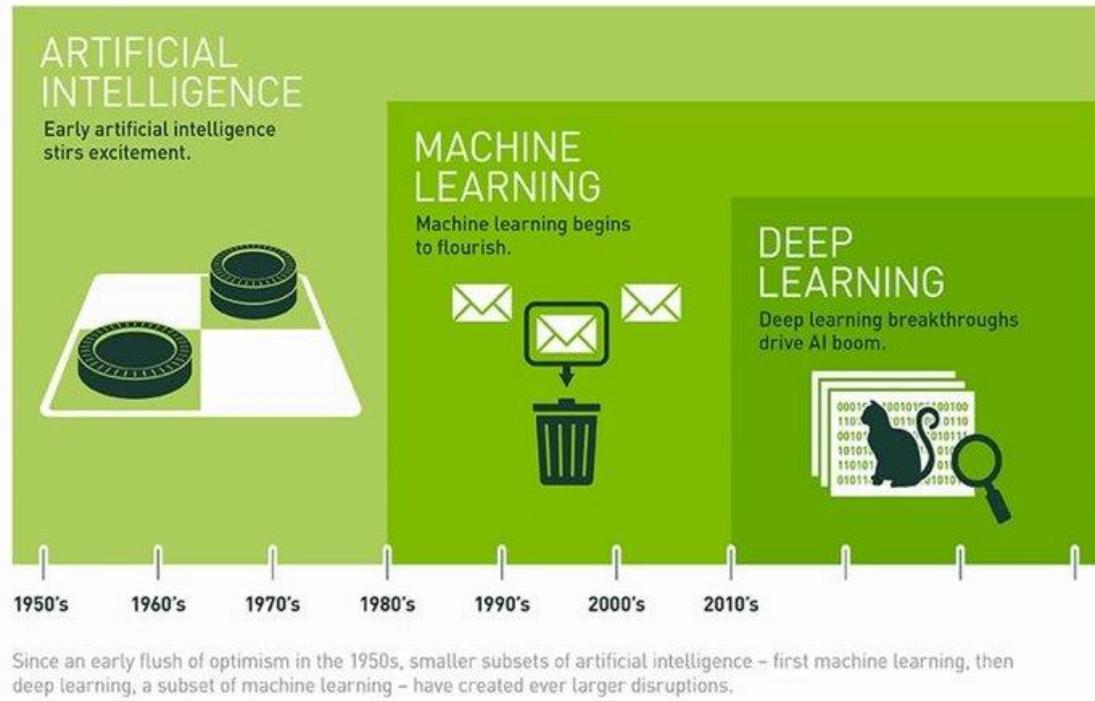
Falla bifásica a tierra

$$R_F = \frac{V_{G2} - V_{G0} + m(Z_{L0}I_{G0} - Z_{L2}I_{G2})}{(I_{G0}e^{j\delta} + I_{H0})} \times e^{j\delta}$$

Falla trifásica

$$R_F = \frac{V_{G1} - mZ_{G1}I_{G1}}{I_{G1}e^{j\delta} + I_{H1}} \times e^{j\delta}$$

Inteligencia artificial aplicada a clasificación de fallas



Principales definiciones:

- El campo de estudio que da a las computadoras la habilidad de aprender sin ser explícitamente programadas - Arthur Samuel.
- Es el estudio de algoritmos informáticos que permiten a los programas de computadora mejorar automáticamente a través de la experiencia- Tom Mitchell.

Inteligencia artificial aplicada a clasificación de fallas

Tipos de aprendizaje en machine learning

Aprendizaje supervisado

- ¿Cómo elaborar una función que mapee características de entrada en salidas dado un set de ejemplos?

