



UNIVERSIDAD DE LA REPÚBLICA
FACULTAD DE INGENIERÍA



Algoritmo de detección del estado de líneas de transmisión de 150 kV implementado en relé SEL-451

MEMORIA DE PROYECTO PRESENTADA A LA FACULTAD DE
INGENIERÍA DE LA UNIVERSIDAD DE LA REPÚBLICA POR

Marco Grosso, Diego Di Leone

EN CUMPLIMIENTO PARCIAL DE LOS REQUERIMIENTOS
PARA LA OBTENCIÓN DEL TÍTULO DE
INGENIERO ELECTRICISTA.

TUTOR

Jose Munsch..... Universidad de la República

TRIBUNAL

Celia Sena..... Universidad de la República

Agustín Fraschini..... Universidad de la República

Ignacio Afonso..... Universidad de la República

Montevideo
Martes 30 de Noviembre, 2021

Algoritmo de detección del estado de líneas de transmisión de 150 kV implementado en relé SEL-451, Marco Grosso, Diego Di Leone.

Esta tesis fue preparada en L^AT_EX usando la clase iietesis (v1.1).
Contiene un total de 149 páginas.
Compilada el miércoles 3 agosto, 2022.
<http://iie.fing.edu.uy/>

Agradecimientos

A José Munsch por decidir acompañarnos en este proyecto, por hacernos accesible la información necesaria para su desarrollo y por confiar en nosotros para el uso del relé.

A Isabel Briozzo por proveernos con el software necesario para el modelado y por las múltiples cadenas de emails con dudas sobre su uso.

A Celia Sena por habernos presentado este proyecto y por las múltiples revisiones realizadas.

A Agustín Fracshini y a los funcionarios de la Sede Norte de UTE por siempre estar dispuestos a ayudarnos a la hora de enfrentarnos con el relé, realizar los cableados, correr las simulaciones, por nombrar alguno de los tanto dolores de cabeza sufridos.

Agradecemos a nuestras familias, parejas y amigos quienes de una manera u otra nos han acompañado en la realización de la carrera.

Esta página ha sido intencionalmente dejada en blanco.

*Para todos quienes estuvieron a nuestro lado en este largo camino,
¡muchas gracias!*

Esta página ha sido intencionalmente dejada en blanco.

Resumen

La situación actual de Uruguay hace que la operación de su red eléctrica ocurra en puntos muy cercanos a sus límites de funcionamiento, teniendo como consecuencia su vulnerabilidad frente a eventos externos e internos.

De manera de suministrar un servicio de calidad a sus clientes, la empresa responsable de suministrar de energía eléctrica a la población (UTE) decide realizar en conjunto con la empresa Schweitzer Engineering Laboratories, el diseño e implementación de un sistema de acciones correctivas (RAS), el cual actuará a modo de centro neurálgico en la decisión de qué acciones tomar en casos de perturbaciones en la red.

El RAS necesita información del estado de toda la red en tiempo real. En particular, es de vital importancia conocer el estado de las líneas de $150kV$ (las cuales representan un gran porcentaje de la red uruguaya). Es decir, si las mismas se encuentran en servicio o no.

El objetivo de este proyecto es el estudio, diseño e implementación de una lógica que permita determinar dicho estado. En primer lugar, será desarrollada sobre el software MATLAB, y finalmente sobre el relé SEL-451. En ambas situaciones se utilizarán, para corroborar su funcionamiento, simulaciones de la red mediante un software de modelado de transitorios electromagnéticos, así como también registros reales sobre ocurrencias sucedidas en la red de $150kV$.

Esta página ha sido intencionalmente dejada en blanco.

Abstract

Nowadays, the electrical network in Uruguay operates at points which are close to its functional limits. In consequence, the network presents high vulnerability towards external or internal events.

In order to provide a high quality service to its clients, the company responsible of providing electrical power to the citizens (UTE) has decided to develop a remedial action scheme (RAS) with support from the company Schweitzer Engineering Laboratories. Said system acts as a neuralgic center in the decision of which course of action should be pursued when certain event takes place in the network.

The RAS needs information of the state of the network in real time. In particular, it is of utmost importance to know the state of the transmission lines of 150 kV (which represent a large portion of the Uruguayan network). In other words, the RAS needs to know whether these lines are in service or not.

The objective of this project is the study, design and implementation of a logic that can determine such state. In the first place, it will be developed in the software MATLAB and finally in the relays (SEL-451) software. In both cases, simulations of the network obtained with a software capable of simulating electromagnetic transient events will be used to verify the algorithm response. Moreover, real events registered by UTE will also be used for this purpose.

Esta página ha sido intencionalmente dejada en blanco.

Tabla de contenidos

Agradecimientos	I
Resumen	v
Abstract	vii
1. Introducción	1
2. Marco teórico	3
2.1. Modelado de líneas de transmisión	3
2.1.1. Línea Larga	4
2.1.2. Línea Media - Modelo π	7
2.1.3. Modelo J. Martí	8
2.2. Transformadores de medida	9
2.2.1. Transformadores de corriente	9
2.2.2. Transformadores de tensión	10
2.3. Relés electrónicos	11
2.3.1. Ventajas	11
2.3.2. Desventajas	12
2.3.3. Diagrama funcional	13
2.3.4. Relé SEL-451	14
3. Estudio previo del problema	17
3.1. Efectos de transitorios electromagnéticos en referencia a energización de líneas de transmisión	17
3.1.1. Introducción	17
3.1.2. Energización de líneas de transmisión de alta tensión	17
4. Conceptos para el desarrollo del algoritmo	23
4.1. Algoritmo 1	23
4.2. Algoritmo 2	26
4.3. Estrategia a seguir	31
5. Modelado y simulaciones de la red	33
5.1. Modelado de la red	33
5.2. Simulaciones de la red	38

Tabla de contenidos

5.2.1. Caso linea abierta	38
5.2.2. Caso linea con carga	45
5.2.3. Casos particulares	53
5.3. Conclusiones	59
6. Desarrollo del algoritmo en MATLAB	61
6.1. Teoría detrás del algoritmo	61
6.2. Variables de entrada	61
6.2.1. Corriente de Vacío	62
6.2.2. Umbral de ángulo o de factor de potencia	62
6.2.3. Umbral de potencia	62
6.2.4. Margenes de seguridad generales	62
6.3. Funciones implementadas	62
6.3.1. Función potencia	63
6.3.2. Función ángulo	63
6.3.3. Función corriente	64
6.3.4. Función salida	64
6.3.5. Función Local/Remoto	65
6.3.6. Función retardo	65
6.3.7. Función lectura e interpretación de archivos Comtrade	66
6.4. Resultados	67
6.4.1. Documentos ATP	67
6.4.2. Documentos Comtrade	84
7. Adaptación del algoritmo a SELogic	89
7.1. Equipo utilizado	89
7.2. Cálculo de Magnitudes	90
7.2.1. Ingresadas por el usuario	91
7.3. Definición de variables	91
7.4. Funciones implementadas en SELogic	93
7.5. Resultados	96
7.5.1. Falta monofásica 1	96
7.5.2. Falta monofásica 2	97
7.5.3. Falta en línea RME-ROS	98
7.5.4. Falta monofásica en línea YOU-PAY	99
7.5.5. Inversión de potencia	100
7.5.6. Casos bases	101
7.5.7. Tiempos de actuación	104
8. Conclusiones y Desarrollo a futuro	105
A. Modelado y simulaciones de la red	107
B. Desarrollo del algoritmo en MATLAB	115
Referencias	127

Tabla de contenidos

Índice de tablas	129
Índice de figuras	130

Esta página ha sido intencionalmente dejada en blanco.

Capítulo 1

Introducción

En Uruguay la Administración Nacional de Usinas y Trasmisiones Eléctricas (UTE) es una compañía dedicada a la generación, trasmisión, distribución y comercialización de la energía eléctrica a lo largo del país.

Tanto para poder satisfacer la gran demanda de energía que existe en invierno y verano en Uruguay, como para poder exportar los excedentes de generación producida por fuentes renovables, la red uruguaya se encuentra interconectada con la Argentina y Brasileira por medio de líneas de extra alta tensión de 500kV. Debido a esta alta demanda, los equipos de la red eléctrica deben funcionar cerca de sus límites de operación, lo que provoca que el sistema eléctrico sea más vulnerable frente a cortocircuitos u otro tipo de fallas. Con el fin de reducir los efectos indeseables sobre el sistema (cortes, desbalance de generación/demanda, colapso de tensión y pérdida de estabilidad), UTE decidió implementar en conjunto con la empresa Schweitzer Engineering Laboratories (SEL) un “Remedial Action Scheme” (RAS), el cual se encarga de realizar distintos tipo de acciones sobre el Sistema Eléctrico: desconexión automática de cargas o apertura de líneas con la finalidad de despejar bloques de cargas, desconexión de líneas con la finalidad de aislar el sistema uruguayo del argentino, desconexión automática de potencia reactiva, incluyendo tanto compensación estática como líneas de 500 kV en vacío y desconexión de la Conversora Melo.

El RAS actúa cuando detecta la ocurrencia de una contingencia que puede provocar pérdida de estabilidad o sobrecarga en el sistema eléctrico, y requiere una cantidad de información sobre los equipos de potencia, en especial de líneas y transformadores. Uno de los datos que requiere es el estado de las líneas de 150 kV, es decir, conocer si la línea está en servicio (es capaz de transmitir energía) o si está fuera de servicio (el flujo de energía por la misma no es posible). En este proyecto se buscará desarrollar un algoritmo de detección de servicio para líneas de transmisión de 150 kV, así como su implementación real en un relé SEL-451. Esta lógica recibirá medidas de tensión y corriente en el extremo de una línea, a partir de las cuales deberá reportar el estado de la línea en cuestión, en tiempo real. El algoritmo deberá funcionar para cualquier estado de la red: durante la

Capítulo 1. Introducción

energización y desenergización de líneas con distintos niveles de carga, durante cortocircuito trifásicos y monofásicos y durante la ocurrencia de una inversión de potencia. Cumplir con una actuación rápida, en particular menor a $40ms$, y contar con un grado de confiabilidad elevado.

Se buscará que este algoritmo sea lo más genérico posible, pudiendo ser utilizado para cualquier línea de transmisión de 150 kV, mediante la introducción de información sobre la línea a supervisar.

Se comenzará el desarrollo del código en el software MATLAB, con el cual también se realizarán sus simulaciones iniciales. Una vez que el mismo se encuentre en una etapa avanzada se lo implementará en un relé SEL-451 real, el cual será probado en las instalaciones de UTE mediante una valija de ensayos.

Este algoritmo reportará el estado de las líneas de transmisión de 150 kV para que el sistema de protección RAS cuente con la información de la red suficiente para tomar la medida correctiva más eficaz.

Como ventaja principal se encuentra que este desarrollo es una producción nacional entre UTE y UdelAR, presentando como virtudes su fácil mantenimiento y la posibilidad de su futuro desarrollo.

Capítulo 2

Marco teórico

2.1. Modelado de líneas de transmisión

A continuación se presenta un breve análisis sobre el modelado de líneas de transmisión de alta tensión. El desarrollo de esta sección se basa en un resumen del Capítulo 3 de las notas teóricas del curso de Redes Eléctricas de la Facultad de Ingeniería (UdelaR) [1].

A diferencia de un circuito de corta longitud, en las líneas de transmisión la corriente no vale lo mismo en toda su extensión. Debido a ello, su modelado se realiza por medio de parámetros distribuidos. Es decir, consideramos que una línea de transmisión está conformada por los siguientes elementos: resistencia (R), conductancia (G), inductancia (L) y capacidad (C), los cuales se encuentran distribuidos a lo largo de la misma.

Consideramos un circuito de determinada extensión, en el cual cada unidad de longitud de su conductor está conformado por los siguientes elementos:

- Una resistencia R , la cual es definida por el efecto Joule.
- Una conductancia G , la cual es definida por las pérdidas de potencia causadas por defectos en la aislación o pérdidas dieléctricas.
- Una auto inductancia L , la cual representa el efecto de inductancia mutua entre los conductores y el de auto inductancia en el propio conductor.
- Una capacidad C , la cual representa el efecto producido por la diferencia de potencial entre los conductores y la superficie de la tierra.

Luego, dada una corriente de pulsación ω , se definen los siguientes parámetros.

Impedancia en Ω /unidad de longitud:

$$Z = R + L\omega j \tag{2.1}$$

Admitancia en Ω^{-1} /unidad de longitud:

$$Y = G + Cwj \tag{2.2}$$

2.1.1. Línea Larga

Las líneas "largas" son aquellas cuya longitud supera los 240 km. Consideremos el siguiente circuito que representa una línea de transmisión de longitud L:

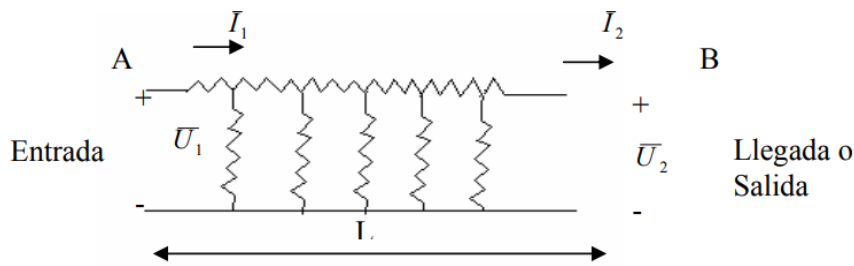


Figura 2.1: Línea de transmisión

Siendo U_1 , U_2 , I_1 y I_2 la tensión y corriente a la entrada y salida respectivamente.

Consideremos ahora el siguiente elemento infinitesimal de longitud dx , el cual se encuentra a una distancia x del punto B:

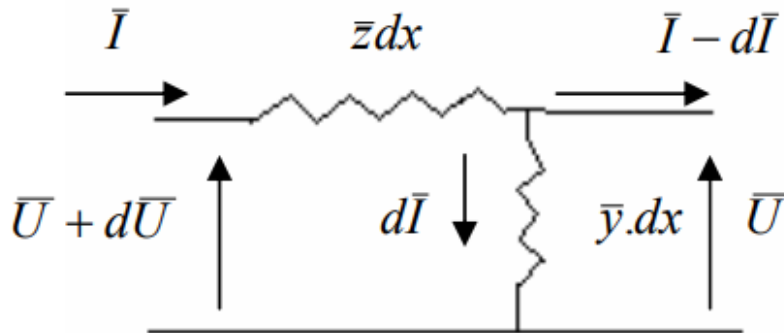


Figura 2.2: Elemento infinitesimal de la línea

Luego, aplicando las leyes de Kirchhoff se tiene que:

$$dU = zdxI \tag{2.3}$$

$$dI = ydxU \tag{2.4}$$

2.1. Modelado de líneas de transmisión

Despejando y derivando según x obtenemos lo siguiente:

$$\frac{d^2U}{dx^2} = zyU \quad (2.5)$$

$$\frac{d^2I}{dx^2} = zyI \quad (2.6)$$

Se identifica la siguiente ecuación característica:

$$\beta^2 + zy = 0 \quad (2.7)$$

De donde sus raíces son:

$$\gamma = \pm\sqrt{zy} \quad (2.8)$$

Luego, considerando la raíz cuadrada positiva y planteando la solución general para una ecuación de segundo orden tenemos:

$$U = Me^{\gamma x} + Ne^{-\gamma x} \quad (2.9)$$

$$I = Pe^{\gamma x} + Qe^{-\gamma x} \quad (2.10)$$

Luego, reemplazando en la ecuación 2.3 se tiene:

$$M\gamma e^{\gamma x} - N\gamma e^{-\gamma x} \equiv zPe^{\gamma x} + zQe^{-\gamma x} \quad (2.11)$$

Al ser $e^{\gamma x}$ y $e^{-\gamma x}$ linealmente independientes, podemos plantear lo siguiente:

$$M\gamma = zP \quad (2.12)$$

$$-N\gamma = zQ \quad (2.13)$$

Despejando obtenemos:

$$P = \frac{M\gamma}{z} \quad (2.14)$$

$$Q = -\frac{N\gamma}{z} \quad (2.15)$$

Si definimos $Z_c = \sqrt{\frac{z}{y}}$ como la impedancia característica de la línea, tenemos que:

$$P = \frac{M}{Z_c} \quad (2.16)$$

Capítulo 2. Marco teórico

$$Q = -\frac{N}{Z_c} \quad (2.17)$$

Sustituyendo P y Q en 2.10, la solución del sistema queda:

$$U = Me^{\gamma x} + Ne^{-\gamma x} \quad (2.18)$$

$$I = \frac{1}{Z_c}(Me^{\gamma x} - Ne^{-\gamma x}) \quad (2.19)$$

Las exponenciales pueden expresarse de la siguiente forma:

$$e^{\gamma x} = ch\gamma x + sh\gamma x \quad (2.20)$$

$$e^{-\gamma x} = ch\gamma x - sh\gamma x \quad (2.21)$$

Sustituyendo estas identidades en las ecuaciones de solución del sistema obtenemos:

$$U = (M + N)ch\gamma x + (M - N)sh\gamma x \quad (2.22)$$

$$I = \frac{1}{Z_c}[(M - N)ch\gamma x + (M + N)sh\gamma x] \quad (2.23)$$

Imponiendo las condiciones de borde se tiene:

$$U(0) = U_2 \quad (2.24)$$

$$I(0) = I_2 \quad (2.25)$$

Luego:

$$U_2 = M + N \quad (2.26)$$

$$I_2 = \frac{M - N}{Z_c} \quad (2.27)$$

Reescribiendo la solución del sistema tenemos:

$$U = U_2ch\gamma x + Z_c I_2 sh\gamma x \quad (2.28)$$

$$I = \frac{U_2}{Z_c} sh\gamma x + I_2 ch\gamma x \quad (2.29)$$

Si queremos hallar los valores de tensión y corriente en el punto A, sustituimos x por L :

$$U_1 = U_2ch\gamma L + Z_c I_2 sh\gamma L \quad (2.30)$$

2.1. Modelado de líneas de transmisión

$$I_1 = \frac{U_2}{Z_c} sh\gamma L + I_2 ch\gamma L \quad (2.31)$$

Observamos que se puede modelar a la línea como un cuadripolo que tiene las siguientes constantes generales:

$$A = ch\gamma L \quad (2.32)$$

$$B = Z_c sh\gamma L \quad (2.33)$$

$$C = \frac{sh\gamma L}{Z_c} \quad (2.34)$$

$$D = ch\gamma L \quad (2.35)$$

2.1.2. Línea Media - Modelo π

Las líneas "medias" son aquellas que tienen una longitud entre 80 y 240 km. Al considerar una línea con esta extensión, podemos tomar el primer término del desarrollo en serie de las funciones hiperbólicas:

$$sh\gamma L \cong \gamma L \quad (2.36)$$

$$ch\gamma L - 1 \cong \frac{\gamma^2 L^2}{2} \quad (2.37)$$

Las constantes generales son entonces:

$$A = 1 + \frac{\gamma^2 L}{2} \quad (2.38)$$

$$B = Z \quad (2.39)$$

$$C = Y \quad (2.40)$$

$$D = 1 + \frac{\gamma^2 L}{2} \quad (2.41)$$

Habiendo llamado:

$$Z = zL \quad (2.42)$$

$$Y = yL \quad (2.43)$$

El cuadripolo π es el siguiente:

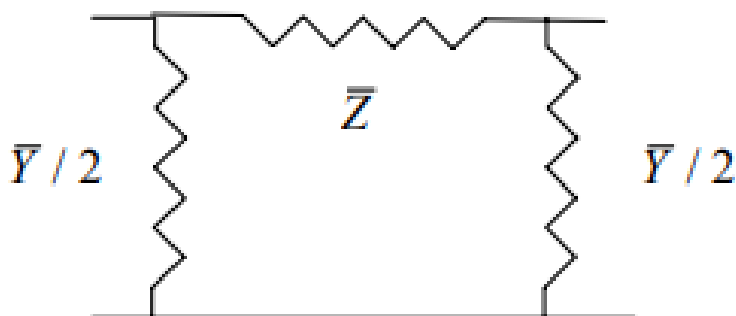


Figura 2.3: Modelo pi del cuadripolo

2.1.3. Modelo J. Martí

Tal como se observa en la sección anterior, los parámetros del Modelo PI son calculados a frecuencia constante, es decir, a 50 Hz. Sin embargo, al querer estudiar fenómenos transitorios, es posible obtener resultados más precisos al modelar las líneas de transmisión con parámetros dependientes de la frecuencia y al considerar la existencia de las pérdidas eléctricas.

A continuación se presenta una breve descripción del modelo J. Martí, el cual nos permite lograr lo mencionado anteriormente. La siguiente información se basa en [2] y [3] .

Al utilizar un modelo de parámetros constantes puede producirse un aumento en los armónicos altos de las señales, lo cual genera distorsiones en la forma de onda y picos de gran valor. Con el fin de solucionar estas imprecisiones, es posible utilizar el modelo J Martí. Dicho modelo se basa en una estimación de la impedancia característica y de la constante de propagación utilizando funciones racionales. El modelo utiliza el circuito visto en la figura 2.4, con la excepción de que la impedancia Z_0 es reemplazada por un equivalente de red que presenta la misma respuesta en frecuencia que Z_0 .

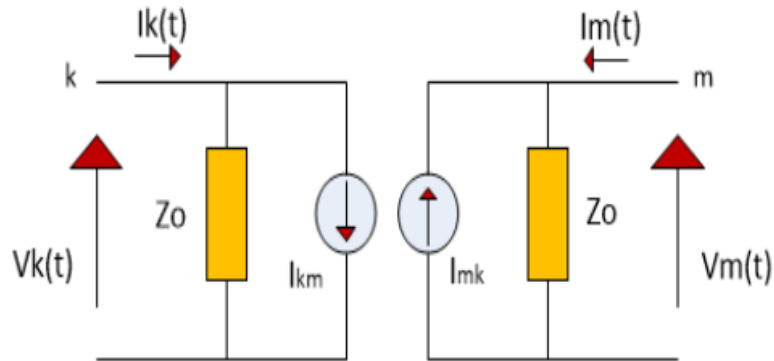


Figura 2.4: Modelo CP de una línea sin pérdidas

El modelo puede utilizarse en un rango de frecuencias que van desde los 0 a los 106 Hz y es adecuado para líneas de longitud media y larga.

Las ventajas que presenta el modelo de J. Martí no están relacionados únicamente con un aumento en la precisión de los resultados, sino que también se caracteriza por solucionar problemas numéricos de estabilidad. En cuanto a sus desventajas, el modelo presenta inexactitud en el análisis de líneas desbalanceadas, en estudios a baja frecuencia y en su aplicación a líneas cortas.

2.2. Transformadores de medida

En esta sección se presenta una introducción al funcionamiento de transformadores de medida y su uso. Se utilizaron como texto base las diapositivas de la clase de transformadores de medida del curso de máquinas eléctricas de la facultad de Ingeniería (UdelaR) [4]

Con el objetivo de poder realizar medidas en ciertos puntos de una red de potencia, se utilizan equipos que transformen altos valores de corriente y tensión a un nivel en el que sea posible medir estas magnitudes con un relé electrónico. Mediante estos transformadores se logra aislar el circuito de potencia de los dispositivos de medida, evitando perturbaciones en los mismos causadas por los campos magnéticos.

2.2.1. Transformadores de corriente

El primario del transformador de corriente se conecta en serie con la red de potencia en el punto en el que se desea tomar la medida, mientras que el secundario trabaja con 5A ó 1A y se conecta a un relé.

Capítulo 2. Marco teórico

2.2.1.1. Error en la medida

Es claro que la medida nunca es exacta debido a errores de conversión. Dichos errores de relación pueden calcularse a partir de la siguiente ecuación:

$$\Delta = \frac{(I_2 \frac{N_2}{N_1} - I_1)}{I_1} \quad (2.44)$$

Siendo:

I1 : Módulo de la corriente del primario

I2 : Módulo de la corriente del secundario

N1 : Número de vueltas del primario

N2 : Número de vueltas del secundario

A su vez, existen distintas clases de precisión que corresponden al máximo porcentaje de error que resulte de la ecuación 2.44. De esta forma es posible realizar una correcta elección del dispositivo según el uso que se le vaya a dar a la medida en cuestión.

2.2.1.2. Protección

Se debe conectar el secundario de los transformadores de corriente a tierra, ofreciendo de esta forma una adecuada protección contra contactos. Adicionalmente, es importante resaltar que antes de conectar el transformador a un equipo de medida, se debe cortocircuitar su secundario. Esto es debido a que si se encontrara en vacío, la corriente del primario circularía por la impedancia magnetizante, lo cual produce un aumento significativo en las pérdidas en el núcleo. Consecuentemente, la tensión puede crecer a niveles capaces de dañar el equipo.

2.2.2. Transformadores de tensión

El primario del transformador de tensión se conecta en paralelo con la red de potencia en el punto en el que se desea tomar la medida, mientras que el secundario suele trabajar con 100V ó 110V y se conecta a un relé.

2.2.2.1. Error en la medida

Con el objetivo de poder tomar una medida lo más cercana a la realidad, estos trafos deben contar con una caída de tensión interna lo más baja posible. Tal como se mencionó para los trafos de corriente, la medida nunca es exacta debido a errores de conversión. Dichos errores de relación pueden calcularse a partir de la siguiente ecuación:

$$\Delta = \frac{(V_2 \frac{N_1}{N_2} - V_1)}{V_1} \quad (2.45)$$

Siendo:

V1 : Módulo de la tensión del primario

V2 : Módulo de la tensión del secundario

N1 : Número de vueltas del primario

N2 : Número de vueltas del secundario

De forma análoga a lo mencionado para los transformadores de corriente, es posible determinar una clase de precisión y a partir de ella elegir el transformador que mejor se adecúe al uso de la medida en cuestión.

2.2.2.2. Protección

Al igual que los transformadores de corriente, se debe conectar el secundario de los trafos de tensión a tierra con el fin de garantizar una adecuada protección contra contactos.

2.3. Relés electrónicos

A continuación se presenta una descripción del funcionamiento de los relés electrónicos, así como las ventajas y desventajas de su uso. La información de esta sección fue obtenida de las notas teóricas del curso Conceptos avanzados sobre protección de sistemas eléctricos de potencia de la UdelaR [5]

Un relé electrónico es un equipo computarizado capaz de realizar múltiples funciones mediante algoritmos numéricos, siendo su principal propósito el garantizar la protección y supervisión del estado de la red.

Estos relés microprocesados basan su funcionamiento en procesadores específicamente diseñados con este fin (**DSP**, **D**igital **S**ignal **P**rocessor), mediante los cuales se logran obtener múltiples muestras de los parámetros fundamentales de la red eléctrica (en tiempo real). A partir de las mismas es posible implementar algoritmos de protección mediante técnicas numéricas.

2.3.1. Ventajas

Resultan ser el siguiente paso de los relés electromecánicos en la protección de redes eléctricas, ya que estos equipos a diferencia de los primeros logran realizar múltiples funciones de protección en una sola unidad. Funciones que hace cinco décadas atrás debían realizarse en una subestación entera, hoy en día pueden realizarse en un espacio ciento de veces menor.