Algunas aplicaciones:

- Clasificación de texto
- Clasificación de imágenes
- Detección de objetos
- Regresiones
- Ubicación y clasificación de fallas eléctricas

Aprendizaje no supervisado

- ¿Cómo elaborar una función que mapee características de entrada en salidas sin conocer las etiquetas del set de ejemplos? → encontrar patrones en los datos

Algunas aplicaciones:

- Clustering de clientes
- Detección de anomalías en transacciones
- Sistemas de recomendación
- Clasificación de fallas eléctricas

Aprendizaje por refuerzo

- ¿Cómo lograr que un agente aprenda a tomar buenas (óptimas) decisiones a través de su experiencia?

Algunas aplicaciones:

- Control de tránsito
- Robótica
- Juegos
- Natural Language Processing , NLP

Inteligencia artificial aplicada a clasificación de fallas

Utilizar machine learning para clasificar los siguientes eventos de falla en una línea de transmisión.

1. Contacto con árbol
2. Descarga atmosférica
3. Conductor roto

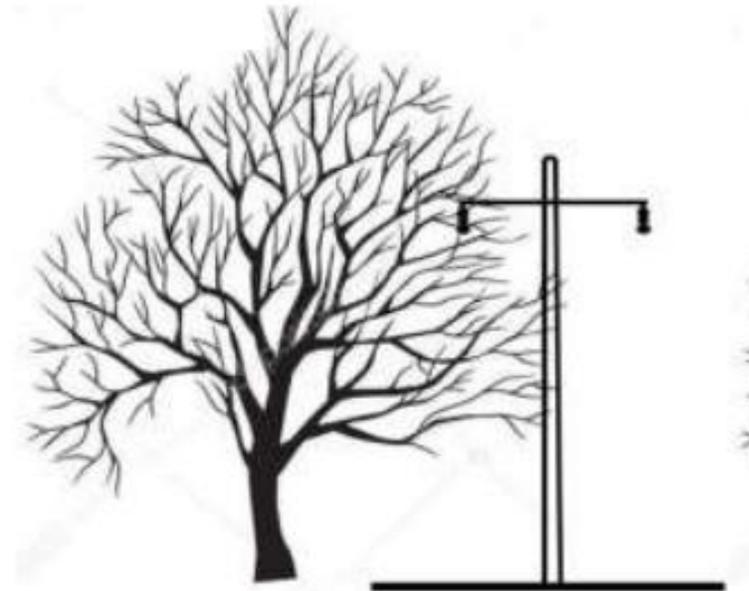
Inteligencia artificial aplicada a clasificación de fallas

Caída de un árbol

Falla en la mayoría de los casos monofásica

Impedancia de falla alta

Duración de la falla grande



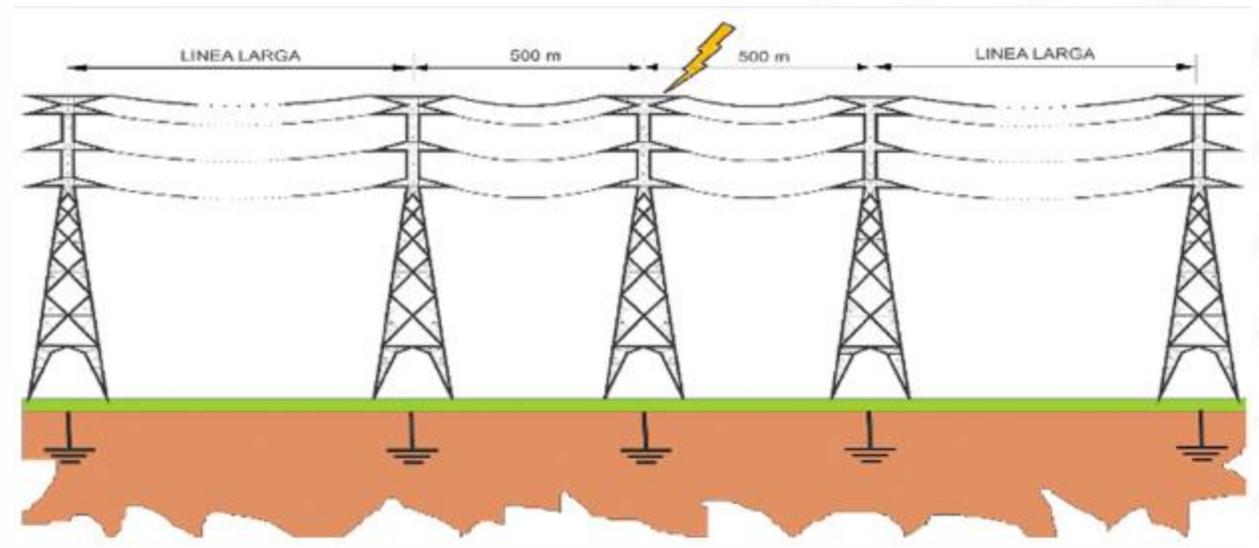
Inteligencia artificial aplicada a clasificación de fallas