Tal vez la ventaja recién mencionada sea la principal promotora del cambio a estos equipos, pero no es la única. Entre otras se encuentran:

Capítulo 2. Marco teórico

- Capacidad de trabajar sobre amplios rangos de temperatura.
- La capacidad de poder implementar funciones más complejas.
- Las funciones de auto diagnóstico que el equipo puede realizar sobre sí mismo.
- La infraestructura necesaria para poder realizar comunicaciones digitales entre distintos equipos.
- Posibilidad para el almacenamiento de los datos registrados.
- Económicamente más accesibles debido a su reducido tamaño y a su fabricación en masa.



Figura 2.5: Distintos equipos actuales

2.3.2. Desventajas

Todos los avances tecnológicos tienen sus contrapartidas, algunos de los inconvenientes que presentan son los siguientes:

- Generan cantidades enormes de información.
- Presentan una vida útil limitada, en gran parte debido a la vida útil y disponibilidad de sus componentes.
- Los equipos a causa de ser computarizados resultan susceptibles a interferencias de radio y a interferencias electromagnéticas.
- A medida que estos sistemas se vuelven más complejos, se hace necesario contar con personal aún más cualificado.

2.3.3. Diagrama funcional

El diagrama funcional de bloques de estos equipos es el siguiente.

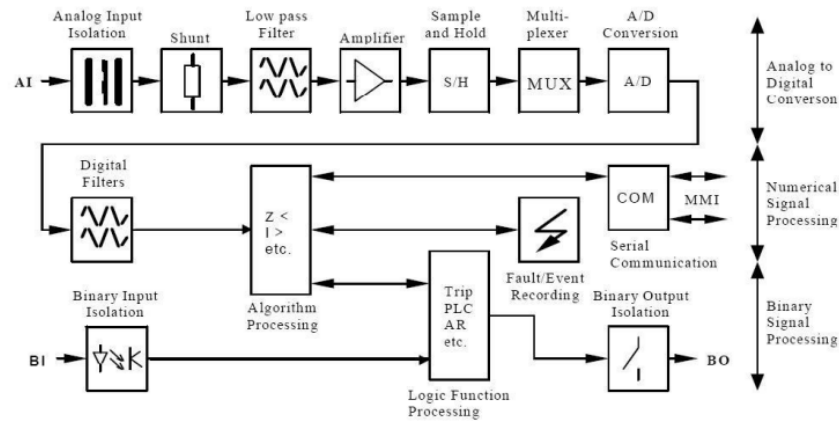


Figura 2.6: Diagrama de bloques genérico

Los datos fundamentales para estos equipos son las salidas de los transformadores de medida, a modo de ejemplo estos valores son analógicos y tienen una magnitud de 1 a 5 Amperes para transformadores de corriente y de $\frac{100}{\sqrt{3}}$ a $\frac{220}{\sqrt{3}}$ Voltios para transformadores de tensión, siendo ambos sinusoidales. El relé recibe esta información mediante su módulo de entradas analógicas.

Los primeros cuatro bloques de la figura tienen la funcionalidad de aislar las entradas del relé de los circuitos secundarios de los transformadores de medida (de manera de tener un sistema aislado galvánicamente), reducir el nivel de las tensiones a valores manejables del equipo así como también mediante transductores transformar las medidas de corriente en tensiones proporcionales, y finalmente eliminar mediante un filtro pasa bajo las componentes de alta frecuencias.

Los próximos tres bloques realizan la función de muestreo y retención de muestras, su multiplexado y su conversión analógica a digital.

Todos estos sub bloques componen el bloque de entradas analógicas.

Este último bloque se comunica con los algoritmos de protección, en donde por medio de técnicas de procesamiento numérico, se logra estimar: amplitudes de fasores, ángulos y frecuencia. Dichas magnitudes son comparadas con configuraciones internas del equipo o con lógicas diseñadas por los operarios, conformando funciones de protección o de supervisión.

Por el lado de las entradas digitales, estas son recibidas por un bloque optoacoplador que busca nuevamente la aislación entre los circuitos de potencia y la electrónica del equipo. Entre estas señales digitales se encuentran los estados de

Capítulo 2. Marco teórico

seccionadores, interruptores y las alarmas de distintos equipos.

El bloque que centraliza las señales de entrada digitales y las salidas del bloque de procesamiento del algoritmo, es el bloque de procesamiento lógico. En él, a partir de estas variables booleanas de entrada y de las generadas a partir de la lógica implementada, se origina mediante un bloque de salidas digitales aisladas todas las aperturas o cierres del o de los interruptores.

Por último existen otros dos bloques más, por un lado el encargado de guardar el registro de variables en el caso de una falta, de manera de poder tener un registro con múltiples variables (analógicas y digitales). Por otro lado, el restante bloque es el encargado de la comunicación con otros equipos, tomando especial relevancia en los últimos años mediante la imposición de la norma IEC 61850, la cual estandariza el intercambio de señales entre equipos inteligentes, en subestaciones particularmente entre relés de protección.

2.3.4. Relé SEL-451

La siguiente información fue extraída de la hoja de datos y del flyer del equipo SEL-451 fabricado por Schweitzer Engineering Laboratories [6] y [7].

El relé SEL-451 cumple con tres grandes funciones: protección, automatización y control de estaciones. Se comentan los puntos más relevantes para este trabajo sobre las tres características anteriores, con principal énfasis en la función de protección.

Funciones de protección incluida Las funciones que implementa el relé para la protección son las siguientes, se presenta su código según numeración ANSI [8], así como una breve descripción de cada una.

- **67-Relé direccional de sobreintensidad:** disparo del relé por medio de una sobrecorriente en una dirección especificada.
- **25-Dispositivo sincronizador:** función que acciona a partir de que dos sistemas eléctricos se encuentran en un límite de tensión, frecuencia o ángulo entre ellos.
- **50-Relé instantáneo de sobreintensidad:** disparo del relé a partir de que se registra un valor de corriente elevado o su crecimiento ocurre muy rápido.
- **51-Relé temporizado de sobreintensidad:** disparo que ocurre a partir de una intensidad elevada en función de una característica de tiempo inverso o fijo.
- **27-Relé de mínima tensión:** disparo a partir de la detección de un valor menor de tensión que el configurado.

2.3. Relés electrónicos

- **59-Relé de sobretensión:** disparo a partir de la detección de un valor superior de tensión que el configurado.
- **32-Relé direccional de potencia:** disparo a partir de la detección del flujo de potencia en el sentido especificado.
- **81-Relé de frecuencia:** disparo a partir de la detección de la frecuencia fuera de los límites configurados o a partir de su rápida variación.
- **79-Relé de reconexión:** equipo que controla la reconexión del interruptor de manera automática.

Detección de faltas de alta impedancia Las faltas de alta impedancia son cortocircuitos que presentan corrientes de falta más pequeñas que las que los tradicionales relés detectan. Un ejemplo de este tipo de faltas podría ser la caída de un conductor en una superficie con mala conductividad eléctrica.

El relé cuenta con la capacidad de detectar este tipo de faltas a pesar de la situación presente en la red. A partir de un promedio realizado por el equipo durante el periodo prefalta y a una configuración adaptativa en él, se logra mediante una función lógica la detección de este tipo de eventos.

Grupos de configuraciones En el equipo se encuentran seis grupos independientes para el almacenamiento de posibles configuraciones así como también de lógicas. Mediante el cambio entre un grupo y otro se logran cubrir múltiples situaciones de operación, como por ejemplo el mantenimiento de una subestación, cambio en las cargas o la ocurrencia de una contingencia por nombrar algunas.

Entradas y salidas El equipo estándar cuenta con cinco entradas independientes y dos compartidas, y por el lado de las salidas se tienen tres contactos abiertos para alta corriente, dos contactos abiertos estándares y tres contactos abierto/cerrado compartidos. Pudiendo tener posibilidades para módulos de expansión.

Todas estas variables pueden ser utilizadas para funciones, monitoreo o para indicaciones generales.

Monitoreo de subestación El equipo tiene la capacidad de recibir y transmitir información sobre el estado de la energía segura, proporcionando límites y la lógica necesaria para el disparo de alarmas y control sobre las baterías y su cargador asociado.

Por otro lado, también resulta importante conocer el desgaste que el disyuntor posee. A partir de los contactos auxiliares del mismo y de la corriente de fase, el relé reúne y procesa esta información para poder generar un reporte, el cual puede ser comparado con la ficha del fabricante para evaluar si corresponde realizarle un mantenimiento al equipo.

Monitoreo de variables eléctricas El equipo registra las siguientes variables:

- Tensión de cada fase por separado.
- Corriente de cada fase por separado.
- Potencia activa y reactiva, por fase y las tres fases.
- Energía activa y reactiva, por fase y las tres fases.
- Sincrofasores de la tensión, corriente, frecuencia y su tasa de variación.

Siendo las primeras dos muestreadas a una tasa de 8000 muestras por segundo.

Monitoreo de armónicos Se cuenta con lecturas de las variables armónicas de la red, en particular de la segunda, cuarta y quinta armónica. Dichas componentes pueden ser utilizadas en la lógica del equipo, por ejemplo para la detección de energización y sobreexcitación de transformadores de potencia.

Sincrofasores Es posible obtener mediciones de tensiones y corrientes sincronizados en el formato de la norma IEEE C37.118. Además mediante el software SynchroWAVE se cuenta con un visualizador capaz de presentar ángulos del sistema eléctrico, perfiles de tensión, entre otra información.

Registrador de eventos En función de un disparo interno o externo, el relé es capaz de registrar variables eléctricas como también estados digitales de los equipos o variables del relé. Esto le proporciona al relé SEL-451 la función de registrador digital.

Es posible generar registros en formato COMTRADE con resolución variable entre 1 y 8 kHz y de una duración entre 24 y 0,25 segundos respectivamente.

Capítulo 3

Estudio previo del problema

A los efectos del estudio previo del problema, se analizaron artículos que presentan información sobre los transitorios electromagnéticos que se experimentan al energizar una línea de transmisión. A continuación, se presenta un resumen del estudio “Calculation of switching transients with particular reference to line energisation” [9], el cual analiza los factores que juegan un rol importante al considerar sobretensiones transitorias, las cuales ocurren en la apertura o cierre de una línea.

3.1. Efectos de transitorios electromagnéticos en referencia a energización de líneas de transmisión

3.1.1. Introducción

Para la operación de un sistema de potencia, es importante conocer las condiciones bajo las cuales se pueden experimentar sobretensiones en algún punto del mismo. Estas subidas de tensión suelen ocurrir debido a una operación de apertura o cierre de un disyuntor. Los eventos de sobretensión más significativos cuando se trata de sistemas de alta tensión, se dan cuando se energizan líneas de transmisión, ya que en dicho momento es posible experimentar sobretensiones de hasta cuatro veces la tensión fase neutro del sistema. A continuación, se estudian varias condiciones del sistema que determinan la magnitud de la sobretensión que puede ocurrir.

3.1.2. Energización de líneas de transmisión de alta tensión

La desenergización de una línea o el despeje de un cortocircuito en una o dos fases del sistema, puede causar que las restantes fases queden sometidas a una tensión que puede tomar valores de hasta el pico de tensión fase-neutro del sistema. Por lo tanto, al momento de volver a energizar la línea en este estado, se puede experimentar una sobretensión en el extremo abierto de la línea del orden de 4 pu.

Capítulo 3. Estudio previo del problema

La tensión transitoria depende de la carga residual y en qué punto se encuentre la onda de la fuente en el momento del cierre. Se espera que la máxima tensión en la línea se de cuando la misma es energizada con la tensión pico y de opuesta polarización al de la carga atrapada. Otros factores que pueden afectar a este fenómeno son la impedancia de la fuente, el cierre no simultáneo de las tres fases, la cantidad de compensación de potencia reactiva instalada y las pérdidas del sistema.

A continuación, todos estos factores son estudiados y se muestran los resultados obtenidos de simulaciones realizadas a un sistema de potencia. Se consideran solo los primeros 20 ms del transitorio, ya que luego de este tiempo la evolución de la tensión se ve modificada por las pérdidas resistivas y las que ocurren debido al efecto corona.

Se considera un sistema de transmisión de extra alta tensión de 400 kV, el cual se extiende por 1288 kilómetros y transmite carga principalmente desde una región que cuenta con alta capacidad de generación hacia otra cuya capacidad de generación es comparablemente pequeña. El sistema está dividido en varias secciones de línea, y se pondrá énfasis en la sección del extremo sur que mide 428 kilómetros.

Las líneas pueden ser compensadas por reactores de 400 kV, los cuales pueden ser sacados de servicio. Solamente se analiza el sistema representando el mismo por una sola fase.

Las conclusiones que se presentan a continuación son extrapolables al sistema de 500 kV de UTE.

3.1.2.1. Carga atrapada e impedancia de la fuente

Se energiza la línea de 428 kilómetros en el pico positivo de la fuente de tensión desde una barra infinita. Dicha línea cuenta con una carga atrapada de -1 pu y se desprecian las pérdidas del sistema. El resultado obtenido es el siguiente:

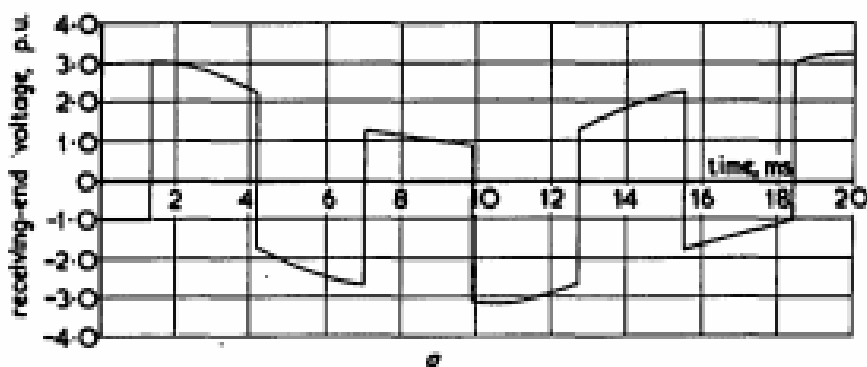


Figura 3.1: Tensión de la línea en su extremo remoto energizada con fuente ideal

3.1. Efectos de transitorios electromagnéticos en referencia a energización de líneas de transmisión

Se observa que la tensión máxima en el extremo remoto es de 3,22 pu, mientras que el del extremo local es de 1 pu dado que la fuente no tiene impedancia.

Si en cambio la línea es energizada desde una fuente puramente inductiva, la sobretensión aumenta. Por ejemplo, si dicha fuente tiene una inductancia de 0,1 H, la evolución de la tensión en el extremo remoto es la siguiente:

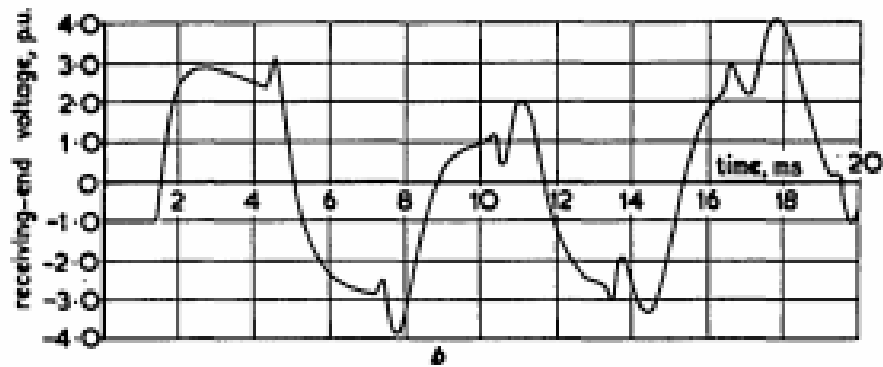


Figura 3.2: Tensión de la línea en su extremo remoto energizada con fuente inductiva

Se puede ver que el voltaje en el extremo remoto aumenta a 4,05 pu. Por otro lado, la tensión del extremo local alcanza un valor de 2,05 pu.

Si ahora consideramos que la línea no tiene carga residual al ser energizada, la tensión en el extremo local aumenta de 1 pu a 1,33 pu al considerar una fuente puramente inductiva, y el del extremo remoto se incrementa de 2,22 pu a 2,56 pu. Esto se observa en las siguientes gráficas, la cuales comparan los voltajes locales y remotos cuando la línea es energizada por una fuente ideal con las tensiones obtenidas con un generador con inductancia de 0,1H:

Capítulo 3. Estudio previo del problema

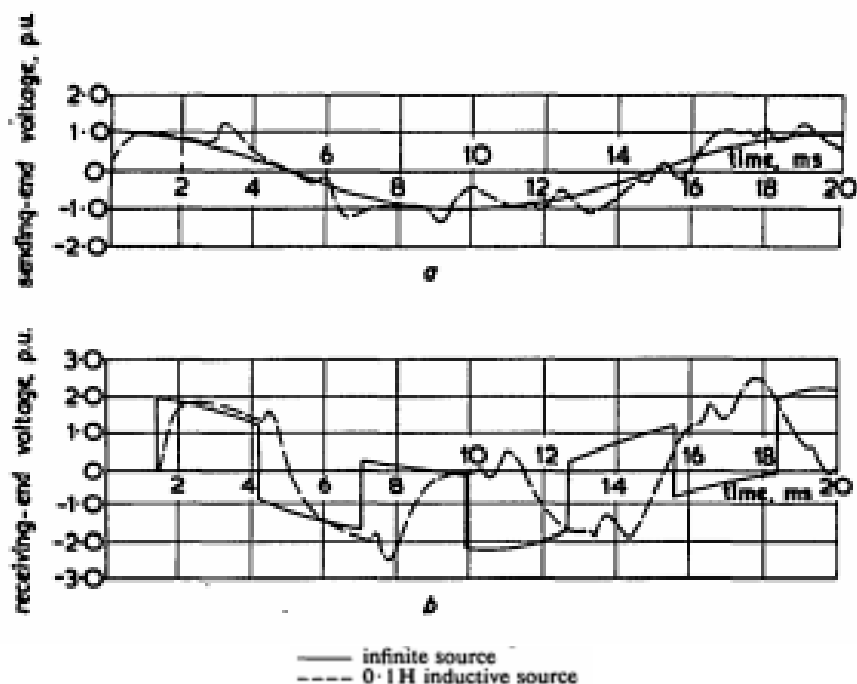


Figura 3.3: Tensión de la línea sin carga atrapada en su extremo remoto y local energizada con fuente ideal e inductiva

A partir de esto, deducimos que la tensión transitoria aumenta con la impedancia de la fuente.

3.1.2.2. Efectos trifásicos

Los resultados presentados fueron obtenidos considerando una sola fase del sistema, y por lo tanto se desprecian los efectos mutuos que existen entre las fases. Las tensiones transitorias podrán ser incrementados dado que las tres fases del disyuntor no cierran en el mismo instante.

3.1.2.3. Efecto de reactores shunt

Se observa que, para fuentes de tensión con alta impedancia, la instalación de reactores shunt ayuda a reducir los voltajes transitorios, y su efecto es mayor si están conectados en el extremo remoto de la línea. En relación a las fuentes con baja inductancia y barras infinitas, el efecto de estos reactores es el de incrementar las sobretensiones.

3.1.2.4. Descarga de carga atrapada

Una línea puede mantenerse cargada por varios segundos luego de su desenergización. Usualmente, la constante de tiempo de la descarga es del orden de 20 a 60 segundos, por lo que la descarga completa llevará entre 2 a 5 minutos. Sin

3.1. Efectos de transitorios electromagnéticos en referencia a energización de líneas de transmisión

embargo, en condiciones climáticas extremadamente secas, dicho proceso puede llevar hasta 15 minutos. Debido a todo esto, es posible que incluso en un cierre manual de la línea, la misma quede con carga atrapada.

Frecuentemente existen otros factores que ayudan a agilizar el proceso de descarga de la línea. Por ejemplo, los disyuntores pueden estar equipados con resistores de apertura. El efecto de esta equipo en el tiempo de descarga depende de la resistencia del propio resistor, el tiempo en el que permanece conectado y la longitud de la línea.

Otro factor que tiene efecto en el proceso de descarga es el producido por los reactores shunt. Cuando esta compensación está instalada, la descarga será de forma oscilatoria, y su frecuencia es determinada por la inductancia del reactor y la capacitancia de la línea. Se observa que la instalación de reactores aporta a disminuir el tiempo de descarga.

3.1.2.5. Pérdidas

En la práctica, las pérdidas también tendrán un efecto en los transitorios de energización. Las pérdidas resistivas causan la atenuación de la onda de tensión debido a la pérdida de energía, y también distorsionan la misma. Generalmente, su resultado neto es el de reducir la tensión transitoria. Sin embargo, el cambio en la frecuencia de la onda puede causar un cambio en la relación de fase entre las ondas que atraviesan la línea, por lo que la tensión también puede verse incrementada en algún punto. Finalmente, las pérdidas debido al efecto corona colaboran para reducir aún más las sobretensiones en los transitorios.

Esta página ha sido intencionalmente dejada en blanco.

Capítulo 4

Conceptos para el desarrollo del algoritmo

Teniendo en consideración que debemos desarrollar una lógica que nos permita detectar cuándo una línea de transmisión entra y sale de servicio, realizamos una búsqueda de artículos que proponen metodológicas de resolución al problema planteado. Nos encontramos con dos que valen la pena destacar debido a su diferencia conceptual. A continuación se presentará un resumen de cada uno de ellos.

4.1. Algoritmo 1

4.1.0.1. Zero-Setting Algorithm for High-Speed Open Line Detection Using Synchrophasors [10]

Desde el surgimiento de relés de protección basados en microprocesadores, se han instalado PMUs (phasor measurement units) en muchos sistemas de transmisión de Norte América, y se han aprovechado los beneficios de los mismos en relación a aplicaciones basadas en sincrofasores (los PMU o sincrofasores son una herramienta utilizada en los sistemas eléctricos de potencia para medir la magnitud y fase de la tensión y corriente en un punto del sistema, cuenta con la característica de ser uno de los métodos que mas valores por segundo arroja y de que además, a estos valores se los asocia con una referencia temporal, la cual es la misma para toda la red, por esto es que se los conoce por sincrofasores). En este artículo se propone un algoritmo para la detección de líneas abiertas que hace uso de esta propiedad de los PMUs.

Capítulo 4. Conceptos para el desarrollo del algoritmo

4.1.0.2. El algoritmo propuesto

Consideremos una red de dos barras como la de la siguiente figura:

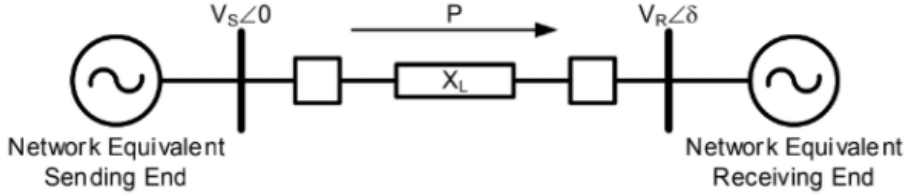


Figura 4.1: Red simplificada entre dos barras

Sabemos que la potencia activa que fluye por una línea de transmisión entre dos barras se rige aproximadamente por la siguiente relación:

$$P = \frac{V_S V_R \sin(\delta_S - \delta_R)}{X_L} \quad (4.1)$$

Siendo V_S y V_R las tensiones en las barras, δ_S y δ_R el ángulo de dichas tensiones, y X_L la reactancia de la línea. La idea detrás del algoritmo es caracterizar y monitorear el salto inicial en la diferencia de ángulo y potencia para determinar el número de líneas en paralelo que salieron de servicio. Con el fin de explicar más en detalle el funcionamiento del algoritmo, es útil definir los siguientes valores:

$$AR = \frac{\text{Valor inmediato del salto de diferencia de ángulo después del evento}}{\text{Diferencia de ángulo antes del evento}} \quad (4.2)$$

$$PR = \frac{\text{Flujo de potencia neto entre las barras antes del evento}}{\text{Flujo de potencia neto entre las barras justo después del evento}} \quad (4.3)$$

Para calcular estos valores, hacemos uso de la ecuación 4.1 y algunas aproximaciones. Suponiendo que la diferencia de ángulo entre las barras no es muy grande y que las tensiones en las terminales se encuentran cerca de sus valores nominales, se tiene que:

$$P_{antes} = \frac{V_S V_R \sin(\delta_{diff})}{X_L} \approx \frac{V_S V_R \delta_{diff}}{X_L} \approx \frac{\delta_{diff}}{X_L} \quad (4.4)$$

Luego es fácil ver que:

$$\frac{P_{antes}}{\delta_{diff \text{ antes}}} \approx \frac{1}{X_L \text{ antes}} \quad (4.5)$$

4.1. Algoritmo 1

$$\frac{\delta_{diff\ despues}}{P_{despues}} \approx X_{L\ despues} \quad (4.6)$$

Por último, la relación definida por el producto de AR con PR nos devuelve el factor por el cual se ha multiplicado la impedancia del sistema luego de la apertura de alguna línea. Por ejemplo, si tenemos dos líneas en paralelo que tienen la misma reactancia, y una de ellas sale de servicio, esperamos que la anterior relación sea cercana a 2.

El algoritmo es supervisado por bits de información de sincrofasores para prevenir falsas indicaciones. Además, cuenta con una lógica de bloqueo que detecta y restringe su operación durante cortocircuitos.

4.1.0.3. Simulación y testeo

El algoritmo fue testado haciendo uso del simulador EMTP (Electromagnetic Transients Program), el cual es capaz de simular un sistema de potencia y su funcionamiento en tiempo real. Se supuso que en cada barra se encuentra disponible un PMU para realizar las mediciones correspondientes.

El sistema de potencia utilizado consistió de 4 subestaciones de 500 kV y 6 subestaciones de 220 kV, las cuales fueron conectadas por medio de líneas de transmisión y transformadores.

Se simularon varios escenarios, en los cuales se imponía la pérdida de una o más líneas en paralelo, y se midieron los valores de potencia y diferencia de ángulo un instante antes y después del evento por medio de muestras de sincrofasores. Luego se calcularon los factores AR y PR y finalmente se obtuvo su producto.

Los resultados obtenidos mostraron que el algoritmo es muy efectivo a la hora de determinar el número de líneas que salieron de servicio, y puede hacerlo en menos de 60ms en sistemas de 50 Hz. Los pequeños errores obtenidos en los resultados se pueden atribuir a los cambios en las tensiones de las barras un instante antes y después del evento, ya que dicho salto no ha sido tenido en cuenta en el desarrollo del algoritmo.

4.1.0.4. Conclusiones

El artículo ha presentado un algoritmo que utiliza mediciones de sincrofasores para detectar una condición de línea abierta con una alta rapidez y seguridad. Comparando con otros métodos existentes para la detección del estado de líneas de transmisión, el algoritmo propuesto cumple con las siguientes ventajas:

Capítulo 4. Conceptos para el desarrollo del algoritmo

Velocidad de detección: el algoritmo usa mediciones inmediatas luego de un evento para detectar la condición de línea abierta. Además es supervisado por bits de información de sincrofasores y cuenta con una lógica de bloqueo para seguridad adicional.

Robustez: el algoritmo elimina la posibilidad de errores humanos al no requerir parámetros de ajuste

Fiabilidad: el algoritmo utiliza solo dos puntos de medición, lo que reduce el número de potenciales puntos de falla.

4.2. Algoritmo 2

4.2.0.1. Fast topology detection based on open line detection relays, a strategic function in power system protection [11]

En el momento de la realización de este estudio ya se tiene en operación en las líneas de transmisión de Hydro-Quebec “detectores de línea abierta” . En este estudio se plantean las principales características de la nueva versión de estos detectores, denominado DLO. Hydro-Québec ya tiene esta función implementada para sus líneas de transmisión de 735 kV, pero decide desarrollar una nueva versión que será explicada en este estudio.

4.2.0.2. El problema de la detección de líneas abiertas

El DLO es un dispositivo encargado en la detección del estado de las líneas (abiertas o cerradas) y debe de contar con las características ya planteadas: velocidad, seguridad y confiabilidad, de acuerdo a las siguientes especificaciones:

Velocidad: Deberá detectar y reportar el cambio en su línea en menos de 35ms

Seguridad:

No se deberá reportar un cambio de estado en ninguna de las siguientes situaciones:

- Bajo o cero nivel de transferencia de potencia
- Distorsión de tensión y corriente debido a una falta
- Rápida variación del flujo de potencia
- Inversión del flujo de potencia
- Variaciones de potencia
- Resonancia Subsíncrona resultado del paralelo entre las capacitancias series con los reactores en paralelo.
- Presencia de armónicos

4.2. Algoritmo 2

Confiabilidad:

El dispositivo deberá ser capaz de actuar en los siguientes escenarios:

- Apertura del extremo remoto de la línea
- Cierre del extremo local cuando el extremo remoto se encuentra abierto
- Cerrado o apertura de la línea en presencia de un reactor en paralelo

En la Figura 4.2 se observa la configuración de la línea en la subestación, el transformador de tensión capacitivo CVT y los transformadores de corrientes (CT1, CT2 para los disyuntores y CT3 para el reactor en paralelo) , estas cuatro mediciones son las entradas para el dispositivo DLO.

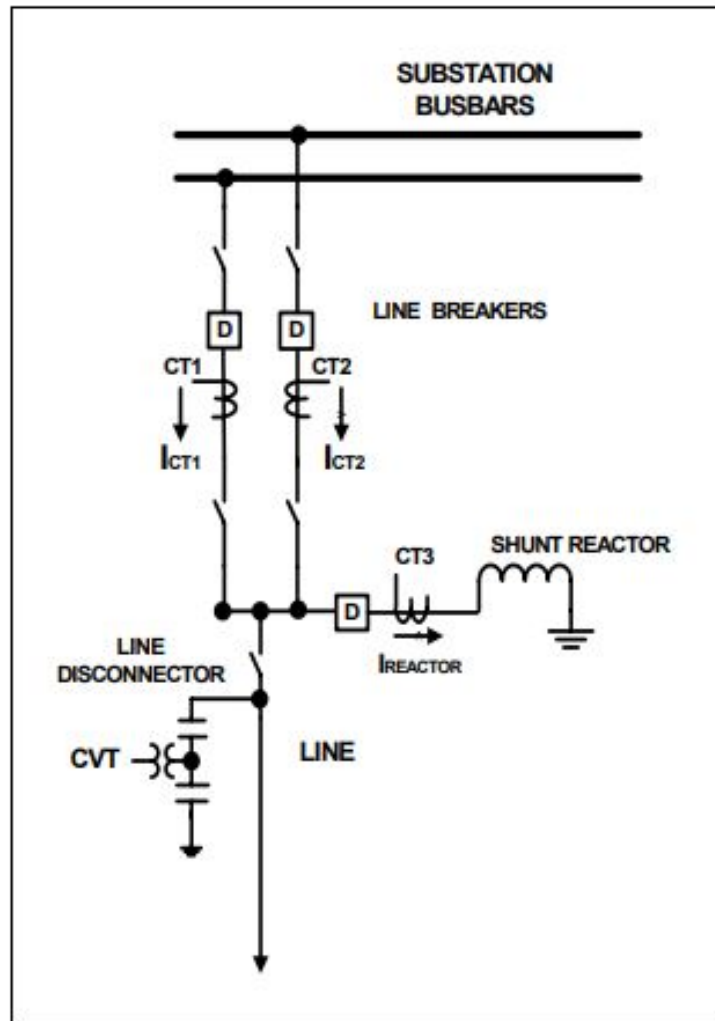


Figura 4.2: Configuración de la línea en la subestación

Capítulo 4. Conceptos para el desarrollo del algoritmo

La corriente por el reactor en paralelo es necesaria para así evitar la falsa detección (de línea cerrada) cuando el interruptor de la línea se encuentre abierto, y los disyuntores de la línea cerrados para así alimentar al inductor.

4.2.0.3. El DLO existente

El DLO actualmente en operación hace uso de tres métodos para la detección de líneas abiertas, siendo estos:

- Señales de disparo de los relés de protección de la línea
- Señales asociadas a los contactos auxiliares de disyuntores o seccionadores
- Bajas medidas de corriente

El primer método consiste en el monitoreo de todas las señales de protección que podrían enviar la orden para abrir la línea. En el caso de un comando manual para la apertura de la línea entrarían en funcionamiento los restantes dos métodos. En la situación de que la línea esté sujeta a flujos de potencia muy bajos o inversos, el método de detección estará ligado al segundo método. Para líneas en las que el flujo de potencia no tiene una dirección altamente definida el método tres de detección será el utilizado. La línea es considerada abierta cuando la corriente (potencia activa) por ella toma un valor menor a un mínimo especificado.

Estos métodos permiten la detección de la apertura de la línea en el extremo local, siendo necesario un segundo dispositivo DLO (con un enlace de telecomunicaciones) en el extremo remoto para la detección en ambos extremos.

4.2.0.4. Descripción funcional del nuevo DLO

El diagrama funcional del DLO es el mostrado en la Figura 4.3. Contando con 4 grandes bloques:

- Unidad de adquisición: filtro anti-alias con 400 Hz de frecuencia de corte y frecuencia de muestreo de 32 puntos por ciclo
- Filtro Kalman: unidad para la estimación del fasor
- Unidad de pre procesamiento: calcula y extrae las características que serán usadas en la lógica difusa (fuzzy logic)
- Unidad lógica: procesa la salida y elige la decisión a tomar

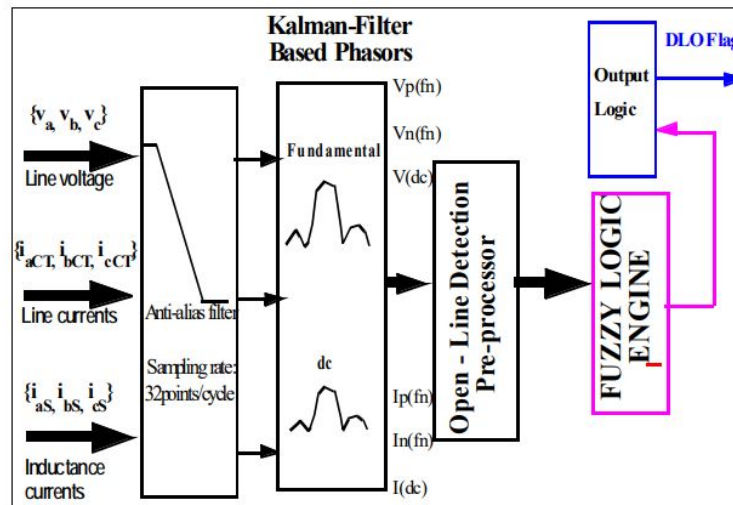


Figura 4.3: Diagrama de bloques funcional

El filtrado de Kalman presenta superioridad frente a la transformada discreta de Fourier en la capacidad de proporcionar la descomposición espectral de la señal en más frecuencias que la armónica y sus fundamentales. Gracias a esta característica es que este filtrado en sí ya resulta ser una herramienta de autodiagnóstico, aprovechando tanto la componente de secuencia negativa en su fundamental como en su frecuencia de resonancia, que podrían aparecer transitoriamente cuando la línea es abierta en ambos extremos, mientras que el inductor en paralelo está operativo.

4.2.0.5. Abriendo una línea: estado transitorio

El corazón del DLO es el denominado *Delta-filter*, que tiene una correlación física durante la desconexión de la línea. Se corresponde aproximadamente con la derivada de la potencia activa y reactiva de la secuencia positiva durante una ventana de tiempo adecuada.

A partir de observaciones empíricas, se puede deducir que la apertura de una línea mediante un disyuntor provoca un aumento “grande” del valor máximo de ΔP , mientras que una inversión de flujo produce una rampa comparativamente más lenta y que posee un valor máximo menor.

4.2.0.6. Sistema de decisión difusa del DLO

A pesar de que una lógica booleana es capaz de lograr tiempos y una confiabilidad aceptable, puede provocar conflictos en situaciones no del todo claras. Por ejemplo, durante la energización de una línea que no posee carga conectada (línea abierta), los transformadores de tensión capacitivos inducen un transitorio electromagnético, el cual podría provocar que la transferencia de potencia activa

Capítulo 4. Conceptos para el desarrollo del algoritmo

no sea cero y por tanto la línea podría ser vista como cerrada.

Es por este tipo de situaciones que se opta por una lógica difusa, la cual cuenta con las siguientes interesantes propiedades:

- Las decisiones de disparo están basadas en distintos criterios los cuales cuentan con pesos modificables
- La incertidumbre con respecto a las señales y la configuración se modela cuantitativamente
- El retardo del disparo depende de la cantidad de información proveniente de los relés de medidas, y a través de ellos de la perturbación analizada por el relé.

La estructura general de este tipo de lógica difusa es la siguiente:

- Bloque difusor
- Bloque de inferencia
- El Bloque desdifusor

El primer bloque constituye el paso previo a cualquier tipo de lógica difusa. A cada variable de entrada (consistentes en valores concretos) de este bloque se le será asignado un grado de pertenencia a ciertos conjuntos difusos (como por ejemplo “Pequeño”, “Normal”, “Grande”) mediante ciertas funciones características asociadas a cada conjunto difuso.

El segundo bloque es el encargado de realizar la lógica propiamente dicha, este bloque relaciona los conjuntos difusos de entrada y de salida mediante cierto tipo de reglas definidas. Por último el bloque tres será el encargado de convertir el conjunto difuso de salida en un valor en concreto para esa variable de salida.

El juego de reglas en esta lógica difusa operan siguiendo principios físicos básicos. Por ejemplo podemos definir reglas de “confianza” específicamente para el caso de la línea abierta, como también reglas de “seguridad” para la línea cerrada.

Ej:

- Seguridad: if (ActivePower is not SMALL) LINE is CLOSED
- Confianza: if (DeltaP is BIG) LINE is OPEN

El algoritmo contiene 12 reglas, divididas de manera equitativa entre reglas para la detección de la línea abierta como de la línea cerrada. En cada una de las situaciones las reglas pueden ser clasificadas entre reglas estacionarias o transitorias.

4.3. Estrategia a seguir

En cuanto al primer algoritmo, a pesar de que su funcionamiento no permite detectar qué líneas salieron de servicio, se propone una estrategia que es capaz de reconocer la cantidad de líneas que se han perdido. Las ideas conceptuales del mismo podrían ser de utilidad para el algoritmo a desarrollar, pero por la razón anteriormente planteada no nos centraremos en el mismo para nuestro proyecto.

Conceptualmente el segundo algoritmo presenta una propuesta interesante para la resolución del problema. Cabe destacar que este algoritmo utiliza una lógica difusa, la cual puede ser una adición interesante a nuestro proyecto, ya que propone un grado mayor de confiabilidad frente a una lógica booleana. Si bien su funcionamiento está orientado hacia un sistema de extra alta tensión de 735 kV, la lógica propuesta puede ser extrapolada a una red de 150 kV.

Una vez comenzado el desarrollo del algoritmo llegamos a las siguientes conclusiones. Por un lado, luego de haber ahondado aún más en la implementación de una lógica difusa, concluimos que su uso iba a resultar en un mayor grado de complejidad para un rédito no significativo. Por otro lado, a partir de las funciones implementadas que se describen en el capítulo 6, no fueron necesarias las ideas planteadas en los anteriores algoritmos.

Esta página ha sido intencionalmente dejada en blanco.

Capítulo 5

Modelado y simulaciones de la red

5.1. Modelado de la red

En primer lugar, se presenta una breve descripción del software ATP, el cual fue utilizado para modelar la red eléctrica y realizar simulaciones sobre la misma. La información fue extraída de las siguientes fuentes [12] [13]

5.1.0.1. ATP

El software de modelado utilizado fue **ATP** (**A**lternative **T**ransient **P**rogramm), el mismo es un software capaz de simular fenómenos electromagnéticos y electro-mecánicos de sistemas eléctricos. Mediante la resolución de las ecuaciones diferenciales correspondientes al sistema eléctrico planteado, este software nos permite la visualización de las variables eléctricas de interés y la extracción de datos de la simulación.

5.1.0.2. ATPDraw

Es una herramienta que permite mediante el manejo del mouse, la construcción y diseño digital de redes eléctricas (de distintos grados de complejidad) para su posterior procesamiento mediante el software ATP.

Esta herramienta presenta un extenso abanico de componentes eléctricos, los cuales son utilizados para la construcción de sistemas eléctricos. Asimismo el usuario tiene la posibilidad, mediante el lenguaje MODELS, de implementar modelos externos a los incluidos en el programa.

5.1.0.3. Red eléctrica

La red eléctrica Uruguay está conformada por líneas de transmisión de 500 kV, 230 kV , 150 kV y 63 kV. A continuación se presenta un mapa de Uruguay en el que se puede ver la distribución geográfica de tales líneas.

Capítulo 5. Modelado y simulaciones de la red

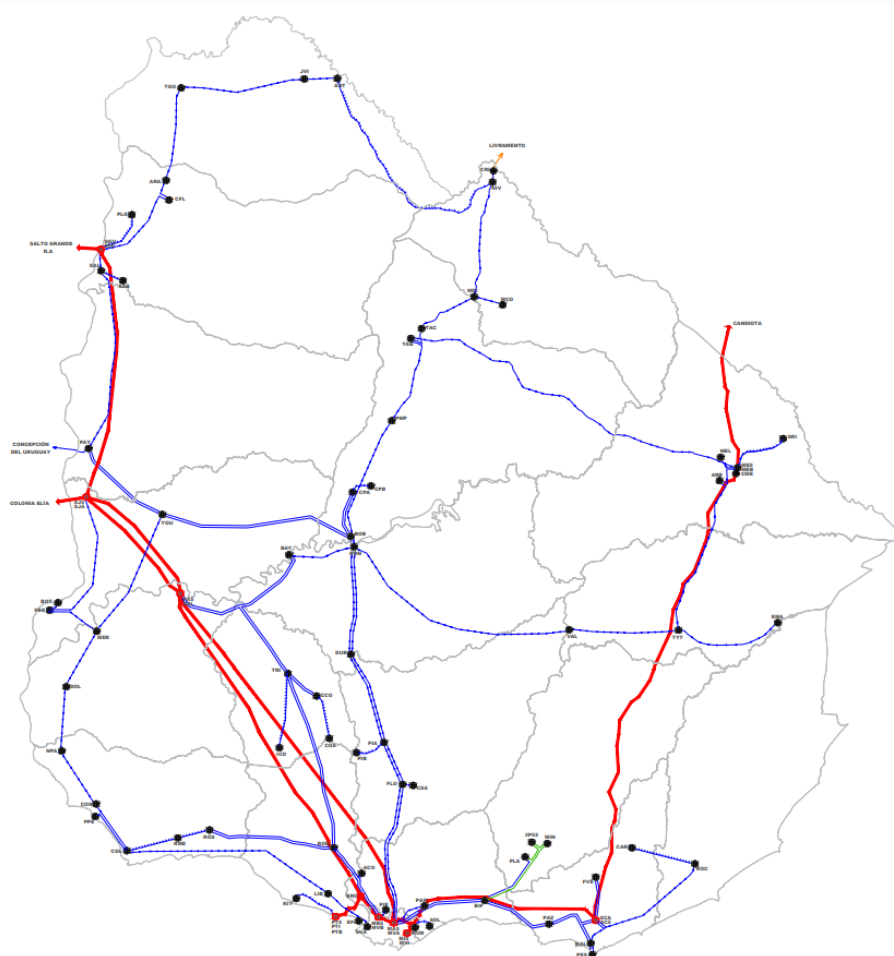


Figura 5.1: Mapa eléctrico de Uruguay

Referencias de la figura 5.1:

- Rojo: correspondiente a líneas de 500 kV
- Azul: correspondiente a líneas de 150 kV
- Anaranjado: correspondiente a líneas de 230 kV
- Verde: correspondiente a líneas de 63 kV

Para el comienzo del presente proyecto se comenzó desarrollando un extenso modelado de la red de 150kV de Uruguay, a partir de los datos provistos por UTE [14] .

En la figura 5.2 se presentan los datos para una línea en particular.

5.1. Modelado de la red

Fase	Resistencia DC [ohm/km]	Diámetro exterior [cm]	Distancia Horizontal [m]	Altura en la torre [m]	Altura mitad del vano [m]
1	0.222	1.645	-2.3	18.355	13.355
2	0.222	1.645	2.4	16.85	11.85
3	0.222	1.645	-2.5	15.35	10.35
0	4.63	0.794	0	22.7	19.7

Figura 5.2: Datos de línea

En primer lugar se exponen la cantidad de fases (1,2,3) y si existe o no hilo de guarda (0). En la siguientes columnas se indica, la resistencia DC del conductor o hilo de guarda expresado en Ohmios por kilómetros y el diámetro exterior de cada conductor. Por último, las demás columnas se corresponden a la disposición física de los conductores en su respectiva torre, para la mejor interpretación de estos últimos datos se presenta la figura 5.3.

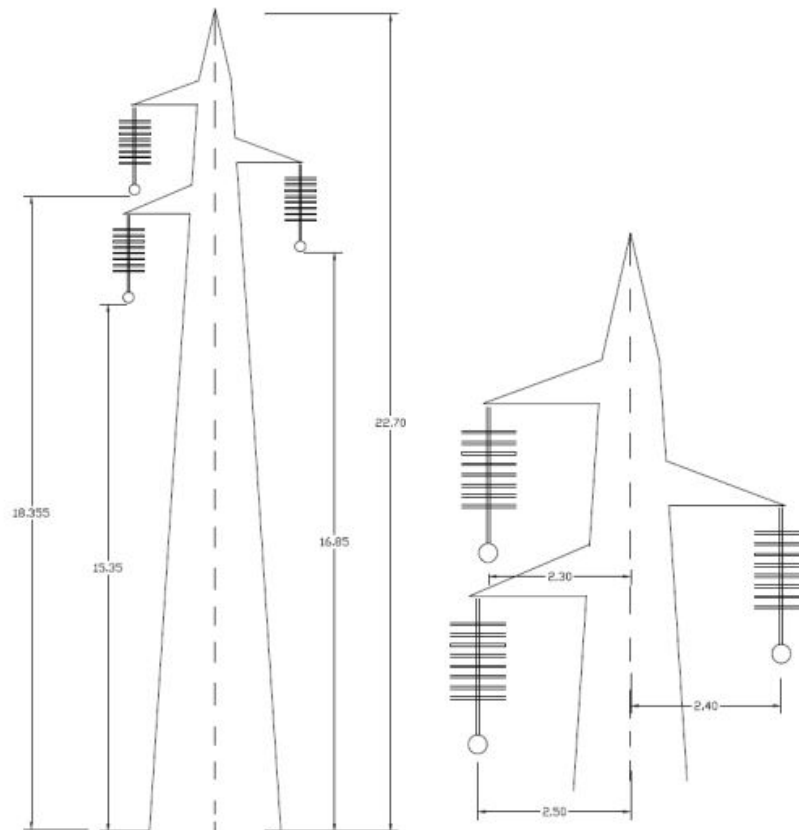


Figura 5.3: Medidas de torre

Finalmente, el último dato a explicitar es la cantidad de transposiciones que sufre la línea en su trayecto, al igual que la distancia entre cada cambio, figura 5.4

	Tramo 1	Tramo 2	Tramo 3	Tramo 4
1	B	C	A	B
2	A	B	C	A
3	C	A	B	C

TRASPOSICIONES LIB-COL

- Tramo 1
 - Longitud: 1,2 km
- Tramo 2
 - Longitud: 43,4 km
- Tramo 3
 - Longitud: 41,7 km
- Tramo 4
 - Longitud: 36,7 km

Figura 5.4: Tramos de línea LIB-COL

Dichas trasposiciones fueron realizadas manualmente a partir de bloques diseñados para ello.

Finalmente, a partir de lo mencionado en el documento provisto por UTE ([14]) y dado que el software ATP no cuenta con el modelo Wideband, se utilizaron para cada tramo los siguientes modelos:

- Tramo menor a 6 km: Se utilizó el modelo PI

- Tramo mayor a 6 km: Se utilizó el modelo J.Martí

Una vez realizado el modelado completo de la red de 150kV se decidió identificar un anillo cerrado para realizar las simulaciones necesarias. Consideramos la red eléctrica ilustrada en la figura 5.5, concentrando el estudio en la línea Libertad - Colonia (LIB-COL).

5.1. Modelado de la red

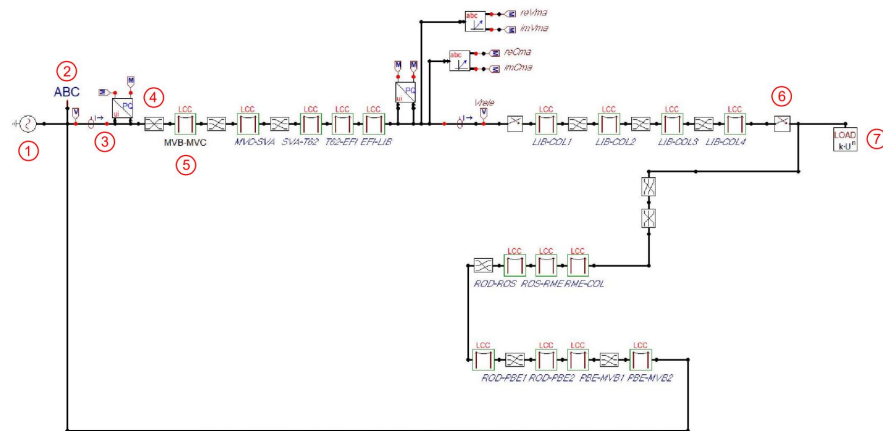


Figura 5.5: Circuito general utilizado

Referencias de la figura 5.5:

1. Generador de tensión compuesta de 150 kVrms
2. Referencia de orden de fases de la terna
3. Medidor de tensión, corriente, potencia activa y reactiva
4. Bloque de trasposición de fases
5. Modelo de línea de transmisión
6. Switch trifásico controlado por tiempo
7. Carga

En la siguiente sección se presentan distintas simulaciones de esta parte de la red de 150 kV, las cuales fueron utilizadas en MATLAB para verificar el correcto funcionamiento del algoritmo.

A continuación se describen algunas de estas simulaciones y se presentan los resultados obtenidos de las siguientes magnitudes:

1. Módulo del fasor de tensión fase-tierra en rms por fase
2. Módulo del fasor de la corriente en rms por fase
3. Potencia activa trifásica
4. Potencia reactiva trifásica
5. Ángulo entre tensión y corriente por fase

Dichas magnitudes fueron relevadas con los medidores de la figura 5.5 que se encuentran al comienzo de la línea Libertad-Colonia. Pueden observarse los resultados de simulaciones adicionales en el Apéndice A.

5.2. Simulaciones de la red

5.2.1. Caso línea abierta

5.2.1.1. Energización de la línea abierta, cierre en extremo local

En primer lugar, se simuló la energización de la línea Libertad-Colonia con su extremo remoto (Colonia) abierto. Para ello se utilizó el siguiente circuito:

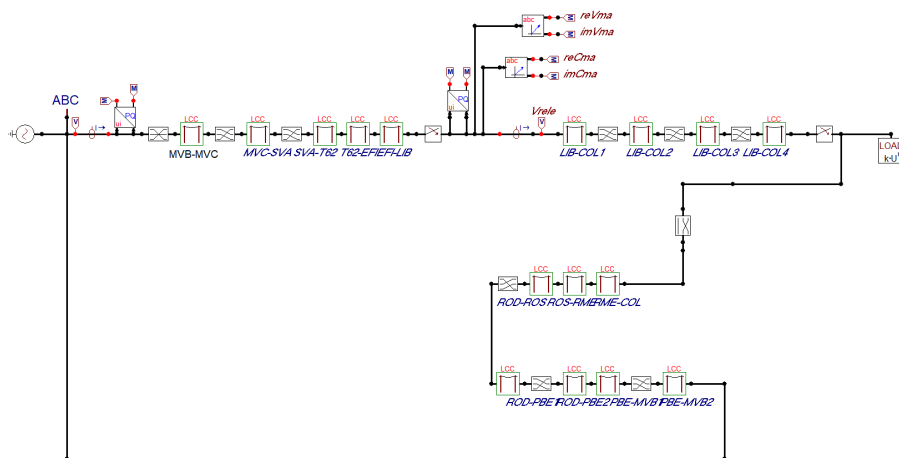


Figura 5.6: Simulación de Energización con Línea Abierta en extremo remoto

Tal como se observa en la figura 5.6, los switches al comienzo y final de la línea son los que nos permiten modelar la energización. El switch ubicado en Colonia se encuentra siempre abierto, mientras que el de Libertad comienza abierto y a los 0,1 segundos se cierra. A continuación se presentan los resultados.