Descarga atmosférica

Falla con alta magnitud de corriente de falla

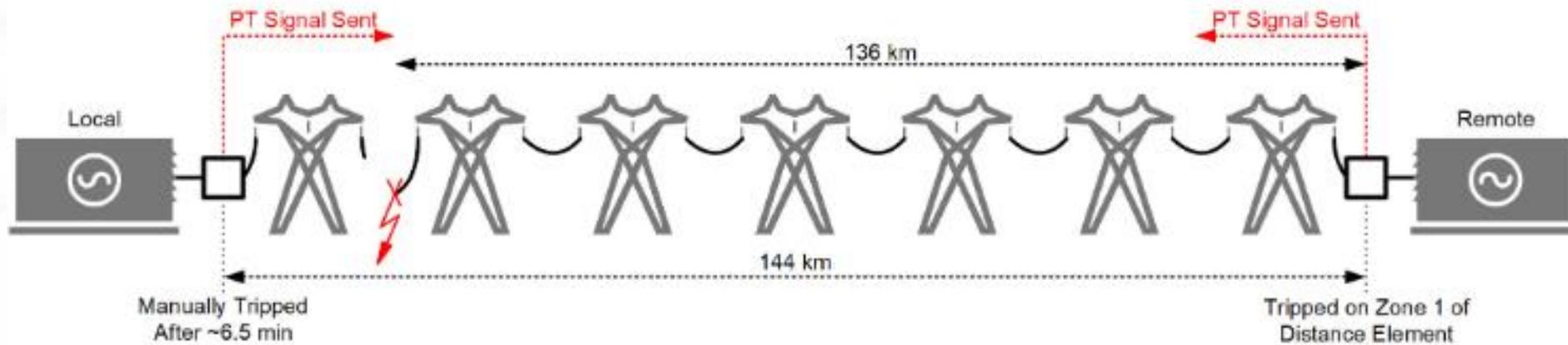
Impedancia de falla baja (usualmente la malla a tierra)