5.2. Simulaciones de la red

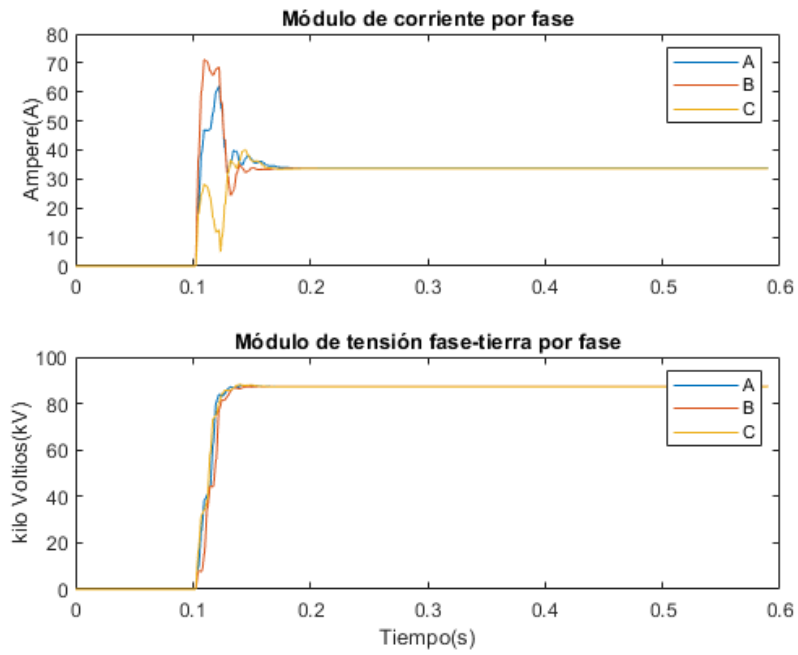


Figura 5.7: Módulo de corriente y tensión

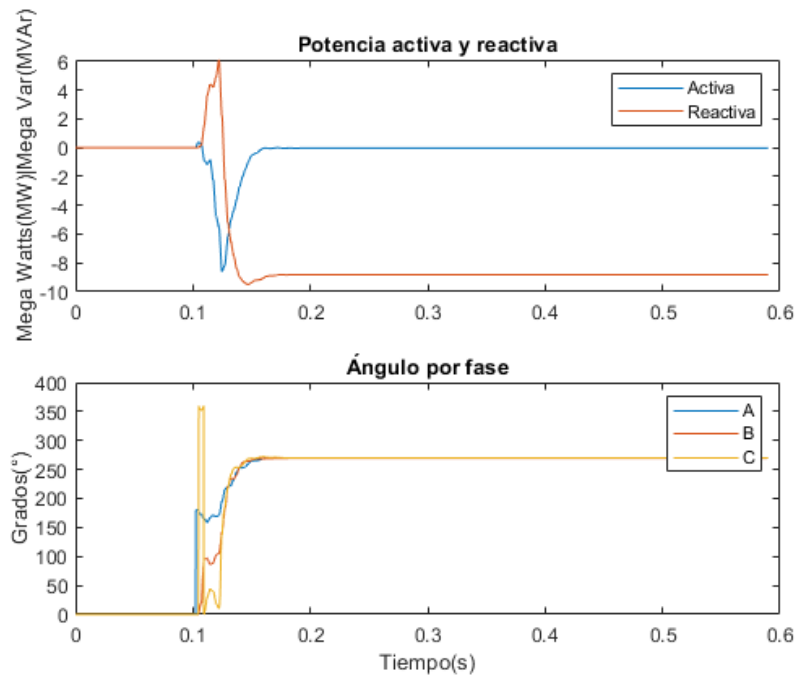


Figura 5.8: Potencia activa, reactiva y ángulo

El efecto de la energización se ve claramente en las figuras 5.7 y 5.8. A los 0,1 segundos, momento en el cual se cierra el switch, se observa un pico de corriente,

Capítulo 5. Modelado y simulaciones de la red

lo cual es de esperarse debido al efecto inductivo de la línea. También se aprecia que la potencia activa y reactiva se estabilizan en sus valores de vacío luego de la energización, lo cual tiene sentido ya que la línea está abierta en su extremo remoto.

Tal como se observa en la figura 5.7, la corriente es nula al comienzo de la simulación debido a que la línea se encuentra desconectada en ambos extremos. Luego del cierre del switch ubicado en Libertad, se obtiene una corriente de vacío de 33,5 A. Análogamente, la tensión también es nula antes de la energización. Después de esto, se aprecia un valor de tensión de $\frac{150kV}{\sqrt{3}}$ en el extremo de Libertad.

Adicionalmente, en la figura 5.8 se observa una potencia activa en vacío de 28475 W y una reactiva en vacío de 8,7 MVAR. Finalmente, en dicha imagen también se aprecia que los ángulos de las tres fases se estabilizan en un valor cercano a los 270 grados, lo cual es coherente con el hecho de que la potencia activa es despreciable en comparación con la reactiva.

5.2. Simulaciones de la red

5.2.1.2. Desenergización de la línea abierta, apertura en extremo local

Análogamente al caso anterior, se utilizó el circuito de la figura 5.6 para simular la desenergización de la línea con su extremo remoto abierto. Es decir, al comienzo de la simulación el switch de Libertad se encuentra cerrado, y a los 0,2 segundos se abre.

En primer lugar, en las figuras 5.9 y 5.10 se observa que hasta los 0,2 segundos la potencia activa, reactiva y la corriente toman los valores vistos en la simulación anterior. Luego de la apertura del switch, estas magnitudes se vuelven nulas, ya que la línea queda abierta en ambos extremos. En cuanto al módulo de la tensión, se aprecia un pico en el momento de la desenergización y después también pasa a ser nulo. Respecto al ángulo, se observa un comportamiento análogo a la simulación anterior antes de la apertura del switch. Luego de esto, se estabiliza en el entorno de los 180° , ya que tanto la potencia activa como reactiva son aproximadamente nulas.

Capítulo 5. Modelado y simulaciones de la red

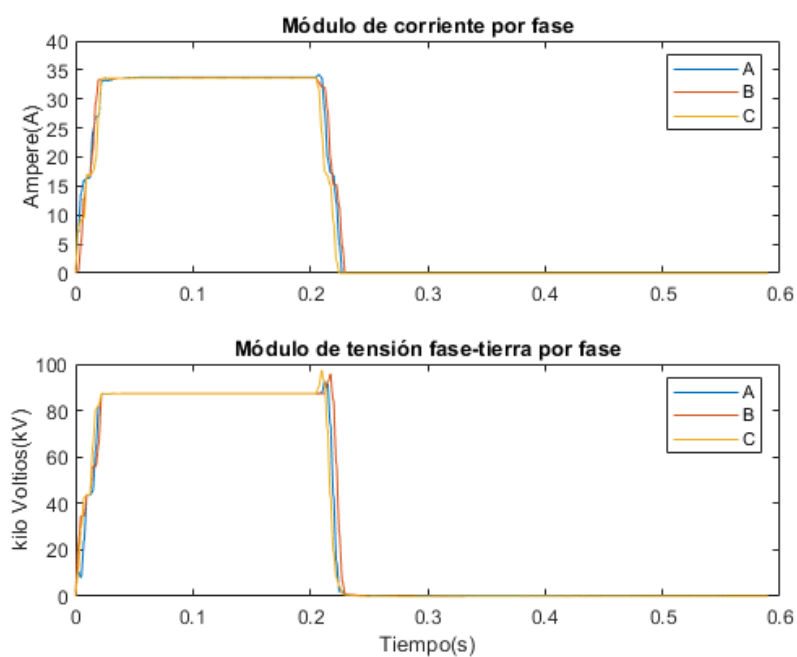


Figura 5.9: Módulo de corriente y tensión

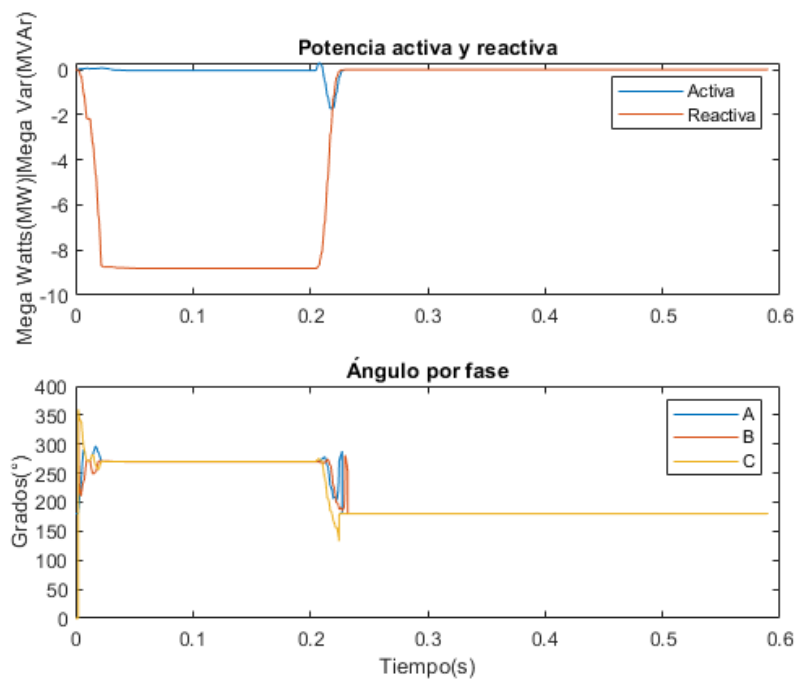


Figura 5.10: Potencia activa, reactiva y ángulo

5.2. Simulaciones de la red

5.2.1.3. Desenergización y energización de la línea abierta, cierre y apertura en extremo local

En esta simulación presentamos una energización, desenergización y una posterior y rápida re-energización. El circuito en cuestión es el siguiente.

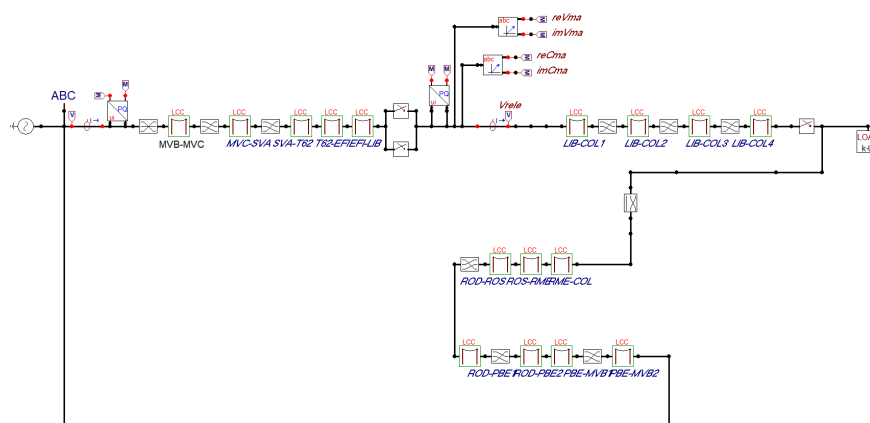


Figura 5.11: Circuito de Simulación Desenergización-Energización

Tal como se observa en la figura 5.11, se modificó el circuito original agregándole un switch en paralelo al que se encuentra en Libertad. Uno de ellos comienza cerrado y se abre a los 0,2 segundos, mientras que el otro empieza abierto. A los 0,3 segundos, este último se cierra, completando el proceso deseado. El switch de Colonia se mantiene abierto todo el tiempo.

En las figuras 5.13 se puede ver que al comienzo de la simulación las potencias toman sus valores de vacío vistos anteriormente. Cuando se produce la desenergización, se vuelven nulas y al energizar alcanzan nuevamente los niveles de vacío. Lo mismo ocurre con la corriente, figura 5.12, la cual presenta un pico significativo en la reconexión. En cuanto al módulo de la tensión, se mantiene constante en $\frac{150kV}{\sqrt{3}}$ cuando la línea esta energizada, luego se vuelve nula, y posteriormente retorna a su valor anterior. Los picos que se observan en el instante de la energización (0,3 segundos) son mayores que los vistos en simulaciones anteriores, este efecto se debe a que la línea quedó con carga atrapada cuando se la desenergizó, lo cual acentúa el efecto transitorio de la energización, tal como fue visto en el capítulo de estudio del problema. Respecto al ángulo, cuando la línea se encuentra energizada observamos el mismo valor ángulo de las simulaciones anteriores. Durante la desconexión se observa un ángulo de 180 grados, lo cual es coherente con lo visto en las secciones anteriores.

Capítulo 5. Modelado y simulaciones de la red

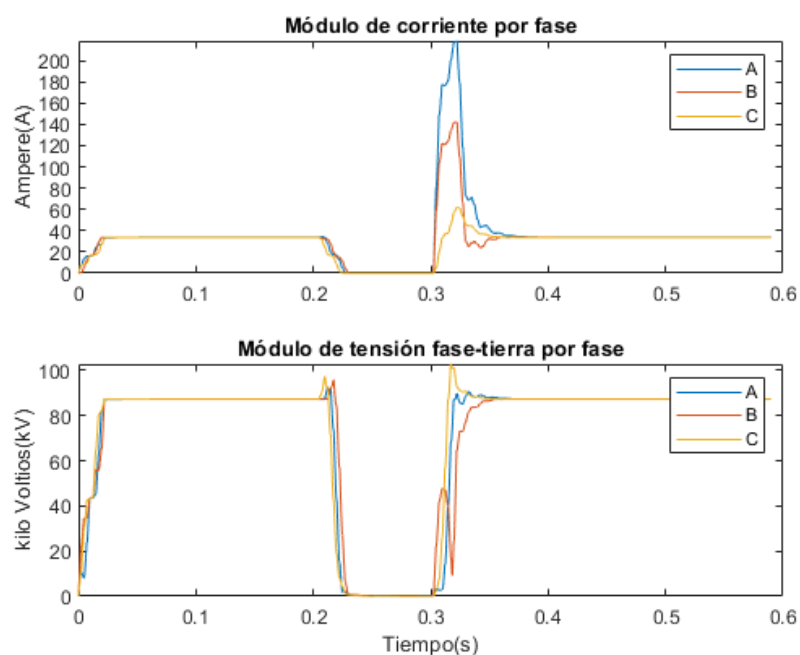


Figura 5.12: Módulo de corriente y tensión

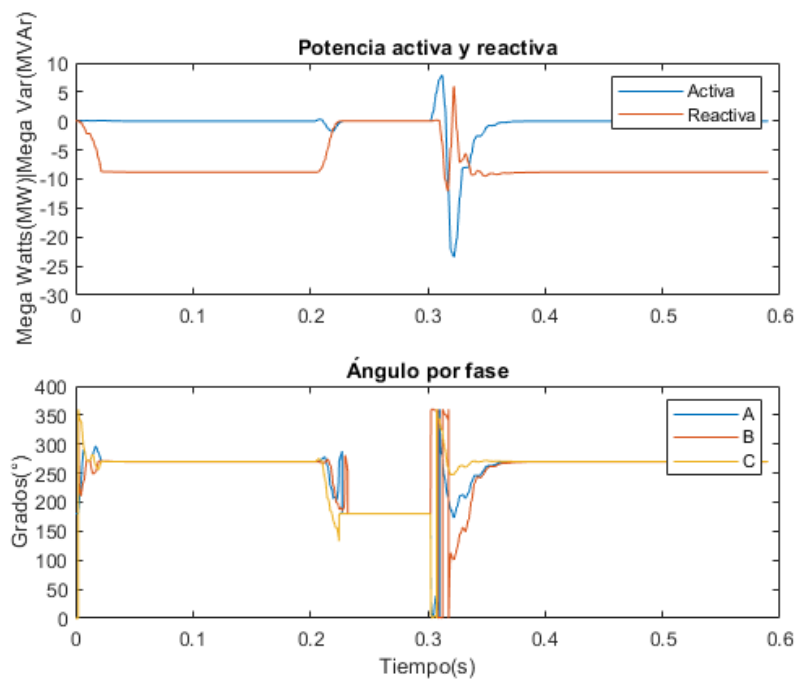


Figura 5.13: Potencia activa, reactiva y ángulo

5.2.2. Caso línea con carga

En las siguientes simulaciones se estudia la energización y desenergización para la línea con carga nominal y con una carga pequeña. En todos los casos, la carga está ubicada en Colonia.

Establecemos como carga nominal y carga pequeña a los siguientes valores de potencia:

- Carga nominal: conociendo que la corriente nominal de la línea es $328A$ en invierno y $250A$ en verano y asumiendo un factor de potencia de $0,95$ inductivo, se determinó un valor para la carga tal que la corriente por la línea se encuentre en un valor intermedio a los mencionados. La potencia activa de la carga es de $195MW$ y la reactiva es $64MVAr$.
- Carga pequeña: A partir de la carga nominal, fijamos como carga pequeña a una de 10% del valor de la primera, obteniéndose una carga de potencia activa $19,5MW$ y reactiva $6,4MVAr$.

Ambas cargas fueron modeladas como de corriente constante.

5.2.2.1. Energización con carga nominal, cierre en extremo remoto

Simulamos la energización de la línea Libertad-Colonia, presentando en su extremo remoto (Colonia) la carga nominal de la línea. Para esta situación se hizo uso del circuito de la figura 5.6. A diferencia de la sección 5.2.1.1, mediante el switch ubicado en Colonia se realizó la conexión de la carga.

La simulación comienza con el switch de Colonia abierto hasta el segundo $0,1$, momento en el que este se cierra conectando la carga.

En la figura 5.15 observamos el comportamiento esperado. La potencia activa presenta su valor de vacío previo a la conexión de la carga y una vez que la conexión ocurre, vemos una oscilación de pequeña duración y posteriormente el asentamiento en la potencia activa solicitada por la carga. Sobre la potencia reactiva, vemos un comportamiento totalmente análogo. El ángulo previo a la conexión de la carga corresponde al visto en la simulación de la sección 5.2.1.2, una vez conectada la carga esta magnitud decrece de manera precipitada a su valor de régimen de 17° .

En referencia a la corriente y tensión, figura 5.14, previo a la conexión la corriente toma su valor de vacío, presenta una rápida oscilación en los instantes posteriores y luego se asienta en el valor de corriente que consume la carga. En cuanto a la tensión, observamos que antes de la conexión la línea se encuentra energizada con su tensión nominal y luego del cierre apreciamos una disminución en su módulo, debido a la caída de tensión provocada por el flujo de la corriente.

Capítulo 5. Modelado y simulaciones de la red

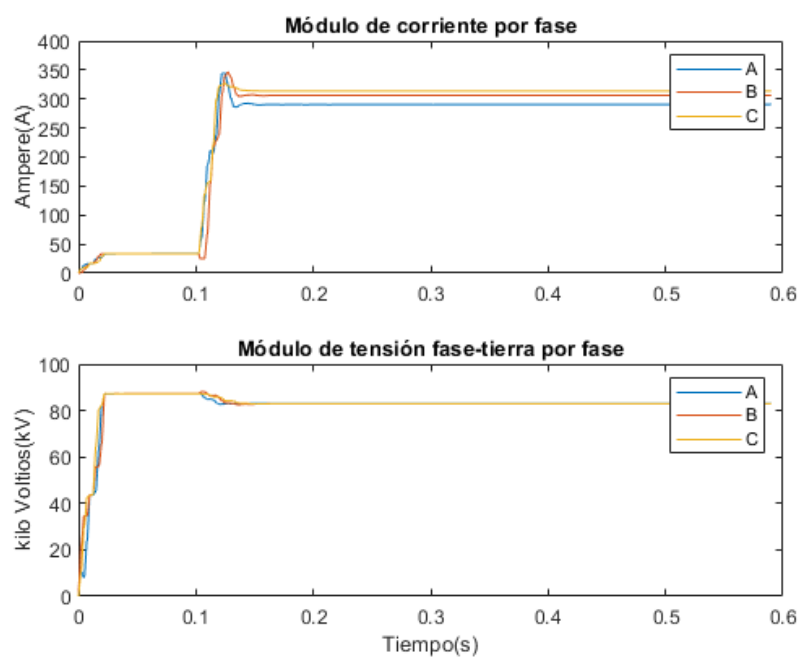


Figura 5.14: Módulo de corriente y tensión

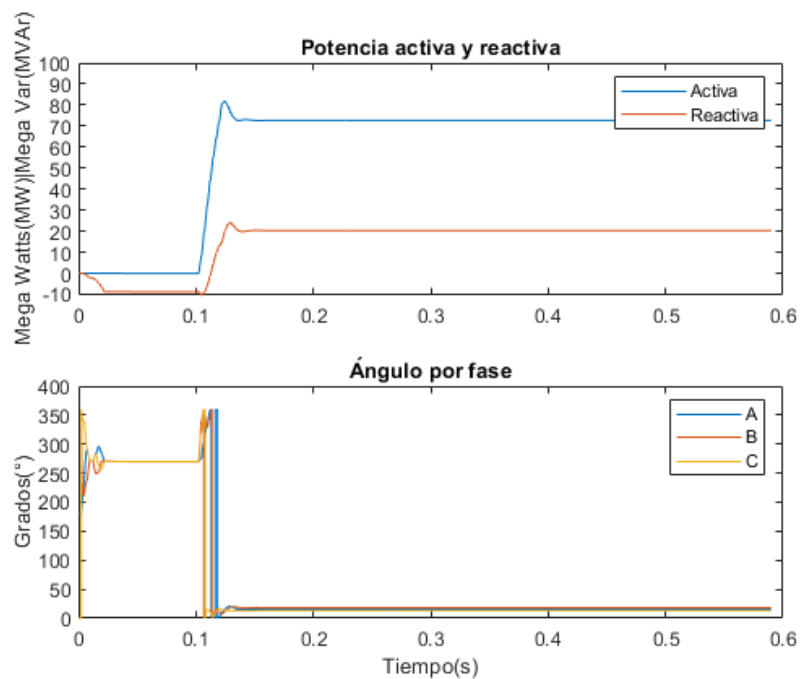


Figura 5.15: Potencia activa, reactiva y ángulo

5.2. Simulaciones de la red

5.2.2.2. Energización con carga nominal, cierre en extremo local

En esta simulación se buscó presentar la situación donde el disyuntor de Colonia se encuentra siempre cerrado y quien cierra el anillo es el disyuntor ubicado en Libertad. El cierre del switch de Libertad sucede en el segundo 0,1.

Con respecto a la potencia activa y reactiva, figura 5.17, la principal diferencia con la simulación de la sección 5.2.2.1 es que hasta los 0,1 segundos ambas magnitudes son nulas, esto se debe a que el interruptor está en el extremo local, y al estar los medidores de potencia ubicados aguas abajo del switch, los mismos relevan valores nulos. Los ángulos presentan una diferencia a los de la sección nombrada, en este caso no se tiene una situación en vacío, sino que se transiciona de una situación sin flujo de potencia a una para alimentar la carga conectada, por ende el ángulo previo a la conexión es 180 grados

De igual manera, la corriente vista por los medidores es nula antes del cierre, figura 5.16, mientras que la tensión presenta un valor menor a $\frac{150kV}{\sqrt{3}}$ debido a la caída de voltaje producida por el flujo de corriente por la rama inferior del anillo. Luego del cierre, el módulo de la corriente se asienta en los valores de consumo de la carga y el de la tensión toma un valor cercano a los $\frac{150kV}{\sqrt{3}}$.

Capítulo 5. Modelado y simulaciones de la red

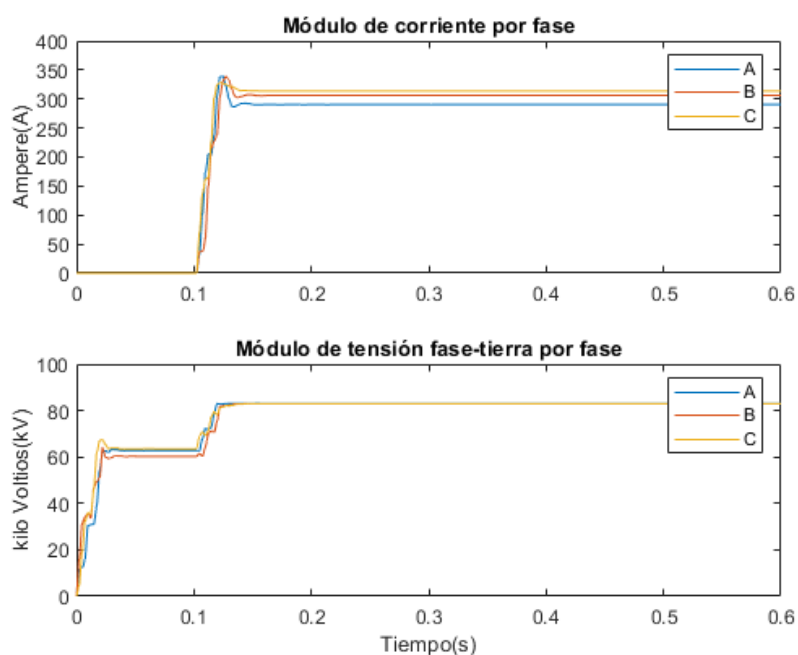


Figura 5.16: Potencia activa vista por el relé cuando ocurre la energización de la línea (con carga nominal) en su extremo local

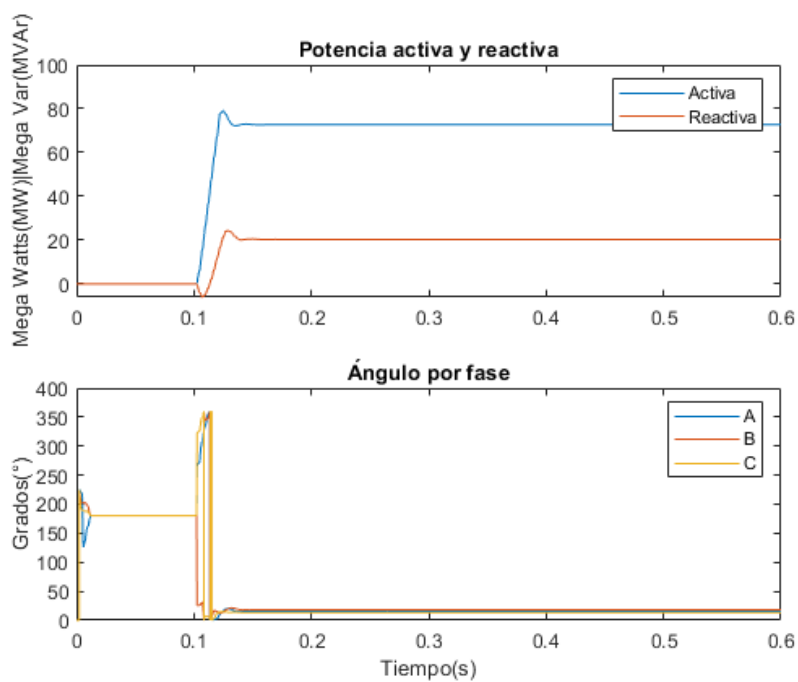


Figura 5.17: Potencia reactiva vista por el relé cuando ocurre la energización de la línea (con carga nominal) en su extremo local

5.2. Simulaciones de la red

5.2.2.3. Energización con poca carga, cierre en extremo local

Esta simulación es análoga a la de la sección 6.4.1.2, con la diferencia de que se utilizó la carga pequeña (definida en la sección 5.2.2). De esta manera, la corriente es de ordenes de magnitud similar a la corriente de vacío, por lo que podremos verificar que el algoritmo distinga correctamente entre estas dos situaciones.

Los resultados para esta simulación se presentan en las figuras 5.18, 5.19.

En cuanto a la potencia activa, dado que el interruptor se encuentra en el extremo local, no existe flujo antes del cierre. Luego del mismo, la potencia toma el valor que le demanda la carga, el cual es mucho menor que el visto en las simulaciones anteriores. Por otro lado, el comportamiento de la corriente es análogo; no existe flujo antes del cierre y después observamos un valor similar a la corriente de vacío.

En referencia a la tensión, como la carga es muy pequeña, la diferencia de voltaje entre el instante previo y posterior a la acción del disyuntor es muy reducida.