Duración de la falla pequeña



Evento conductor roto

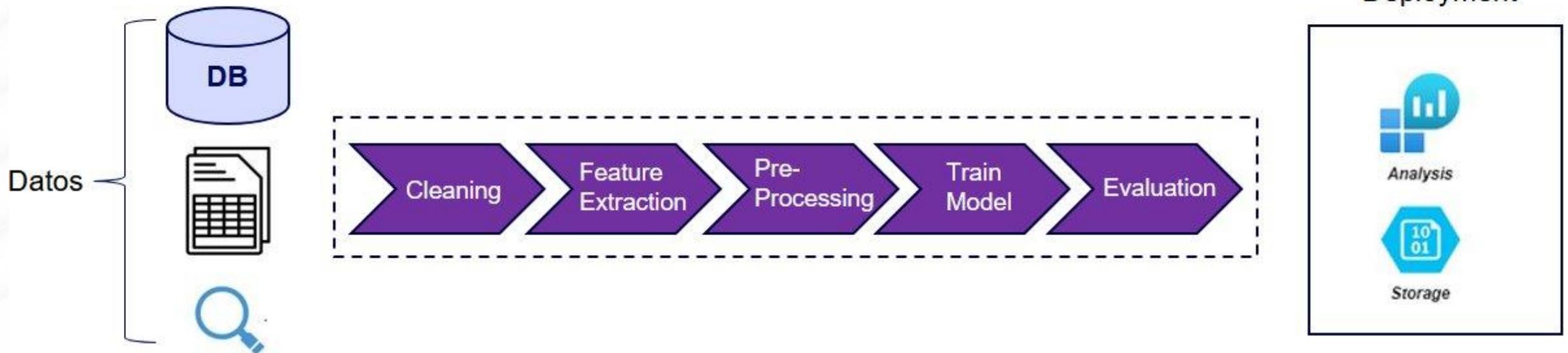
- El modelo de red de secuencia muy similar a falla de cortocircuito bifásica.
- Relé no detecta la falla y puede dar intento de recierre
- En ciertos casos puede causar incendio.
- La componente de secuencia negativa muy alta con fase abierta



Inteligencia artificial aplicada a clasificación de fallas

Metodología para el procesamiento de señales

Metodología filtro(pipeline)



Inteligencia artificial aplicada a clasificación de fallas

Cleaning

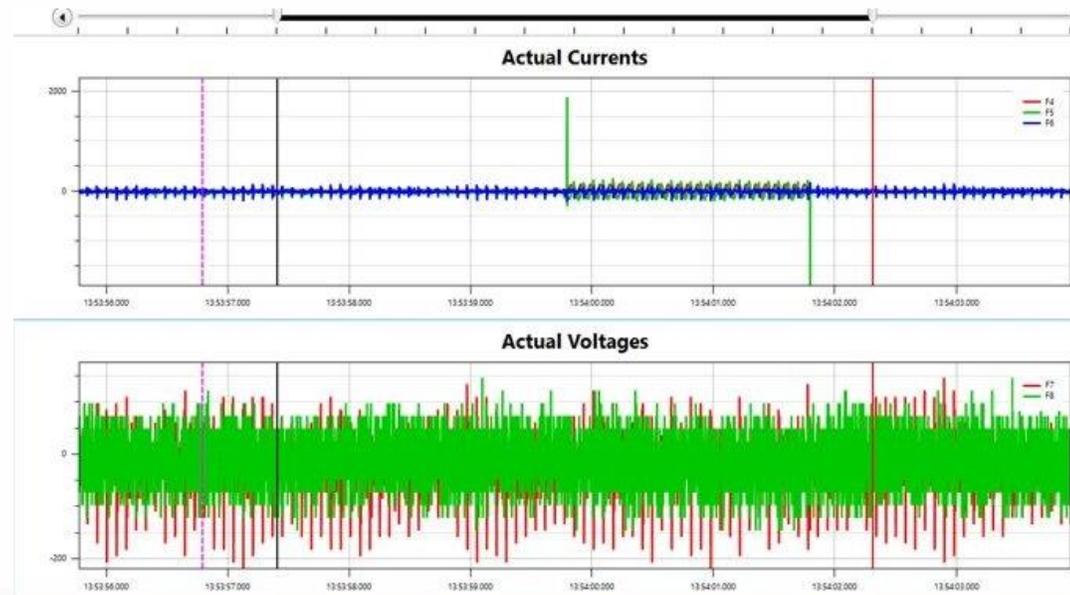
Feature
Extraction

Pre-
Processing

Train
Model

Evaluation

Algunos eventos pueden generar oscilografías que realmente no contienen información valiosa para el problema que se quiere resolver. Se deben eliminar para no alterar al modelo y reducir tiempo de entrenamiento.