Sobre la potencia reactiva observamos que toma un valor negativo, esto era esperable, ya que la potencia solicitada por la carga es menor a la de vacío de la línea. A su vez, en el balance de potencia del circuito, la rama inferior presenta una impedancia menor a la superior, por lo que por la primera habrá una preferencia para un mayor flujo de potencias.

Debido a lo planteado en el anterior párrafo, una vez que se conecta la carga, se tiene como resultado un ángulo de 330° (correspondiente a un flujo de potencia activa y reactiva de magnitud similar, pero de sentido opuesto).

Capítulo 5. Modelado y simulaciones de la red

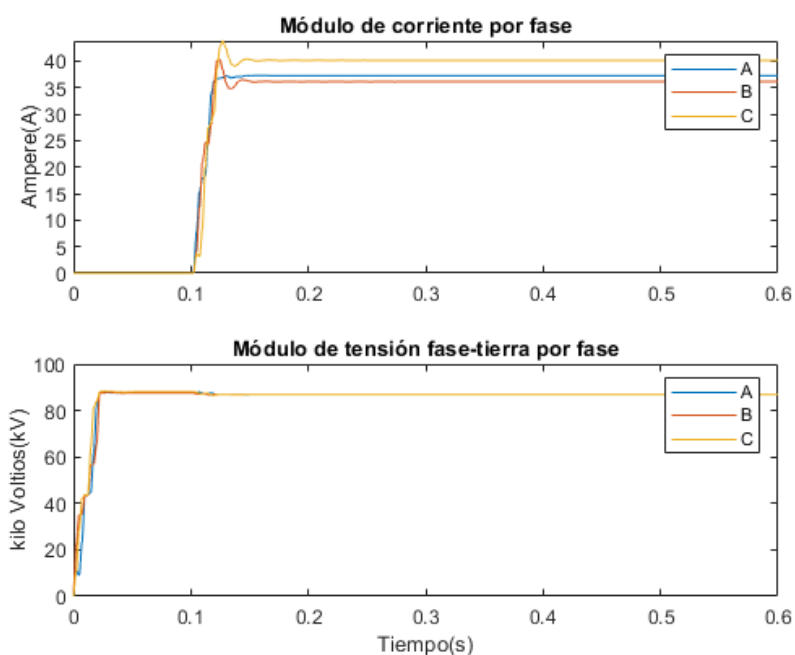


Figura 5.18: Potencia activa vista por el relé cuando ocurre la energización de la línea (con poca carga) en su extremo local 1

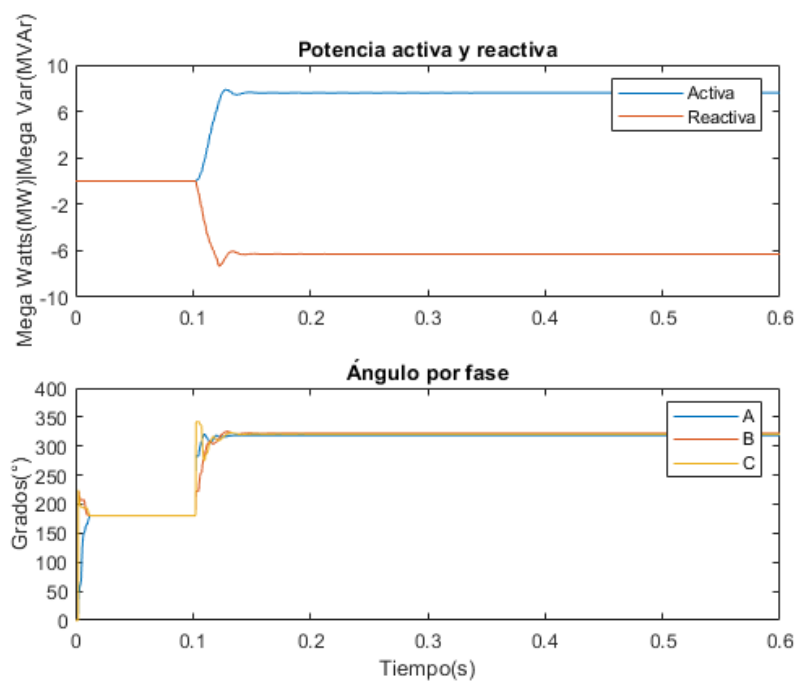


Figura 5.19: Potencia reactiva vista por el relé cuando ocurre la energización de la línea (con poca carga) en su extremo local 2

5.2. Simulaciones de la red

5.2.2.4. Energización con poca carga, cierre en extremo remoto

Esta simulación es análoga a la de la sección 5.2.2.1, con la diferencia de que la carga utilizada es de menor valor.

En cuanto a la potencia activa presentada en la figura 5.21, al comienzo de la simulación observamos el valor de vacío. Luego de la energización, la potencia sube hasta alcanzar el valor demandado por la carga. En relación a la reactiva, al principio vemos su valor de vacío y luego aumenta al conectar la carga.

Sobre la tensión de la figura A.7, observamos que casi no varía en el instante de conexión de la carga. Esto se debe al bajo valor de la misma. El efecto de energización si es visible en la corriente, la cual aumenta a un valor cercano al de vacío.

Por último, el ángulo comienza tomando un valor de 270° debido a que la línea se encuentra en vacío, y luego se asienta en el valor impuesto por la carga.

Capítulo 5. Modelado y simulaciones de la red

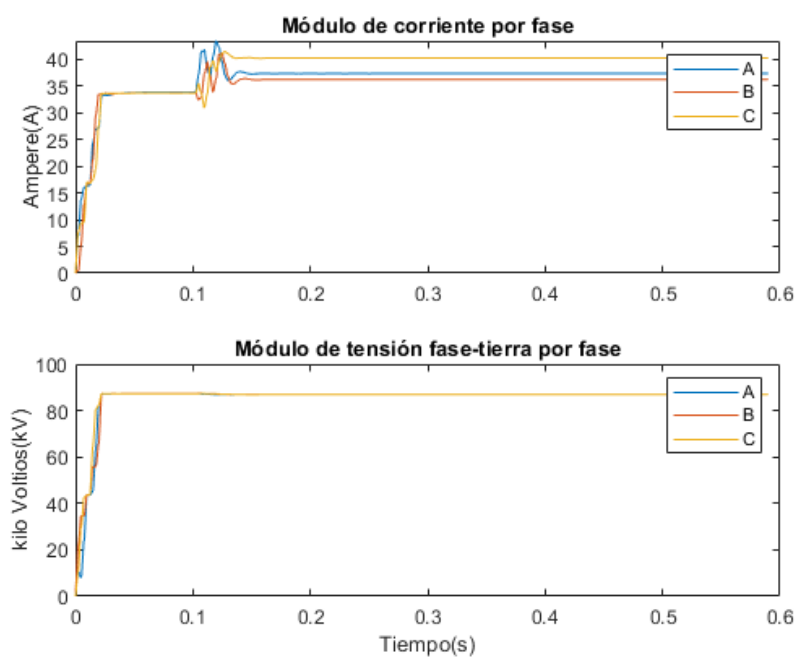


Figura 5.20: Módulo de corriente y tensión

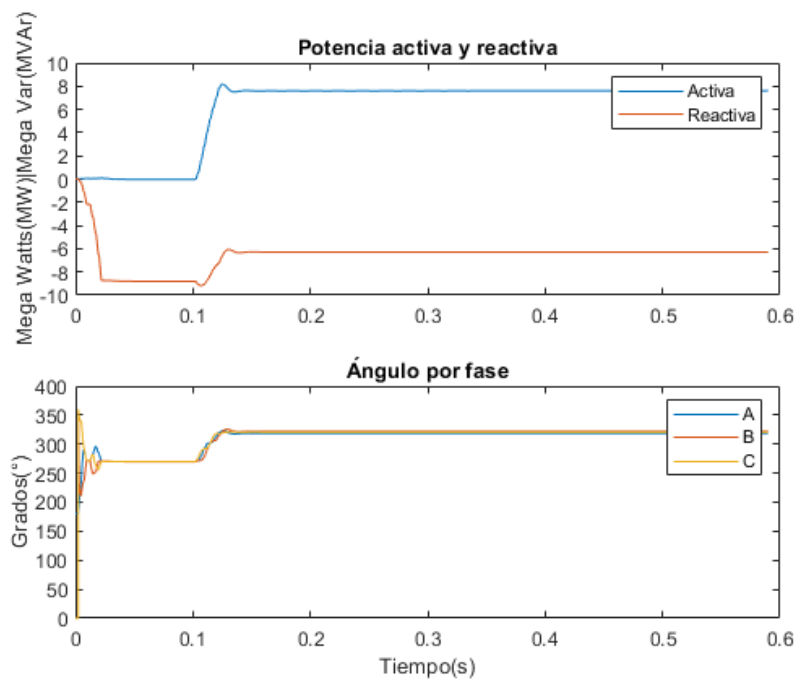


Figura 5.21: Potencia activa, reactiva y ángulo

5.2.3. Casos particulares

5.2.3.1. Falla trifásica

Para simular una falla trifásica se consideró el siguiente circuito:

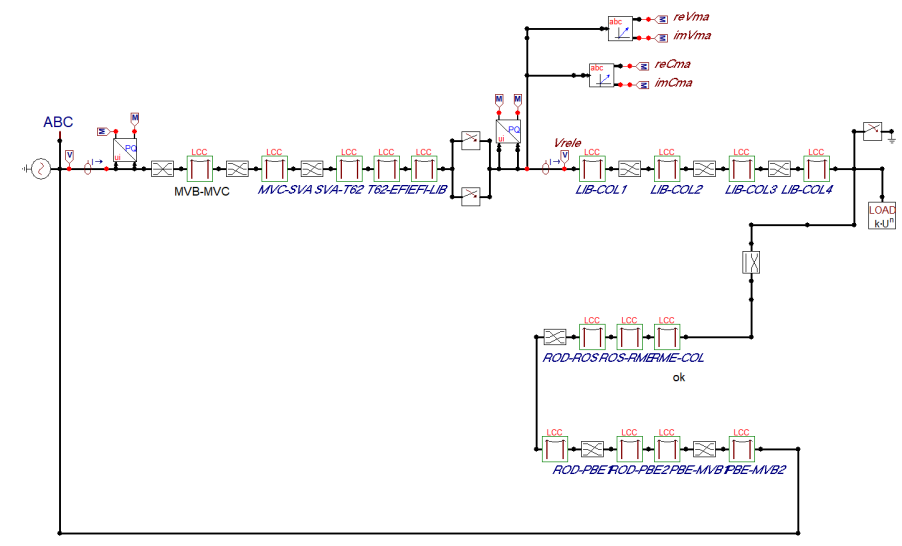


Figura 5.22: Circuito de Simulación de Falla Trifásica

Se modificó el circuito original agregándole un switch controlado por tiempo en Colonia, el cual cierra las tres fases simultáneamente a los 0,1 segundos, produciendo un cortocircuito franco trifásico. El mismo tiene una duración de 100 ms, tiempo después del cual el switch se abre despejando la falta. También se agregaron dos disyuntores en paralelo en Libertad para simular el recierre de la línea. Una vez despejada la falta, uno de esos switches se abre dejando a la línea conectada únicamente en su extremo remoto. Luego de transcurridos 800 ms, el otro disyuntor del extremo local se cierra, completando el proceso. La carga que se observa en la figura 5.22 es de 195 MW y 64 MVAR, y fue modelada como de corriente constante.

Tal como era de esperarse, al comienzo de la simulación se aprecia una potencia activa y reactiva constantes, figura 5.24. Luego, en el segundo 0,1 se produce la falta y ambas potencias aumentan significativamente. Por el contrario, se aprecia una caída de tensión en Libertad producto del cortocircuito, el cual impone una tensión nula en Colonia, figura 5.23. En cuanto a la corriente, alcanza un valor cercano a los 1400 A cuando se produce la falta, luego baja a 1200 A y se mantiene constante en dicho valor hasta que se despeja el cortocircuito. Por último, los ángulos de las 3 fases toman un valor cercano a los 60° durante la falta, ya que la potencia reactiva es mayor a la activa. Una vez despejado el cortocircuito, dicha magnitud se asienta en 180° durante 800 ms, volviendo luego a su valor original impuesto por la carga.

Capítulo 5. Modelado y simulaciones de la red

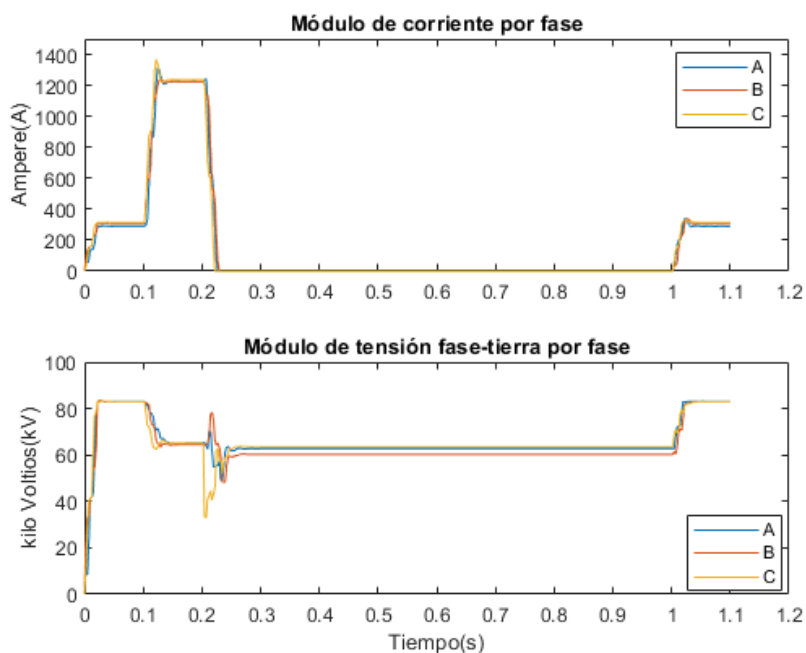


Figura 5.23: Módulo de corriente y tensión

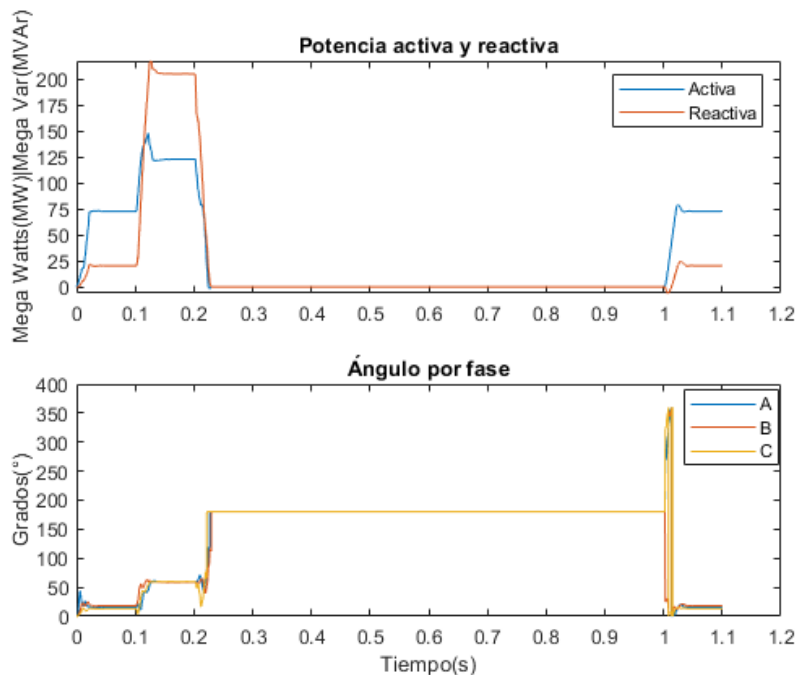


Figura 5.24: Potencia activa, reactiva y ángulo

5.2. Simulaciones de la red

5.2.3.2. Falla monofásica

Para simular una falla monofásica se utilizó el mismo circuito que el de la figura 5.22 y se modificó el switch ubicado en Colonia de forma de que solo cierre la fase A. A su vez, se modificaron los disyuntores de Libertad de forma tal que el recierre solo ocurra en la fase A, las otras fases quedan conectadas durante toda la simulación.

En la figura 5.26 Se observa que tanto la potencia activa como reactiva se incrementan sustancialmente durante el cortocircuito, lo cual tiene sentido. Por otro lado, se aprecia una disminución en el voltaje y un aumento de la corriente solo en la fase A debido a que es la única que se encuentra en cortocircuito, figura 5.25. En cuanto a los ángulos, durante la falta se observa que el de la fase A toma un valor cercano a los 60° , mientras que los de las otras fases se asientan en valores inferiores. Una vez despejado el cortocircuito y luego de la apertura del disyuntor de Libertad, el ángulo de la fase A es 180° ya que la potencia activa y reactiva que fluyen por la misma son nulas. Luego del recierre, todos los ángulos vuelven al valor impuesto por la carga.

Capítulo 5. Modelado y simulaciones de la red

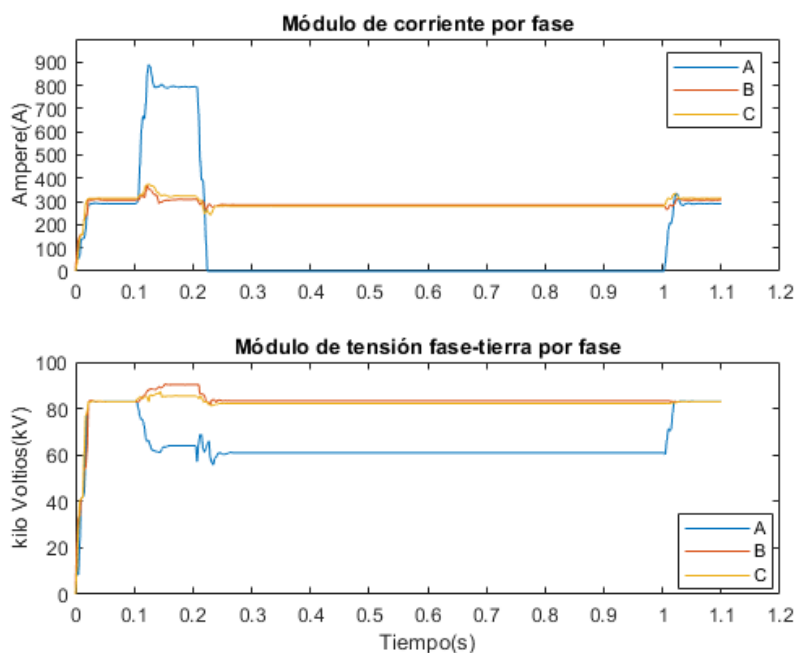


Figura 5.25: Módulo de corriente y tensión

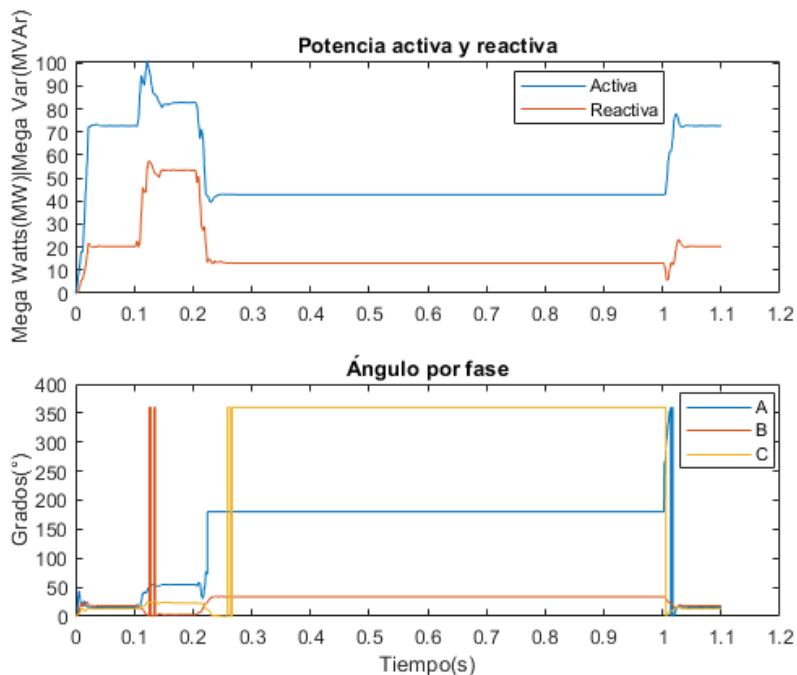


Figura 5.26: Potencia activa, reactiva y ángulo

5.2. Simulaciones de la red

5.2.3.3. Inversión de potencia

Con el objetivo de simular una inversión de potencia vista en el relé ubicado al comienzo de la línea Libertad-Colonia, se simuló el siguiente circuito:

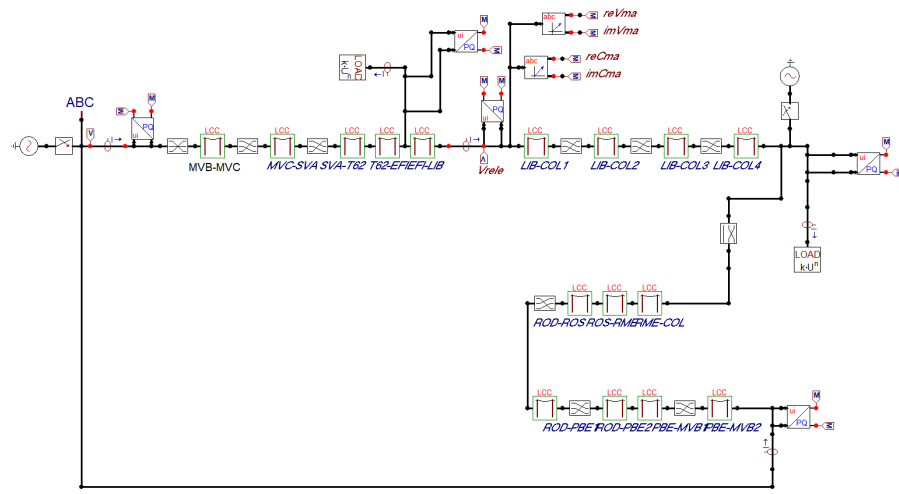


Figura 5.27: Circuito de Simulación Inversión de Potencia

Tal como se observa en la imagen anterior, se hicieron algunas modificaciones al circuito original de la figura 5.5 con el objetivo de poder observar una inversión de potencia.

En primer lugar, se agregó un generador idéntico al original al final de la línea Libertad-Colonia. Ambas fuentes de tensión cuentan con switches controlados por tiempo, los cuales permiten quitar o poner en servicio a los generadores. Al comienzo de la simulación, solo se encuentra en servicio el generador original de MVB, y a los 0,19 segundos sale de servicio, quedando al mismo tiempo la red alimentada únicamente por el generador de Colonia. A su vez, en todo momento se encuentran conectadas dos cargas idénticas de 195 MW y 64 MVar, las cuales fueron modeladas como de corriente constante.

Debido al cambio de los generadores en el segundo 0,19 y a la ubicación de las cargas, se puede observar que ocurre una inversión de potencia activa y reactiva, visible en las figura 5.29. Si bien este efecto de salida y entrada en servicio de generadores no ocurre frecuentemente, esta simulación será útil a los efectos de verificar el correcto funcionamiento del algoritmo frente a una inversión de potencia.

Capítulo 5. Modelado y simulaciones de la red

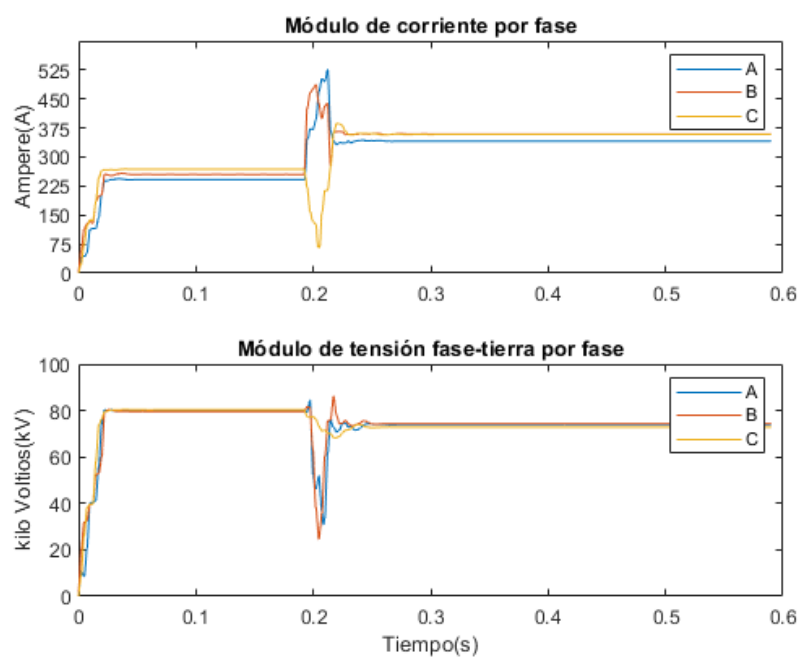


Figura 5.28: Módulo de corriente y tensión

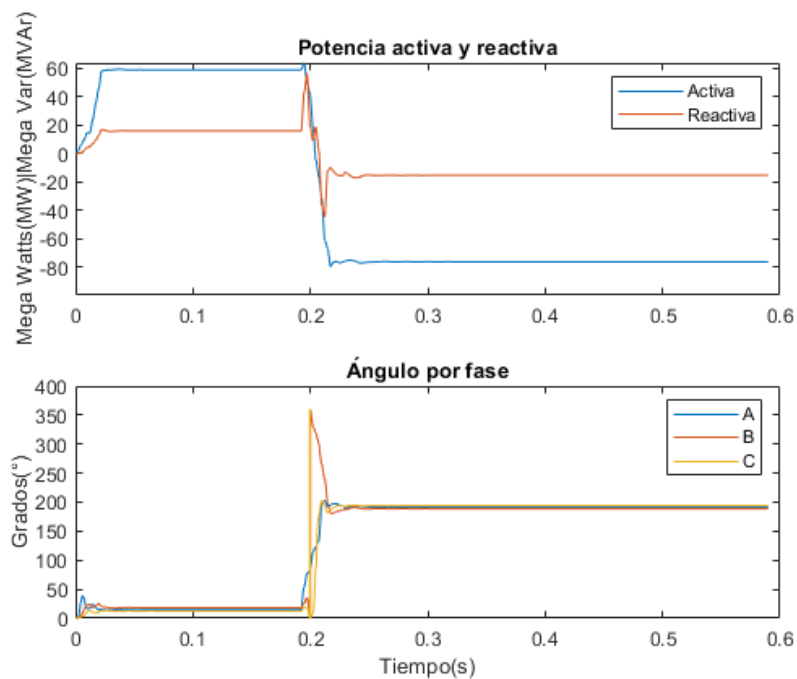


Figura 5.29: Potencia activa, reactiva y ángulo

5.3. Conclusiones

Mediante las simulaciones y el análisis planteado en esta sección se observaron una serie de situaciones a tener en cuenta para lograr desarrollar el algoritmo buscado.

Comenzaremos el análisis observando las situaciones donde uno de los dos interruptores de cabecera de la línea se encuentra abierto.