Inteligencia artificial aplicada a clasificación de fallas

Cleaning

Feature
Extraction

Pre-
Processing

Train
Model

Evaluation

- Se debe seleccionar que característica aportan en mayor medida a la solución del problema.
- Si el sistema tiene un gran número de características se recomienda usar una alternativa basada en reducción de dimensionalidad(PCA,SVD).
- Si el sistema no tiene un gran número de características seleccionar manualmente aquellas que aportan mayor valor.

I_a, V_a

I_b, V_b

I_c, V_c

I_0, I_1, I_2

V_0, V_1, V_2

Impedancia de falla

Duración de falla

Inteligencia artificial aplicada a clasificación de fallas

Cleaning

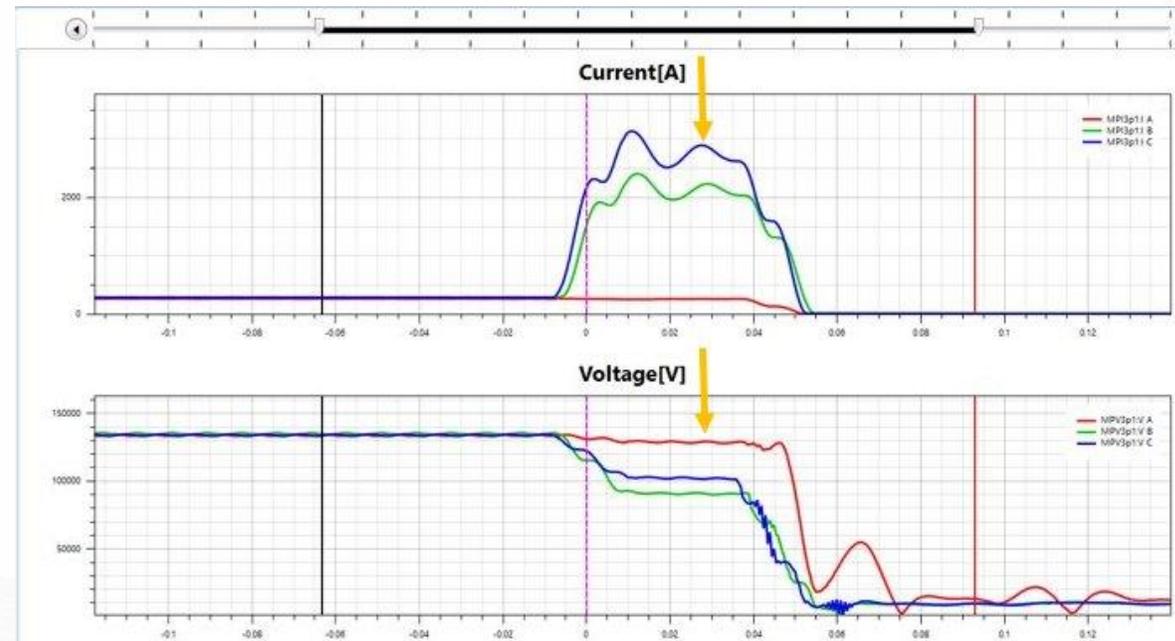
Feature
Extraction

Pre-
Processing

Train
Model

Evaluation

Los datos que se utilizan para el entrenamiento del modelo requieren un procesamiento adicional en la mayoría de los casos. Principalmente para facilitar al algoritmo encontrar una solución.