En primer lugar, analizaremos la situación planteada en la sección 5.2.2.1, en la que se recreó el escenario donde el interruptor remoto se cierra conectando la línea a la carga. Al comienzo de la simulación, debido a que el extremo remoto se encuentra abierto, la línea no se encuentra en servicio. Sin embargo, estas líneas de $150kV$ presentan una potencia reactiva de vacío de alrededor del 10% de la potencia nominal (teniendo en cuenta que la corriente nominal es 300A y la de vacío 30A para la línea LIB-COL). Por lo tanto, es importante tener en cuenta que a pesar de no tener una carga conectada, aún así habrá un flujo de potencia reactiva presente. A su vez, es importante resaltar que los ángulos de todas las fases serán cercanos a 270° , ya que la potencia activa es despreciable en comparación con la reactiva y ambas son negativas.

Por otro lado, podemos analizar la situación de la sección 6.4.1.2, donde el cierre del interruptor sucedió en el extremo local. El hecho de que los transformadores de medida y por ende el relé de protección se encuentren aguas arriba y muy próximos al interruptor en operación, repercute en que el flujo de corriente sea prácticamente nulo previo a la energización. En la práctica este flujo no resulta ser nulo rotundamente, sino que hay presente un ruido blanco con características aleatorias. Consecuentemente, si el transformador de medida de tensión se encuentra conectado en barras de la subestación, la potencia activa y reactiva de la línea no serán necesariamente nulas. Este fenómeno resulta tener un origen multicausal, el cual puede explicarse por las interferencias de otras líneas o equipos de la subestación y el magnetismo remanente de los transformadores de medida.

Respecto al flujo de potencias en régimen, podemos decir que es fuertemente resistivo cuando la línea está en servicio. Debido a esto, el factor de potencia (FP) que presenta la línea es el correspondiente a un ángulo siempre menor a 30° grados aproximadamente.

En relación a lo observado en la simulación 5.2.3.2, es importante resaltar que en un cortocircuito monofásico únicamente la fase en falta presenta un ángulo superior al mencionado en el párrafo anterior. En cambio, en la simulación de la falta trifásica (5.2.3.1), podemos apreciar que los ángulos de las tres fases son superiores a 30° . Esta diferencia deberá ser tomada en cuenta a la hora de desarrollar del algoritmo, ya que él mismo deberá indicar que la línea se encuentra en servicio en ambos casos.

Esta página ha sido intencionalmente dejada en blanco.

Capítulo 6

Desarrollo del algoritmo en MATLAB

Para la realización del algoritmo se utilizó el software MATLAB, gracias a su amplia gama de capacidades de cómputo numérico y en conjunto con las simulaciones de la red obtenidas de ATP, resultó ser el software adecuado para el desarrollo de una primera versión del algoritmo.

6.1. Teoría detrás del algoritmo

El objetivo central del algoritmo a desarrollar es que este sea capaz de determinar el estado de operación de una línea de transmisión de $150kV$, por tanto resulta fundamental definir qué es un estado de operación funcional (típico y atípico) y qué es un estado de línea no funcional.

Definiremos a una línea como funcional cuando por ella fluya una corriente mayor que su corriente de vacío, en esta situación se pueden tener un funcionamiento típico, cuando las magnitudes eléctricas están en el entorno de sus datos nominales o atípico cuando estas magnitudes excedan en gran medida a estos datos.

El caso opuesto es la línea no funcional, definida como la situación donde la corriente por ella resulta ser la corriente de vacío o bien un valor menor.

6.2. Variables de entrada

El algoritmo desarrollado presenta una serie de variables de entrada ingresadas por el usuario, mediante las cuales se ajusta a las características eléctricas de la línea a supervisar. También existe un juego de variables provistas por los transformadores de medida montados en la línea o subestación.

Entre las medidas provistas por los transformadores encontramos los parámetros básicos del sistema eléctrico: corrientes de fase y tensiones fase tierra.

Capítulo 6. Desarrollo del algoritmo en MATLAB

6.2.1. Corriente de Vacío

El valor de la corriente de vacío de la línea en rms debe ser ingresado por el usuario para que el algoritmo pueda utilizar adecuadamente la función 6.3.3.

6.2.2. Umbral de ángulo o de factor de potencia

El umbral de ángulo (o de factor de potencia) es un valor límite que corresponde a la relación entre los flujos de potencia activa y reactiva que la línea puede presentar en un funcionamiento sin anomalías. Es decir, debajo de este valor de ángulo, consideramos que la línea se encuentra en un estado normal de operación con carga. Este límite fue determinado considerando que una carga no suele presentar un factor de potencia menor a 0,85, obteniéndose un umbral de ángulo de 30°. Debido a que este valor es ingresado por el usuario, puede ser modificado para adaptarse a nuevos criterios que quieran ser utilizados. Se profundizará sobre este parámetro en la sección 6.3.2.

6.2.3. Umbral de potencia

Tal como se detalló en la sección 5.3, cuando el extremo local de la línea se abre, los transformadores de medida detectan señales de corriente casi nulas, las cuales presentan ruido. Es por ello que el usuario debe ingresar un umbral de potencia activa y reactiva trifásico, debajo del cual el algoritmo detecta que la línea se encuentra fuera de servicio. Para determinar dicho valor límite, el criterio utilizado fue fijarlo en el 20 % de la potencia de vacío de la línea en cuestión. De esta forma, podemos estar seguros que el algoritmo no detecte una falsa apertura. Tal como se mencionó para el umbral de ángulo, este límite de potencia también es ingresado por el usuario, por lo que pueden implementarse otros criterios para definirlo.

6.2.4. Margenes de seguridad generales

Para cada una de las variables se puede introducir un margen de seguridad a disposición del usuario. En las simulaciones realizadas se aplicó un margen de seguridad del 20 % para el cálculo de la corriente de vacío mencionado en la sección 6.2.1. La implementación de dicho margen se debe a que cuando la línea se encuentra en vacío, su valor de corriente varía levemente, por lo que es necesario considerar un valor de vacío un poco mayor para evitar fallas en la detección.

6.3. Funciones implementadas

Las principales funciones desarrolladas para determinar el estado de la línea son las explicadas a continuación. Mediante una serie de funciones lógicas entre ellas y las variables de entrada es que el algoritmo logra el objetivo deseado.

6.3.1. Función potencia

Función mediante la cual se realiza una comparación entre el flujo de potencia activa y reactiva trifásico, contra el valor de umbral de potencia suministrado por el usuario, el cual se encuentra detallado en 6.2.3.

Esta función se encuentra implementada del tal manera que devuelve una variable booleana como 1, siempre y cuando la potencia activa y reactiva que fluyen por la línea sean menor que el umbral. Si esto ocurriera, decimos que es una condición suficiente para afirmar que la línea se encuentra fuera de servicio. No es necesaria ya que, por ejemplo, cuando la línea se encuentra en vacío no se cumple la condición mencionada anteriormente, encontrándose la línea aún así fuera de servicio.

Para obtener una referencia visual de la lógica referirse a la figura 7.3.

6.3.2. Función ángulo

Como vimos en la sección 5.3, se hace necesario obtener una función que determine una condición necesaria para afirmar que la línea se encuentra fuera de servicio. El concepto implementado queda ilustrado en la figura 6.1.

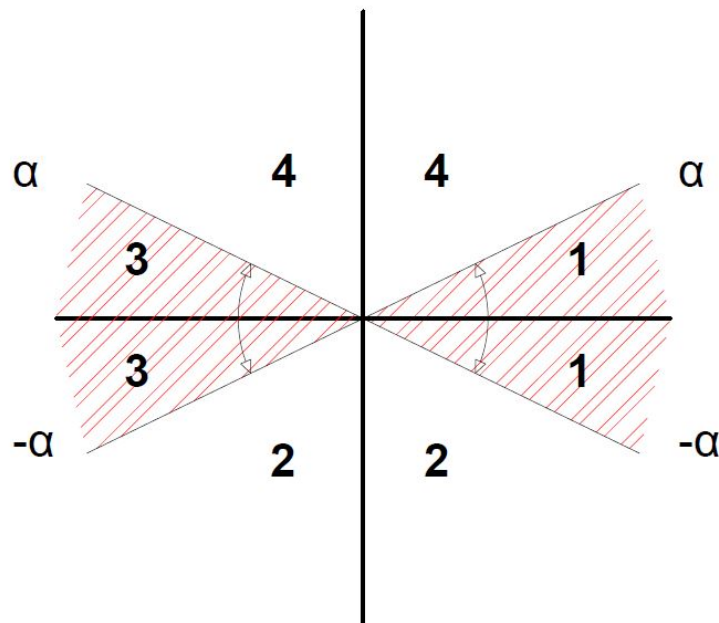


Figura 6.1: Concepto función ángulo

Como se describió en la sección 6.2.2, el usuario debe ingresar un valor de ángulo de referencia para detectar el funcionamiento anómalo de la línea. La función que realiza esta implementación es la de evaluar el defasaje entre tensión y

Capítulo 6. Desarrollo del algoritmo en MATLAB

corriente de cada fase, para luego compararlo con el ángulo ingresado por el usuario (en la figura 6.1 representado por α). De encontrarse los tres ángulos de las fases en las zonas marcadas con 2 o 4, la función devuelve un 1 a una variable booleana de salida. En dicho caso, decimos que se cumple una condición necesaria pero no suficiente para afirmar que la línea se encuentra fuera de servicio. No es suficiente ya que en el caso de un cortocircuito trifásico, el ángulo de las tres fases se encuentra en las zonas mencionadas, pero la línea se encuentra en servicio.

Para obtener una referencia visual de la logica referirse a la figura 7.5.

6.3.3. Función corriente

Dada la corriente de vacío mencionada en la sección 6.2.1, el algoritmo compara este valor con el módulo del fasor de la corriente de cada fase. La función devuelve una variable booleana con valor 1 siempre y cuando las corrientes de las tres fases sean menores a la de vacío más su margen de seguridad del 20%. Si esto ocurriera, decimos que es una condición necesaria pero no suficiente para afirmar que la línea se encuentra fuera de servicio. No es suficiente ya que puede darse el caso en el que la línea esté conectada a una carga baja, cuyo valor de corriente se encuentre entre la de vacío de la línea y el 20% del margen de seguridad.

Para obtener una referencia visual de la logica referirse a la figura 7.4.

6.3.4. Función salida

La interacción final entre las funciones desarrolladas termina siendo la siguiente implementación lógica:

$$\text{OUT} = \text{NOT} ((\text{Función corriente AND Función ángulo}) \text{ OR Función potencia})$$

Teniendo como respuesta alta a la línea en servicio y baja a la línea fuera de servicio.

La implementación de esta función es la anterior debido a las siguientes razones. Como se hizo notar en la sección 6.3.2 y 6.3.3, las funciones ángulo y corriente no logran ser suficientes por sí solas para determinar el estado de la línea, por ello vinculándolas mediante la operación lógica AND obtenemos el objetivo deseado. Por otro lado, la función potencia de la sección 6.3.1 sí logra ser suficiente para su situación de aplicación (cuando la línea está fuera de servicio mediante su extremo local), por lo que se la vincula con la función lógica OR.

Para obtener una referencia visual de la logica referirse a la figura 7.6.

6.3.5. Función Local/Remoto

No solo se buscó detectar el estado de la línea, sino que también fue de interés determinar qué interruptor (el remoto o el local) fue el que dejó a la línea fuera de servicio.

Como observamos en la sección 5.3, la apertura de cada uno de los dos interruptores producen en la línea un comportamiento muy diferente. Por un lado la apertura del interruptor de cabecera (local) produce que no se pueda establecer un flujo de corriente, por tanto las medidas de esta magnitud serán de ruido en torno a cero. Para el caso del interruptor remoto, este produce que la línea se encuentre en vacío y por tanto la corriente por el transformador de medida es la correspondiente a esta situación.

En base a lo anteriormente planteado podemos implementar una función que únicamente de un valor de interés cuando el algoritmo detecte que la línea no está en servicio (función final = 0). En dicha situación, la función evalúa si el módulo del fasor de la corriente de las tres fases es menor a la mitad de la corriente de vacío de la línea. Si esto ocurre, decimos que la apertura fue local y la función devuelve un valor booleano 0. De lo contrario, afirmamos que abrió el interruptor remoto y la salida de la función corresponde a un 1. En el caso en el que se encuentren abiertos ambos extremos de la línea, el algoritmo le dará prioridad al local, indicando que éste se encuentra abierto.

Para obtener una referencia visual de la logica referirse a la figura 7.8.

6.3.6. Función retardo

Siempre que se realice una maniobra o en el caso de un evento externo se producen rápidas (normalmente menores de $10ms$) fluctuaciones transitorias las cuales pueden afectar a las anteriores funciones (particularmente a la función ángulo). Debido a esto, se hace necesario aplicarle a las señal de salida y a la función local/remoto del algoritmo una función de características de retardo. Dicha función filtra los cambios que se produzcan en la señal que no se mantengan por más de $20ms$. Es decir, una variación de bajo a alto solo podrá suceder cuando la señal se mantenga en alto por lo menos durante $20ms$. Esto aplica también para los cambios de alto a bajo.

Mediante esta función lo que obtenemos es un filtro el cual descarta los cambios producidos en las funciones debido a estos transitorios, con el perjuicio de retardar la señal $20ms$.

Para obtener una referencia visual de la logica referirse a la figura 7.7.

6.3.7. Función lectura e interpretación de archivos Comtrade

Comtrade (**C**ommon format for **T**ransient **D**ata **E**xchange for power systems) corresponde a un formato estandarizado por la 'IEEE Power and Energy Society' para la salida de archivos de texto sobre los datos almacenados en los equipos de registro electrónicos de sistemas de potencia. Este formato presenta como mínimo dos documentos: *.DAT* y *.CFG*. El *.DAT* expone los datos muestreados por el equipo, así como el número de muestra correspondiente, mientras que el *.CFG* contiene toda la información para la correcta interpretación de los anteriores datos.

Para la simulación final del funcionamiento del algoritmo en el relé se utilizan registros Comtrade, de manera de poder simular ocurrencias reales ya experimentadas en la red eléctrica. Por ende, para poder lograr la correcta simulación del algoritmo en MATLAB es necesario el desarrollo de un código capaz de interpretar la información contenida en los archivos *.DAT* y *.CFG*.

6.4. Resultados

Para el primer desarrollo y corrección del algoritmo se hizo uso de las simulaciones generadas mediante el software ATP. Una vez que se obtuvo una versión más refinada, se aplicó la función 6.3.7 para poder simular los documentos Comtrade y continuar con las correcciones.

En las próximas secciones se encuentran los resultados del algoritmo para las simulaciones realizadas en ATP y los documentos Comtrade. Las gráficas a partir de este punto son presentadas de una manera distinta a las anteriores. Debido a que necesitamos representar cierto número de variables booleanas, se decidió presentar dos figuras por registro, una conteniendo tensión, potencia y ángulo, y la otra corriente y variables booleanas. Éstas últimas corresponden al estado de la línea (función 6.3.4) y a la apertura local o remota (función 6.3.5).

6.4.1. Documentos ATP

A modo de no resultar ser reiterativos con las simulaciones realizadas, en la presente sección únicamente se analiza la respuesta del algoritmo a la simulación en cuestión. De querer un análisis más profundo sobre cada simulación, remitirse a la sección 5.2. Pueden observarse los resultados de simulaciones adicionales en el Apéndice B.

Capítulo 6. Desarrollo del algoritmo en MATLAB

6.4.1.1. Desenergización y energización de línea abierta, apertura y cierre en extremo local

Durante toda esta simulación, el extremo remoto de la línea se encuentra siempre abierto, mientras que el disyuntor del extremo local comienza cerrado y luego abre y cierra. Al comienzo, la línea se encuentra conectada solo en su extremo local, por lo cual el algoritmo indica que está fuera de servicio y abierto el extremo remoto (figura 6.3). Una vez que se abre el disyuntor del extremo local, la salida del programa continúa indicando que la línea se encuentra fuera de servicio, ya que ahora ambos extremos se encuentran abiertos. Esto último es también indicado por el cambio al valor 0 de la función Local/Remoto. Finalmente, la línea vuelve a conectarse en su extremo local, y el algoritmo nos indica una vez más que se encuentra fuera de servicio. El programa también nos comunica con el valor 1 de la función Local/Remoto que el extremo que se encuentra abierto ahora es el remoto.

6.4. Resultados

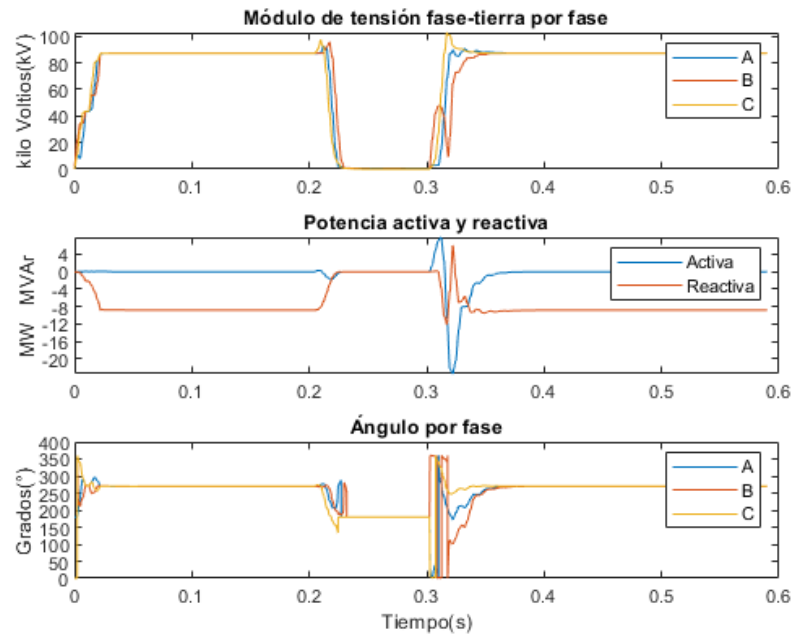


Figura 6.2: Tensión, potencia, ángulo

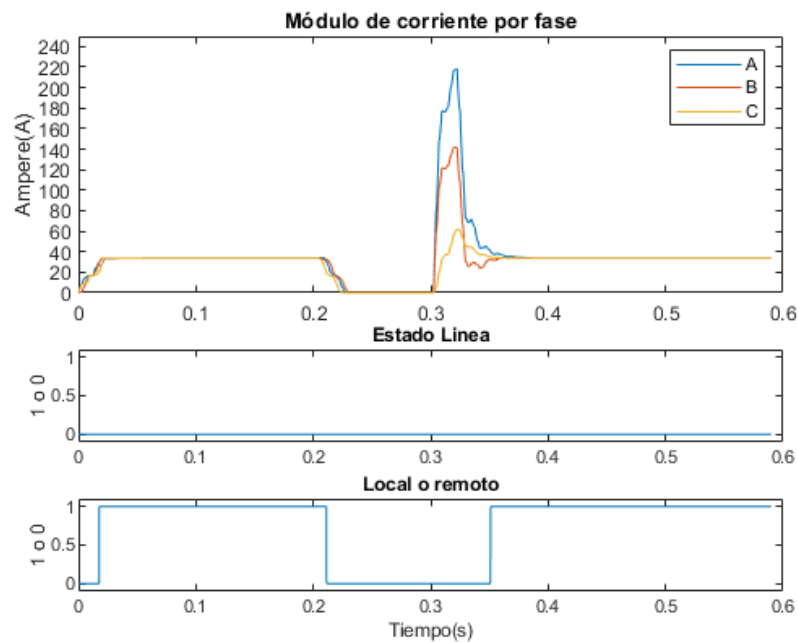


Figura 6.3: Corriente, estados

Capítulo 6. Desarrollo del algoritmo en MATLAB

6.4.1.2. Energización con carga nominal, cierre en extremo local

En esta simulación, la línea tiene conectada la carga nominal mencionada en la sección 5.2.2 en su extremo remoto. Hasta el segundo 0,1 el disyuntor del extremo local se encuentra abierto, por lo cual el algoritmo nos indica con un 0 en la figura 6.5 que la línea se encuentra fuera de servicio. A su vez, el valor bajo de la función Local/Remoto nos dice que el extremo que se encuentra abierto es el local. A los 0,1 segundos el disyuntor de este extremo se cierra, quedando la línea en servicio. Debido a esto, la señal Estado Línea pasa a valer 1. En cuanto a la función Local/Remoto, vale recordar que no tiene un significado real cuando la línea se encuentra en este estado.

6.4. Resultados

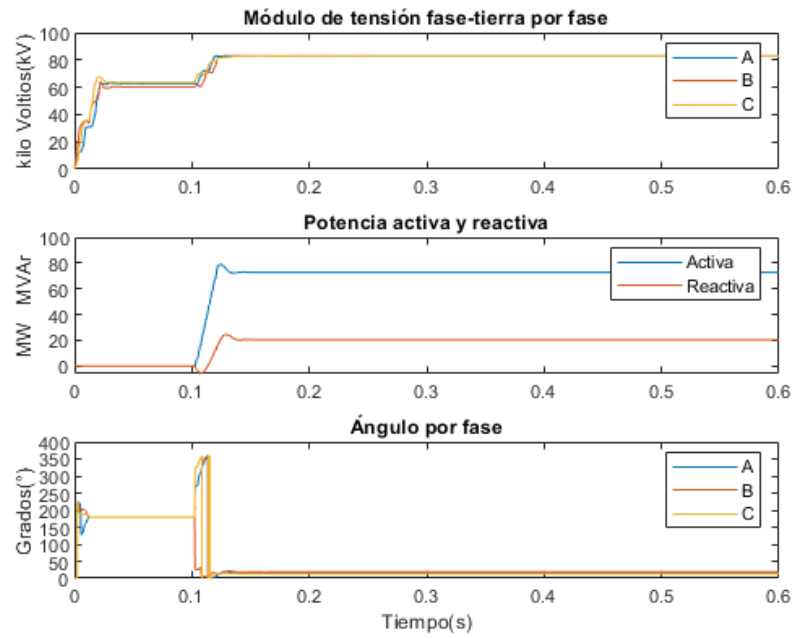


Figura 6.4: Tensión, potencia, ángulo

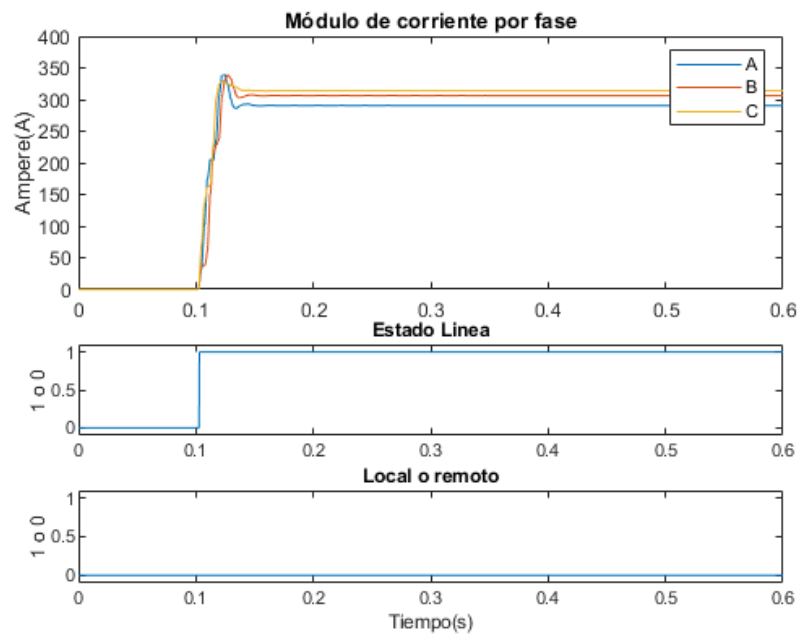


Figura 6.5: Corriente, estados

Capítulo 6. Desarrollo del algoritmo en MATLAB

6.4.1.3. Energización con poca carga, cierre en extremo remoto

En este caso, la línea tiene conectada en su extremo remoto una carga de valor sumamente reducido, mencionada en la sección 5.2.2. El objetivo de esta simulación es evaluar cómo se comporta el algoritmo frente a un valor de carga similar al visto por la línea cuando se encuentra en vacío. Hasta los 0,1 segundos, la línea se encuentra conectada únicamente en su extremo local, por lo cual el algoritmo nos indica que está fuera de servicio y que el extremo abierto es efectivamente el mencionado (figura 6.7).

A los 0,1 segundos, se cierra el disyuntor del extremo remoto, y el programa nos comunica esto con un cambio al valor 1 en su función Estado Línea. Observamos que este cambio no ocurre inmediatamente, sino que el algoritmo demora aproximadamente 15 ms en cambiar su salida. Esto se debe a que el programa debe esperar a que la función corriente ó la función ángulo pasen por sus respectivos umbrales. Es decir, el algoritmo cambiará su salida cuando alguna de las tres corrientes llegue a valer más que el umbral de corriente ó cuando se detecte un ángulo en alguna de las fases que corresponda a una carga resistiva.

6.4. Resultados

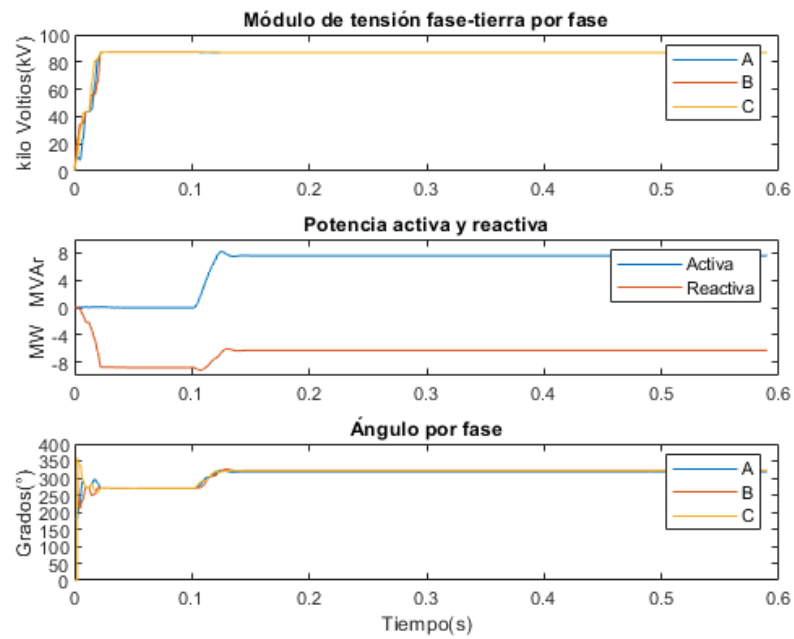


Figura 6.6: Tensión, potencia, ángulo

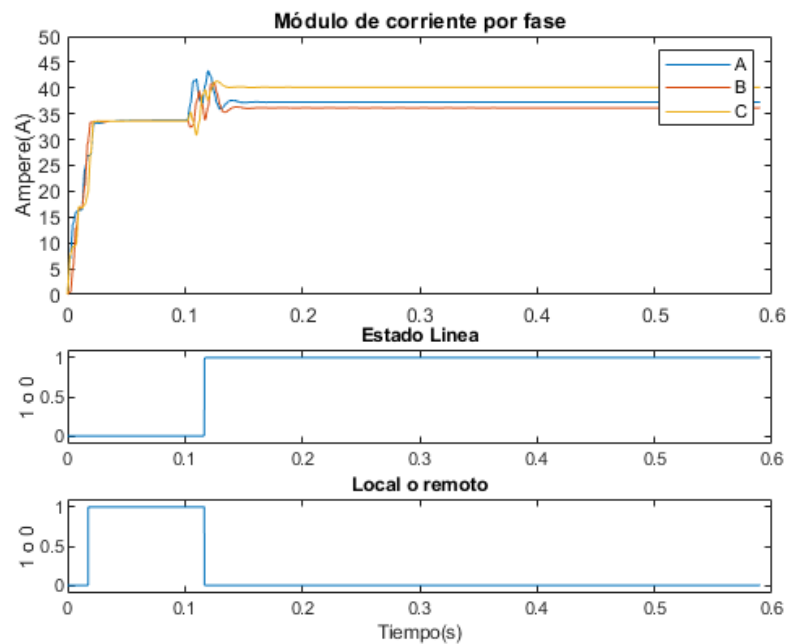


Figura 6.7: Corriente, estados

Capítulo 6. Desarrollo del algoritmo en MATLAB

6.4.1.4. Desenergización con carga nominal, apertura en extremo remoto

Al comienzo de esta simulación la línea se encuentra en servicio alimentando la carga nominal mencionada anteriormente. Debido a esto, podemos ver en la figura 6.9 que el algoritmo nos indica con valor 1 que efectivamente la línea está en servicio.