Inteligencia artificial aplicada a clasificación de fallas

Cleaning

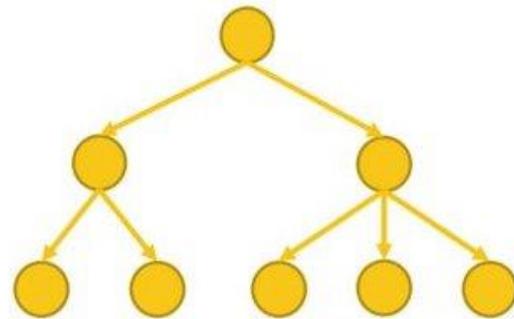
Feature
Extraction

Pre-
Processing

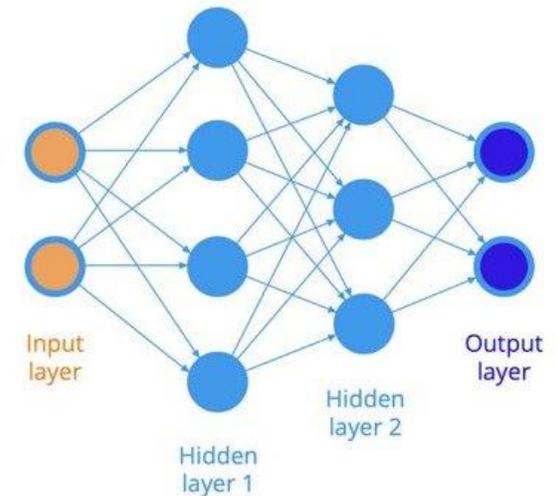
Train
Model

Evaluation

En este punto se debe seleccionar y entrenar el algoritmo que a partir de los datos de entrada pueda generar un modelo para solucionar el problema inicial.



Neural Network



Inteligencia artificial aplicada a clasificación de fallas

Cleaning

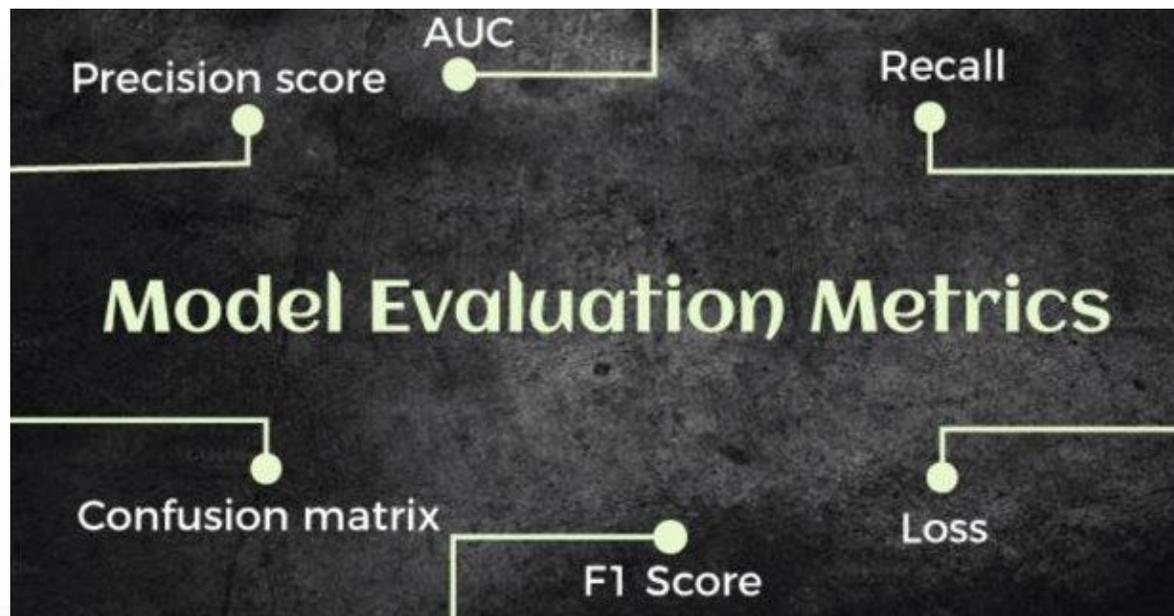
Feature
Extraction

Pre-
Processing

Train
Model

Evaluation

La última etapa es la validación del modelo mediante diferentes métricas, esto nos permite observar de forma directa el rendimiento o calidad del modelo construido