A los 0,3 segundos, se abre el disyuntor del extremo remoto, quedando la línea en vacío. Consecuentemente, la salida del programa pasa a valer 0 y la función Local/Remoto nos indica que el extremo que abrió fue este último. Observamos que el algoritmo no responde instantáneamente, sino que demora aproximadamente 20 ms en cambiar su salida. Esto se debe a que el programa debe esperar a que tanto la función corriente como la función ángulo pasen por sus respectivos umbrales. Es decir, el algoritmo cambiará su salida cuando las tres corrientes lleguen a valer menos que el umbral de corriente y cuando se detecte un ángulo en todas las fases que no corresponda a una carga resistiva.

6.4. Resultados

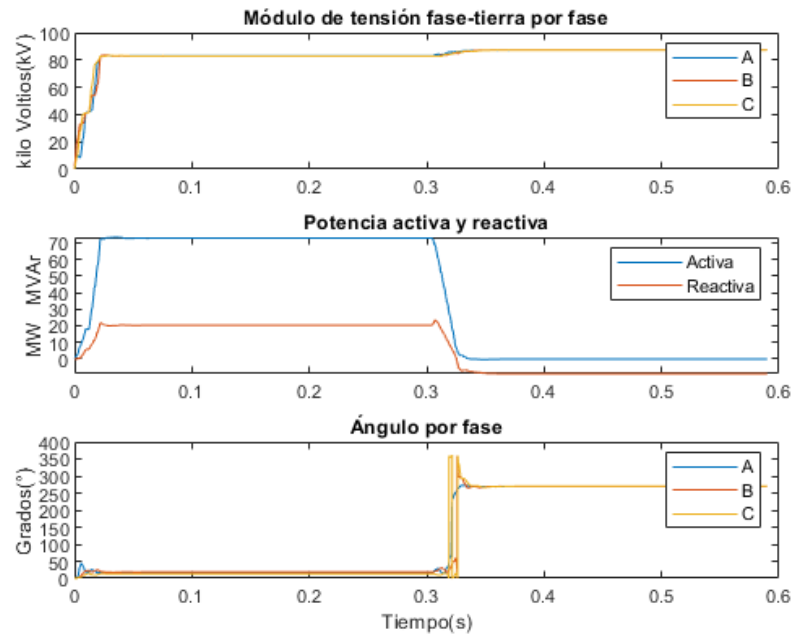


Figura 6.8: Tensión, potencia, ángulo

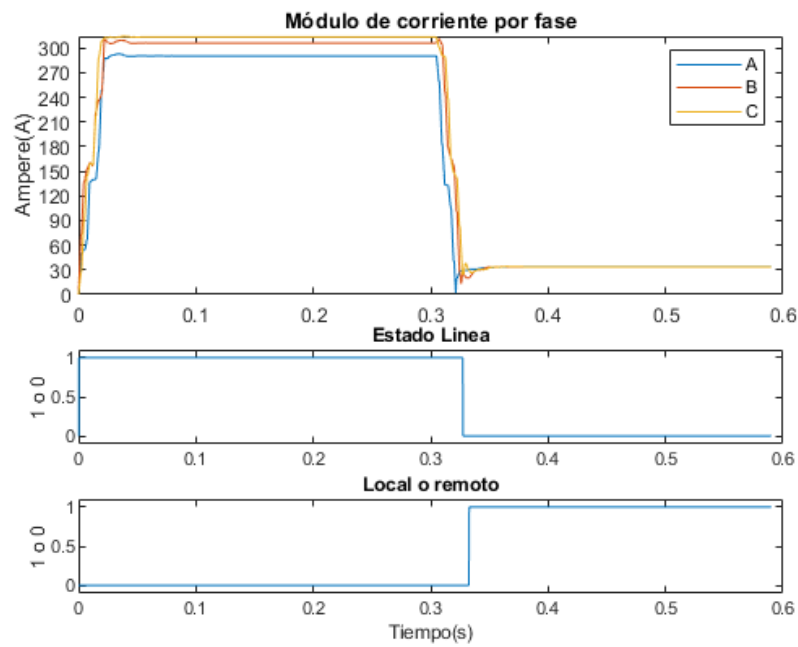


Figura 6.9: Corriente, estados

Capítulo 6. Desarrollo del algoritmo en MATLAB

6.4.1.5. Desenergización con poca carga, apertura en extremo local

En este caso la línea también comienza en servicio, pero alimentando la carga de bajo valor ya mencionada previamente. A diferencia de la simulación anterior, observamos que el algoritmo no responde inmediatamente al comienzo. Esto se debe a que ahora la carga tiene un valor cercano a la de vacío de la línea, por lo cual el transitorio visto en la energización es más lento y consiguientemente las funciones corriente y ángulo demoran más en actuar. Una vez que se sobrepasan los umbrales de corriente o ángulo, la salida del algoritmo nos indica con un 1 que la línea está efectivamente en servicio.

A los 0,3 segundos abre el disyuntor del extremo local, lo que produce un cambio en la salida del programa. Observamos que el algoritmo no responde instantáneamente cuando esto ocurre. Este comportamiento se explica de forma análoga a lo visto en las secciones anteriores.

6.4. Resultados

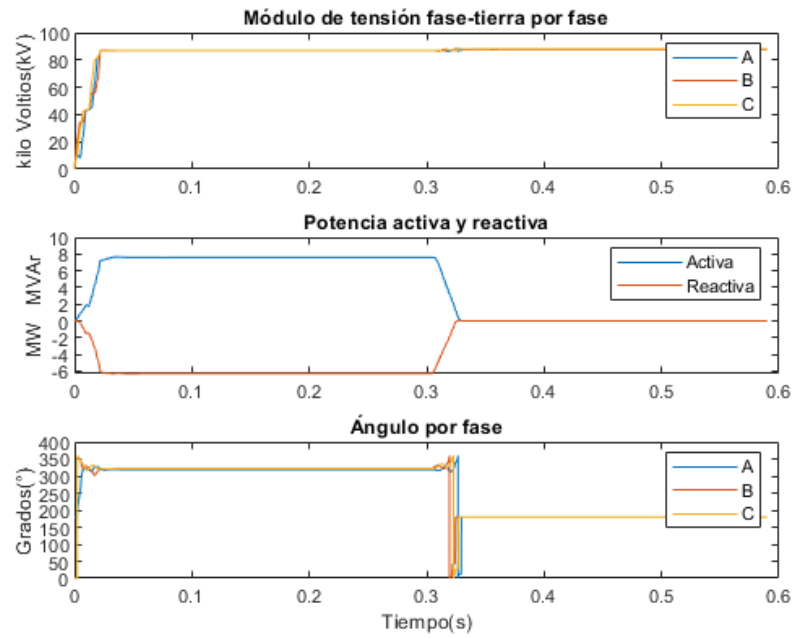


Figura 6.10: Tensión, potencia, ángulo

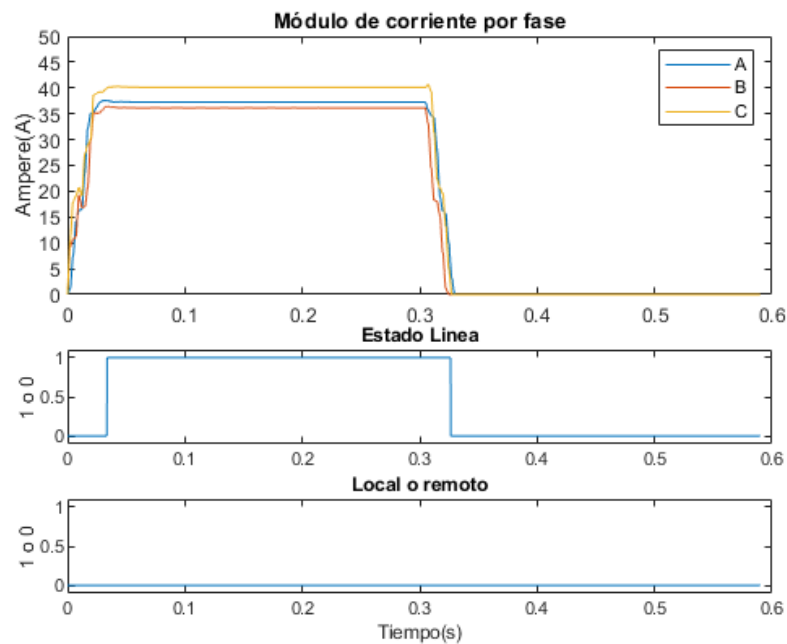


Figura 6.11: Corriente, estados

Capítulo 6. Desarrollo del algoritmo en MATLAB

6.4.1.6. Falta trifásica

Previo a los 0,1 segundos se observa que la línea se encuentra en servicio, posterior a esto y hasta los 0,2 ocurre una falta trifásica la cual es despejada antes de los 2,5 segundos. La respuesta del algoritmo vista en la figura 6.13 es la esperada. A pesar de encontrarse la línea en falta, ninguno de los interruptores ha abierto y por tanto la línea esta en servicio.

Una vez despejada la falta (mediante la apertura del interruptor de LIB) la línea sale de servicio, lo cual es indicado correctamente como un estado bajo de la variable Estado Línea. Finalmente al segundo 1 cierra el disyuntor de LIB colocando nuevamente a la línea en servicio, cambiando Estado Línea a 1.

Durante toda la simulación Local/Remoto se encuentra bajo, debido a que la apertura ocurrida fue en el interruptor local.

6.4. Resultados

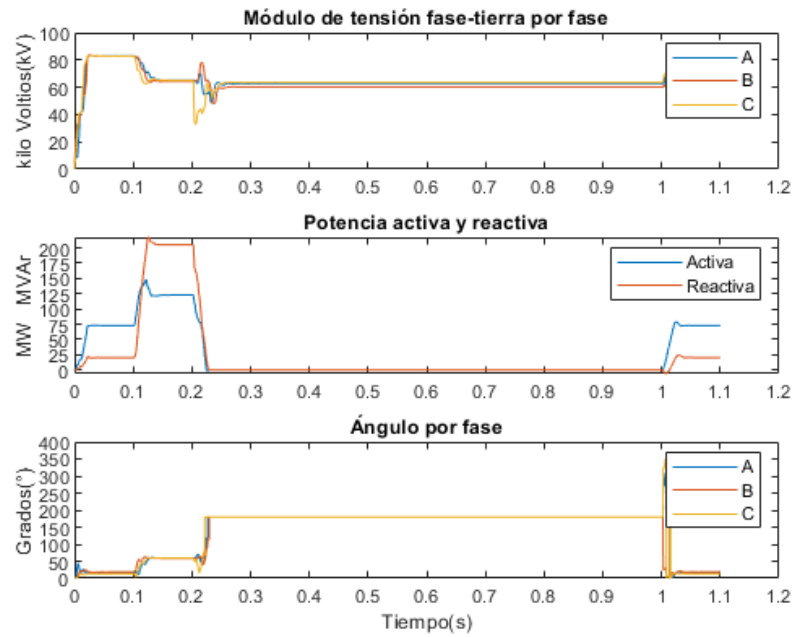


Figura 6.12: Tensión, potencia, ángulo

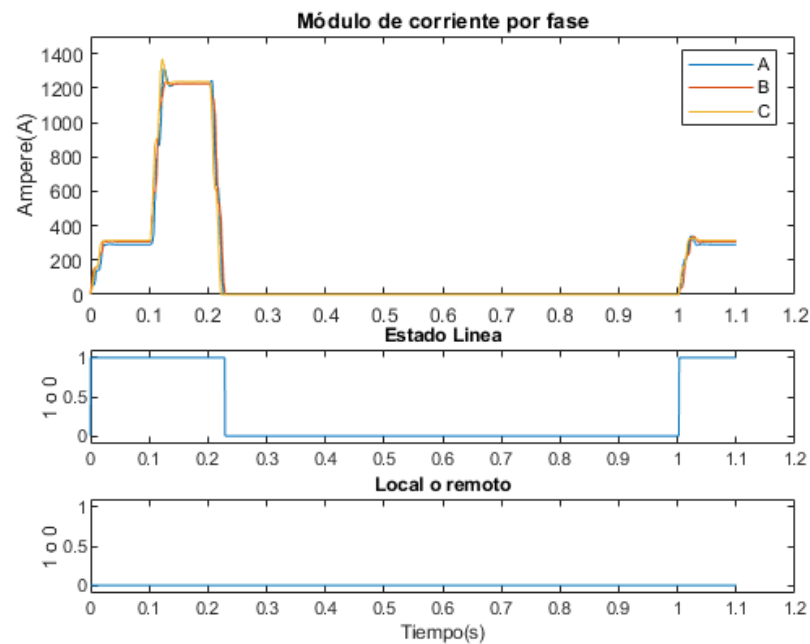


Figura 6.13: Corriente, estados

Capítulo 6. Desarrollo del algoritmo en MATLAB

6.4.1.7. Falta monofásica

Similarmente a la situación planteada en 6.4.1.6, en la presente simulación ocurre una falta monofásica sobre la fase A. Para su despeje, el interruptor de LIB abre la fase en cuestión, y alrededor de $800ms$ después vuelve a cerrarla.

Como se ve en la figura 6.15, Estado Linea se encuentra siempre alto, mientras que Local/Remoto siempre bajo, debido a que el estado del interruptor remoto no ha tenido cambios.

6.4. Resultados

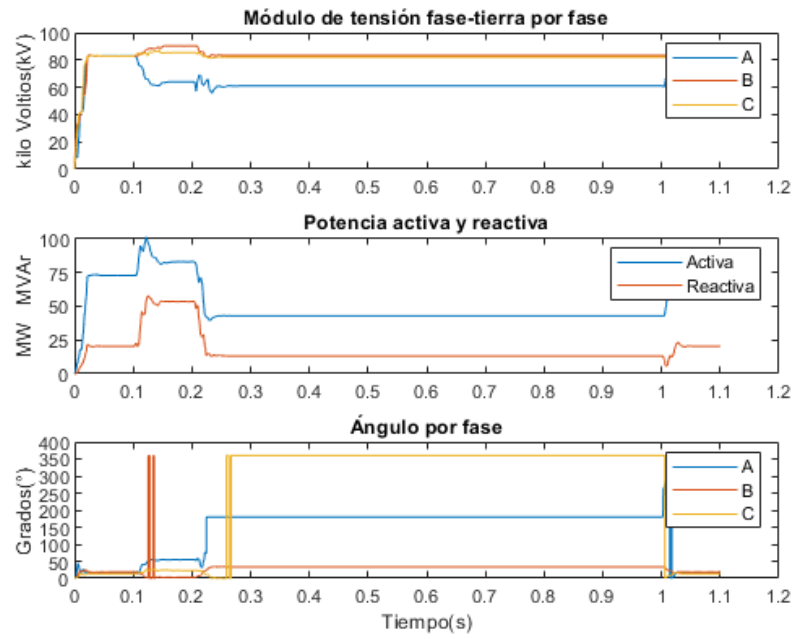


Figura 6.14: Tensión, potencia, ángulo

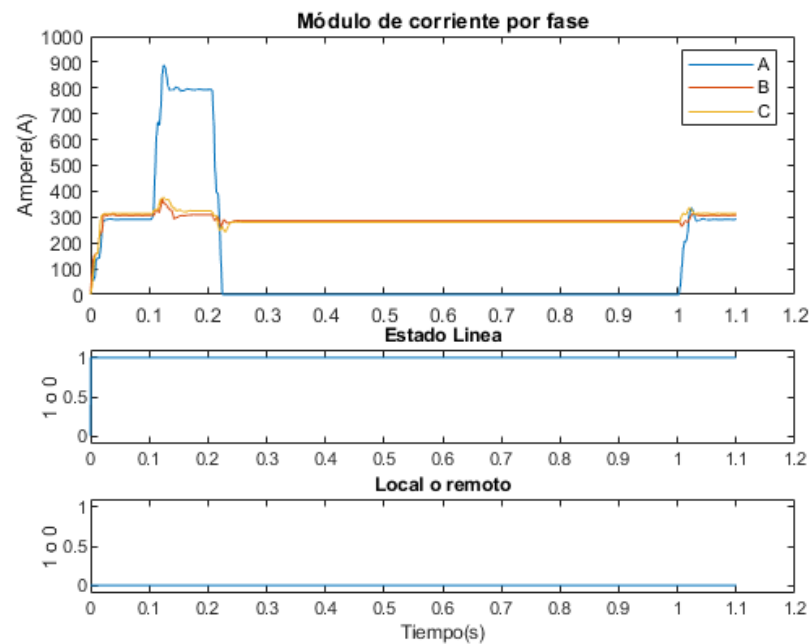


Figura 6.15: Corriente, estados

Capítulo 6. Desarrollo del algoritmo en MATLAB

6.4.1.8. Inversión de potencia

Como se planteó en la sección 5.2.3.3, mediante un cambio en la topología eléctrica de la red ocurre un evento de inversión de potencia.

Como se visualiza en la figura 6.17, el algoritmo nos indica que la línea se encuentra en servicio durante toda la simulación, lo cual es correcto debido a que el evento de inversión de potencia no resultó en la apertura de ningún interruptor. A causa de lo anterior es correcto que el estado de la función Local/Remoto se encuentre bajo.

6.4. Resultados

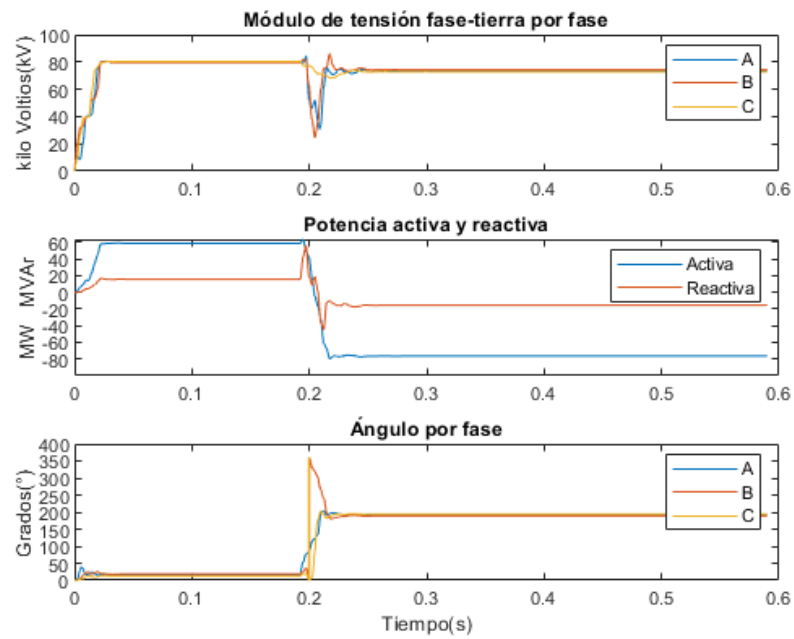


Figura 6.16: Tensión, potencia, ángulo

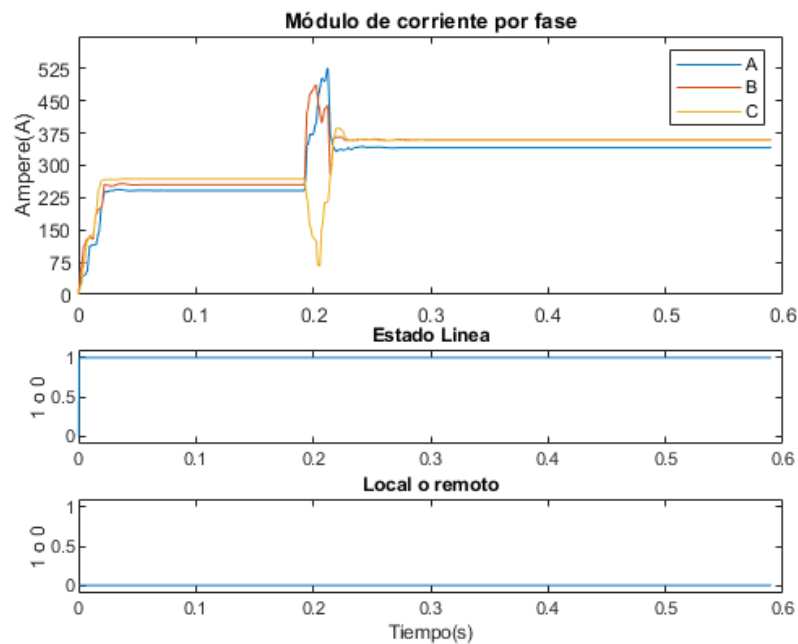


Figura 6.17: Corriente, estados

Capítulo 6. Desarrollo del algoritmo en MATLAB

6.4.2. Documentos Comtrade

Gracias a UTE contamos con una serie de registros reales ocurridos sobre la línea LIB-COL, los mismos fueron ingresados en MATLAB mediante la función 6.3.7 y se utilizó el algoritmo de detección de estado de línea para tales registros, obteniendo como salida un juego de gráficos en el que se presentan las magnitudes eléctricas de la situación, en conjunto con la respuesta del algoritmo.

6.4.2.1. Falta en línea RME-ROS

La siguiente simulación corresponde a una falta originada en la línea RME-ROS que se despejó con una apertura monofásica, sufriendo luego un recierre automático. En simultáneo con esa falta, abrió el interruptor de LIB en dirección a COL. La línea quedó transitoriamente abierta en LIB y cerrada en COL.

Las figuras 6.18 y 6.19 corresponden a medidas realizadas en el extremo COL.

Como se observa en la figura 6.19, en el momento previo y durante el tiempo de funcionamiento en falta, la línea se encuentra operativa. Una vez que ocurre la apertura tripolar del interruptor de LIB, Estado Línea cambia y se torna 0 indicando que la línea salió de servicio. En conjunto con este cambio Local/Remoto nos indica que la apertura fue remota, debido a que como se comentaba anteriormente, el interruptor del extremo remoto fue el que realizó la apertura.

6.4. Resultados

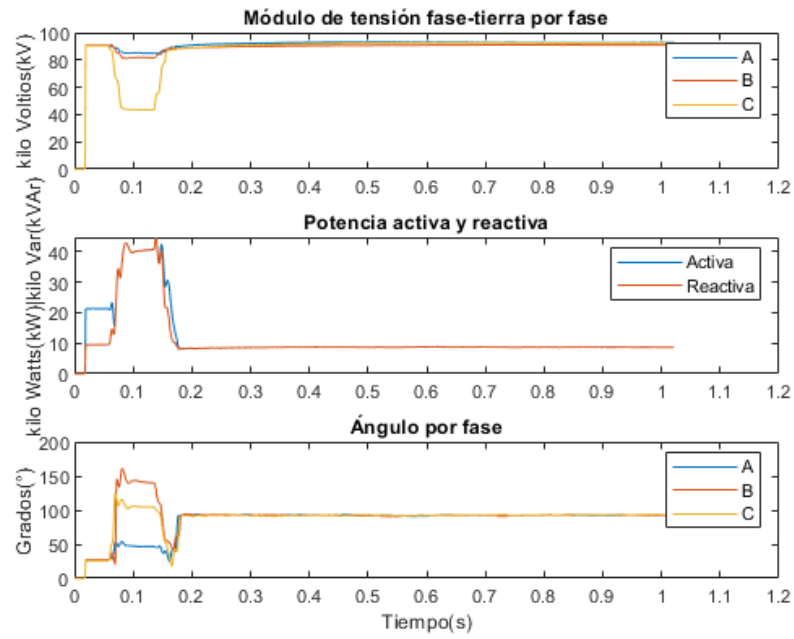


Figura 6.18: Tensión, potencia, ángulo

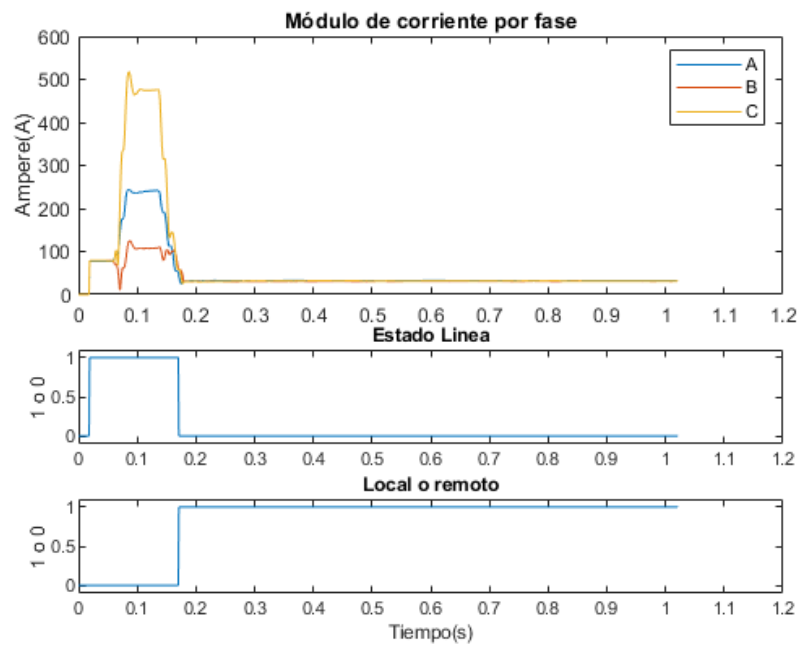


Figura 6.19: Corriente, estados

Capítulo 6. Desarrollo del algoritmo en MATLAB

6.4.2.2. Falta monofásica en LIB-COL

Continuamos simulando un evento de falta monofásica sobre la línea LIB-COL, el mismo fue despejado mediante una apertura tripolar.