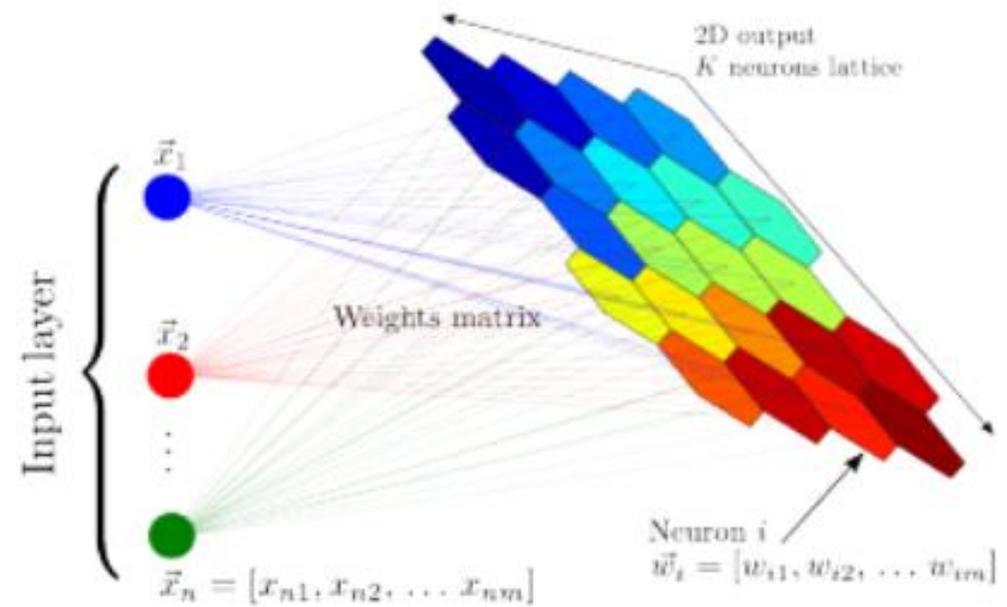


Mapas autoorganizados

Es un tipo de aprendizaje no supervisado utilizado para identificar características.

Se diferencia de una red neuronal al aplicar aprendizaje competitivo en lugar de aprendizaje de error correlacionado.

Permite mapear un espacio de alta dimensión en uno de baja dimensión.



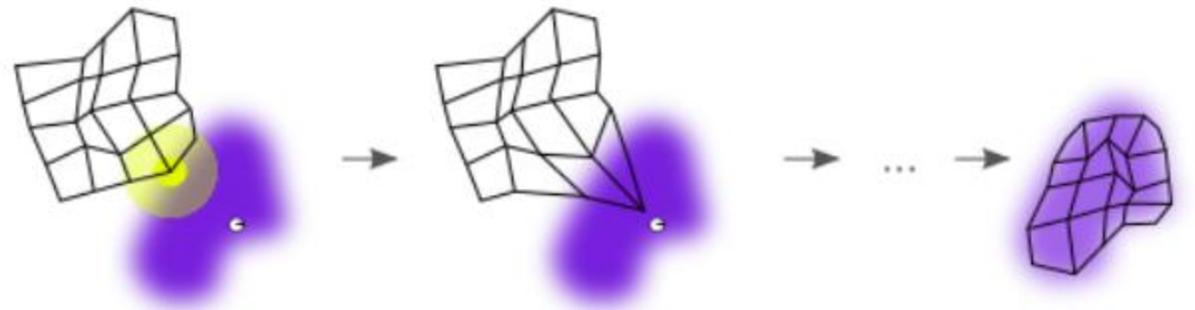
Mapas autoorganizados

Es un tipo de aprendizaje no supervisado utilizado para identificar características.

Se diferencia de una red neuronal al aplicar aprendizaje competitivo en lugar de aprendizaje de error correlacionado.

Permite una visualización de 2 dimensiones para grupos de datos de alta dimensión.

$$d_j(\mathbf{x}) = \sum_{i=1}^D (x_i - w_{ji})^2$$





Summit
Energy Automation

20
24

¡Muchas gracias!