Las medidas registradas corresponden al extremo de COL.

Debido al alto valor de corriente de cortocircuito y a los bajos valores de corriente post y pre evento, se decidió presentar una figura adicional en la que se vea con más detalle los valores de corriente, figura 6.22.

Como se observa en la figura 6.21 y en 6.22, previo a la ocurrencia de la falta monofásica y durante la misma, la línea se encuentra operativa, lo cual se ve reflejado en el valor de Estado Línea. Una vez despejada la falta, mediante una apertura tripolar, la línea sale de operación, por lo que se ve un 0 en Estado Línea.

Alrededor de los 0,65 segundos, ocurrió el cierre del interruptor de COL (dejando a la línea momentáneamente en vacío), momento en el que la función Local/Remoto cambia a 1. Luego ocurre el cierre del interruptor de LIB dejando a la línea con ambos extremos cerrados (Estado Línea pasa a ser alta y Local/Remoto pasa a ser baja).

Por último, el ángulo observado en la figura 6.20 presenta un comportamiento particular. En la misma figura, se observa que la tensión se torna nula durante la apertura del interruptor de COL, esto es debido a que la medida de tensión registrada para este evento fue tomada aguas debajo del interruptor en cuestión. A consecuencia de esto y a que la corriente sea nula durante el mismo período de tiempo, el ángulo entre ambas magnitudes resulta tener un comportamiento caótico. Esto se debe en parte a que ambas magnitudes no resultan ser exactamente nulas, sino que tienen pequeñas variaciones en torno a cero.

6.4. Resultados

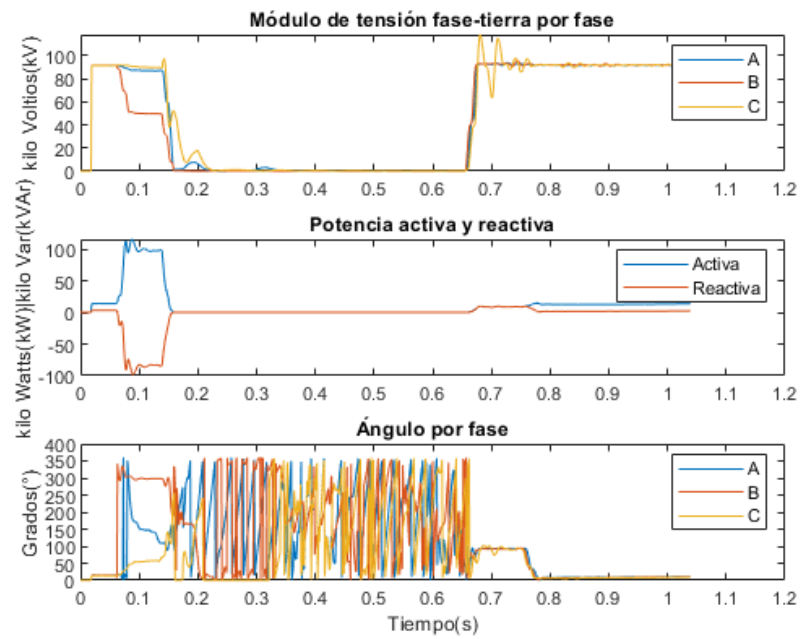


Figura 6.20: Tensión, potencia, ángulo

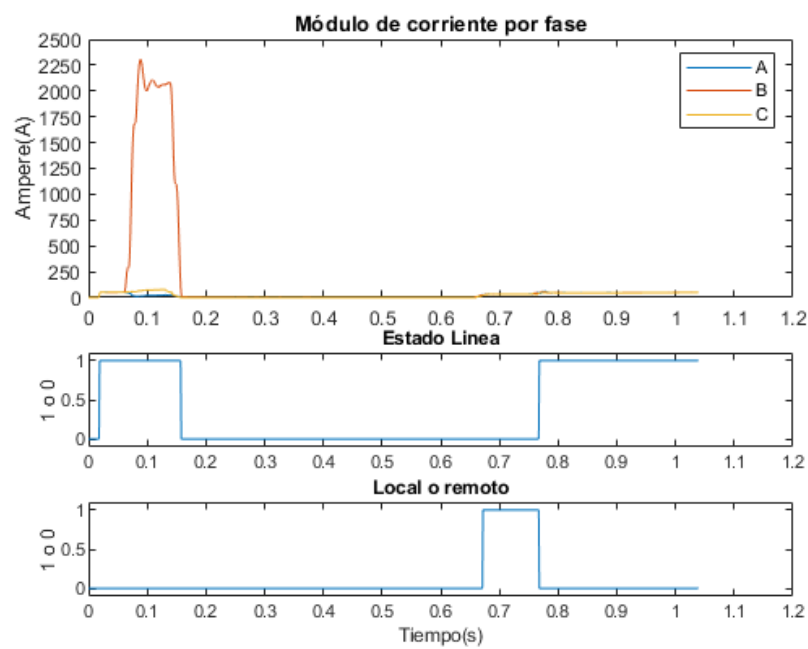


Figura 6.21: Corriente, estados

Capítulo 6. Desarrollo del algoritmo en MATLAB

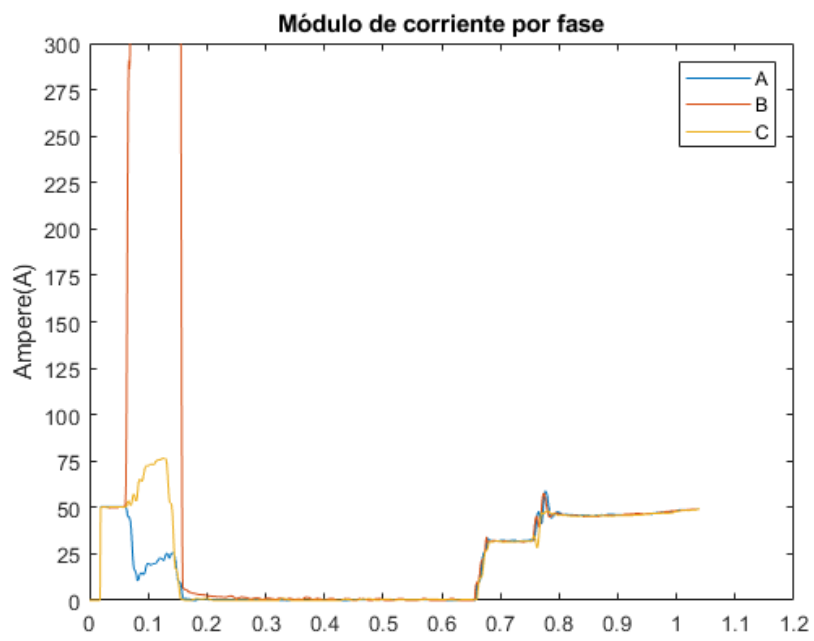


Figura 6.22: Detalle de corriente

Capítulo 7

Adaptación del algoritmo a SELogic

La implementación del algoritmo para su uso en el relé fue realizado en el software *AcSELerator* provisto por la empresa fabricante del equipo. Mediante este software el usuario cuenta con amplio acceso a la configuración propia del relé en cuestión, pudiendo diseñar e implementar sus propias lógicas, modificar o crear nuevas gráficos para la HMI, verificar la comunicación con los equipos, entre otras configuraciones.

Respecto a la creación de nuevas lógicas, este software presenta dos entornos para su desarrollo, por un lado el *ProtectionLogic*, un entorno de implementación mediante líneas de código (en nuestra caso más familiar al software MATLAB) y por otro lado el *GraphicalLogic*, un nuevo entorno de desarrollo basado en la programación mediante bloques gráficos lógicos, de un formato similar a los diagramas de bloques funcionales de la norma IEC61131. Este último entorno presenta una gran ventaja respecto al primero: obtener una imagen gráfica de la lógica permite una mejor comprensión sobre los vínculos y relaciones entre variables, así como una manera más fácil de visualizar posibles errores.

Para nuestra adaptación del algoritmo en SELogic obtuvimos una archivo de una implementación previa en el relé, de manera de evitar tener que realizar toda la configuración inicial en el equipo (la cual no forma parte de los objetivos de este proyecto) y sobre este archivo se realizó el algoritmo.

7.1. Equipo utilizado

Para la prueba final de funcionamiento del algoritmo se utilizó un Relé SEL-451, figura 7.1, un equipo universal de prueba de relés (OMICRON CMC 356), figura 7.2 y el software específico del equipo de pruebas.

Se cablearon las salidas del equipo de inyección a los terminales de entrada para las medidas del relé, y mediante los archivos Comtrade ingresados al software del equipo de pruebas se logró inyectar las magnitudes correspondientes a los eventos

Capítulo 7. Adaptación del algoritmo a SELogic

registrados.



Figura 7.1: Relé SEL-451

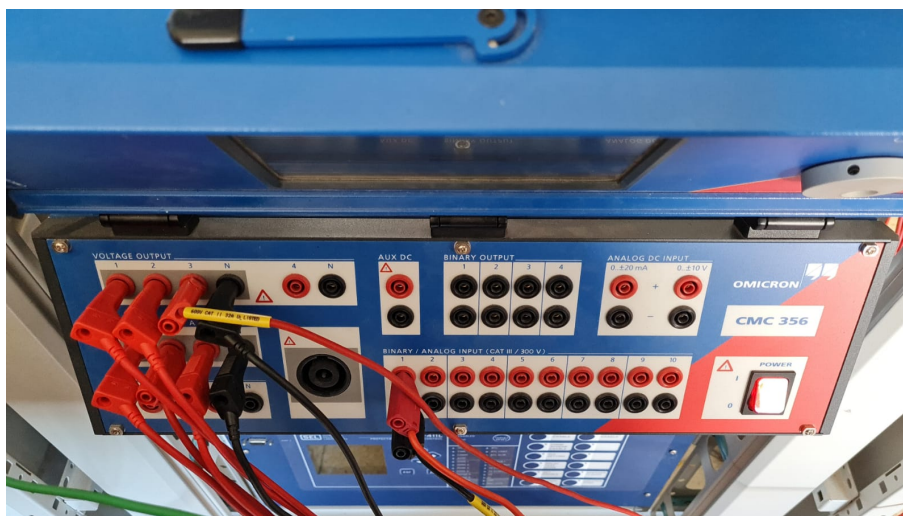


Figura 7.2: Equipo de prueba de relés

7.2. Cálculo de Magnitudes

A continuación se presenta una descripción de las magnitudes de interés utilizadas para la programación del algoritmo.

PMV 1,2,3, , Ángulo de las fases A, B y C respectivamente. Correspondiente al ángulo de desfase entre corriente y tensión de la fase en cuestión.

7.3. Definición de variables

APL 1,2,3 , Potencia activa en las fases A, B y C. Calculada a partir del producto entre la medida de corriente, de tensión y el coseno del ángulo entre estas magnitudes.

AQL 1,2,3 , Potencia reactiva en las fases A, B y C. Calculada análogamente a la magnitud anterior.

ABS3PL1 , Valor absoluto de la suma de las potencias activa de cada fase, **APL01**, **APL02**, **APL03**.

ABS3QL1 , Valor absoluto de la suma de las potencias reactiva de cada fase, **AQL01**, **AQL02**, **AQL03**.

IAPRI, **IBPRI**, **ICPRI** , Módulo del fasor de la corriente en rms de las fases A, B y C. Calculada mediante el producto de la medida de corriente recibida por el relé con la relación de transformación del transformador de corriente.

VA kV Mag, **VB kV Mag**, **VC kV Mag** , Módulo del fasor de la tensión fase tierra en rms de las fases A, B y C. Calculada mediante el producto de la medida de tensión recibida por el relé con la relación de transformación del transformador de medida de tensión.

7.2.1. Ingresadas por el usuario

Las siguientes magnitudes son las que el usuario debe ingresar según los criterios que haya definido.

IVA , Valor correspondiente a la corriente de vacío de la línea a supervisar.

ERRORP y **ERRORQ** , Mínimos valores de potencia activa y reactiva, referentes a la sección 6.2.3

COSPHI , Valor de coseno utilizado para la función ángulo 6.2.2 (Se podría implementar directamente con el ángulo)

7.3. Definición de variables

En esta sección se definen las variables de interés utilizadas en la programación del algoritmo en el lenguaje del relé. Las mismas toman el valor booleano 1 si se cumplen las condiciones mencionadas a continuación:

PSV12 , Las corrientes de las tres fases son menores que la corriente de vacío de la línea (asociada a la función 6.3.3).

PSV15 , La potencia activa y reactiva son menores que cierta cota (asociada a la función 6.3.1).

PSV23 , El ángulo de las tres fases se encuentra dentro de las zonas 2 o 4 mencionadas en la función 6.3.2.

Capítulo 7. Adaptación del algoritmo a SELogic

PSV25 , $\text{NOT}((PSV12 \text{ AND } PSV23) \text{ OR } PSV15)$. Representa la salida que indica el estado de la línea (asociada a la función 6.3.4).

PSV26 , Representa la salida retardada de PSV25 (asociada a la función 6.3.6)

PSV42 , En la situación donde *PSV26* presenta la salida correspondiente a la línea fuera de servicio, *PSV42* se hace activa para indicar que la apertura fue remota, en caso contrario la salida baja para indicar una apertura local. Función referente a la sección 6.3.5.

7.4. Funciones implementadas en SELogic

A partir del entorno de desarrollo *GraphicalLogic* (el cual se mencionó al comienzo del presente capítulo), se presentan las funciones implementadas en el relé de una manera gráfica, las cuales se encuentran comentadas en la secciones 6.3.1 a 6.3.6.

7.4.0.1. Función potencia

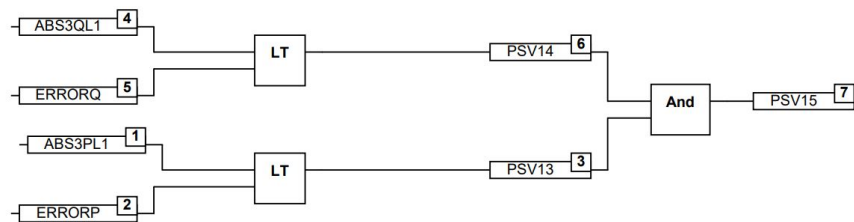


Figura 7.3: Función potencia SELogic

7.4.0.2. Función corriente

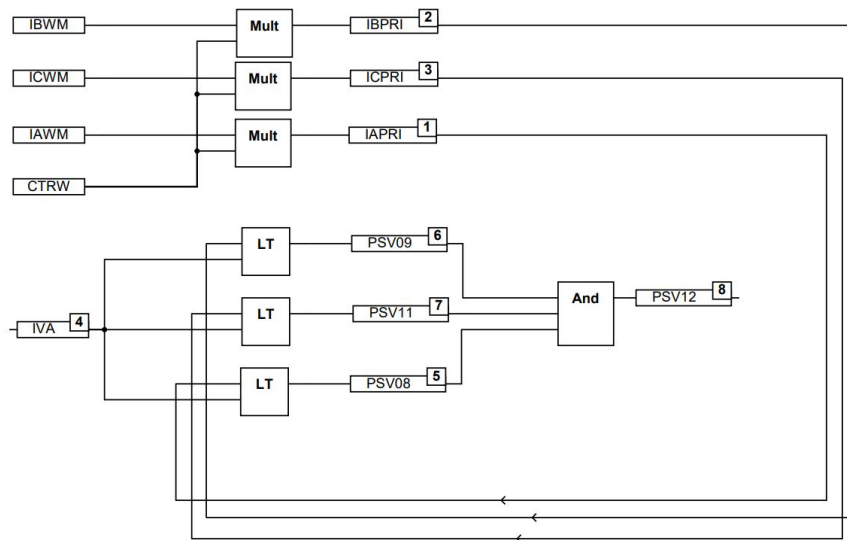


Figura 7.4: Función corriente SELogic

Capítulo 7. Adaptación del algoritmo a SELogic

7.4.0.3. Función ángulo

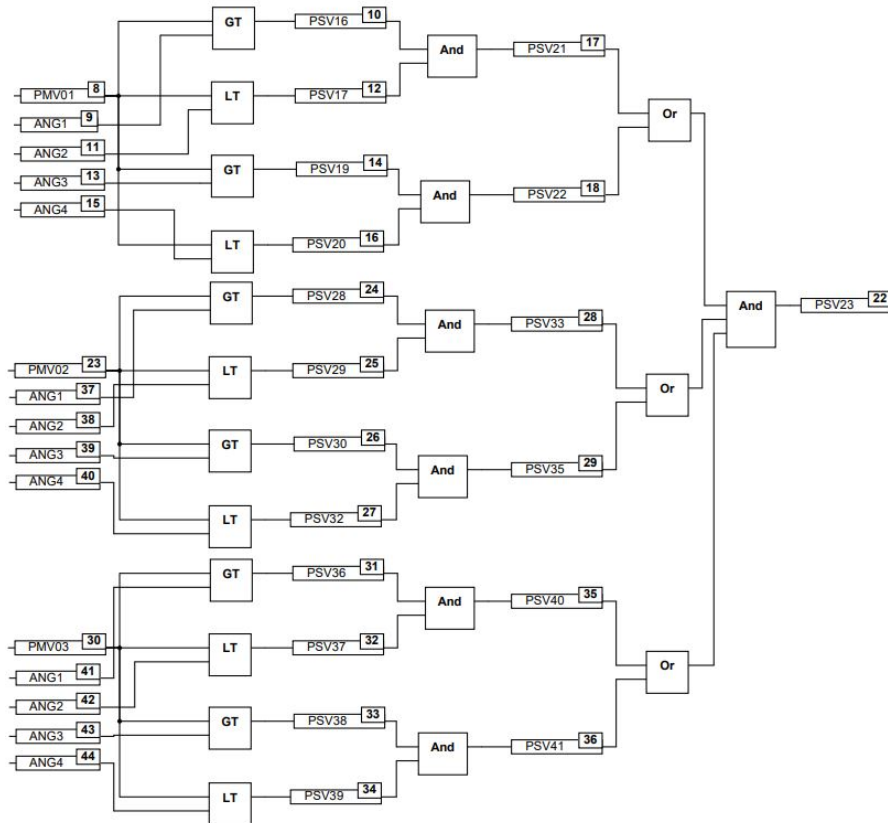


Figura 7.5: Función ángulo SELogic

7.4. Funciones implementadas en SELogic

7.4.0.4. Función salida

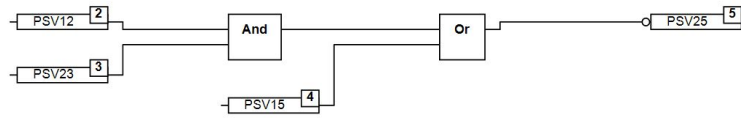


Figura 7.6: Función salida SELogic

7.4.0.5. Función retardo

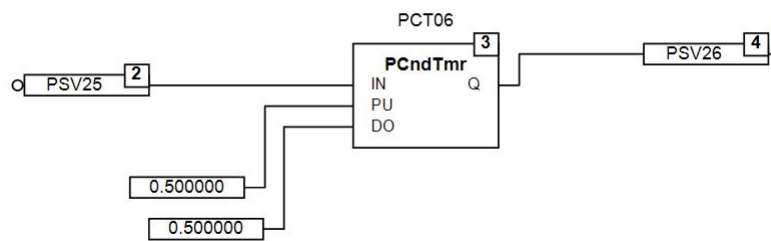


Figura 7.7: Función retardo SELogic

7.4.0.6. Función local/remoto

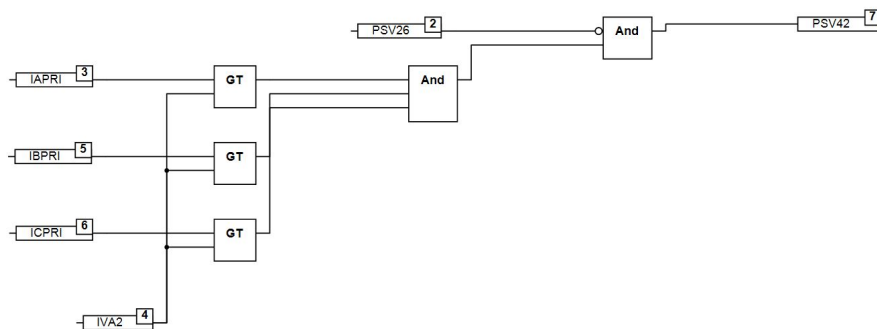


Figura 7.8: Función retardo SELogic

7.5. Resultados

Se presentan los resultados de las distintas simulaciones realizadas en el relé. Se aplicó el algoritmo a nueve registros de la línea Libertad-Colonia y a uno correspondiente a la línea Young-Paysandú. Las figuras que se presentan a continuación corresponden al software Synchrowave, en el cual se pueden visualizar todas las magnitudes de interés indicadas en la sección 7.2 y las variables mencionadas en el punto 7.3.

Se comienza presentando las simulaciones de eventos particulares y por último en la sección 7.5.6 se muestran los resultados para los casos base de energización y desenergización de la línea.

7.5.1. Falta monofásica 1

En primer lugar, se presenta una simulación de una falta monofásica en la línea LIB-COL. En este caso, el registro corresponde al extremo LIB y no hubo recierre en dicho punto. El resultado obtenido se presenta en la figura 7.9.

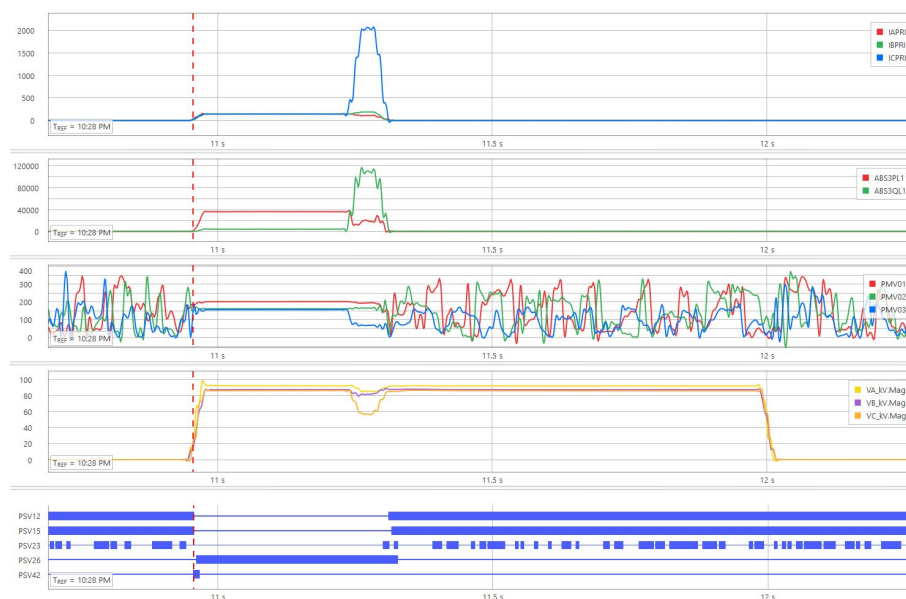


Figura 7.9: Falta monofásica 1

Tal como se observa en la figura, al comienzo de la simulación la línea se encuentra funcionando normalmente con carga, lo cual es indicado por el algoritmo mediante una salida alta en la variable PSV26. Las restantes variables (PSV12, PSV15 y PSV23) se encuentran bajas debido a las siguientes razones: por las tres fases fluye una corriente mayor a la de vacío, ambas potencias son mayores que la cota implementada y por último los ángulos se encuentran en torno a 180 grados (una posible zona de funcionamiento normal).

Cuando se produce el cortocircuito y hasta que el mismo se despeja, PSV26 continúa valiendo 1. Luego, se produce una apertura tripolar, resultando en un 1 en

7.5. Resultados

la variable PSV15 (condición suficiente para decir que la línea no está en servicio), la cual hace cambiar a PSV26 a un estado bajo, indicando que la línea ya no se encuentra en servicio.

Por último, la variable PSV42 vale 0, indicando que la apertura fue local, es decir, en el extremo LIB.

7.5.2. Falta monofásica 2

Se presenta nuevamente la simulación de la sección 6.4.2.2. En la misma se tiene una falta monofásica sobre la línea LIB-COL la cual es despejada mediante una apertura tripolar. El registro corresponde al extremo COL.

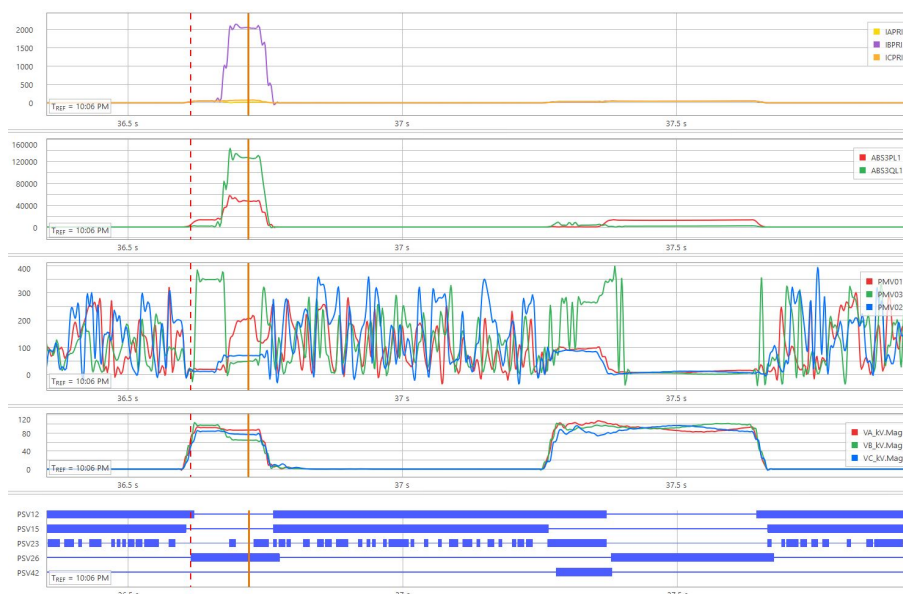


Figura 7.10: Falta monofásica 2

En la figura 7.10 se puede observar que la línea comienza funcionando normalmente hasta que se produce el cortocircuito. Tal como en el caso anterior, la variable PSV26 nos indica que la línea está en servicio hasta que ocurre la apertura del interruptor. En este momento, la señal mencionada pasa a valer 0, mientras que la variable PSV42 nos indica que la apertura fue en el extremo local (COL). Más adelante, se produce el recierre del extremo COL, quedando la línea en vacío. En esta situación, el algoritmo indica que la línea aún se encuentra fuera de servicio (PSV26 en 0), pero ahora la señal PSV42 pasa a valer 1, ya que el extremo que se encuentra abierto es el remoto (LIB). Finalmente, se produce el recierre del interruptor de Libertad, volviendo al funcionamiento normal de la línea (PSV26 toma el valor 1).

7.5.3. Falta en línea RME-ROS

Esta simulación corresponde al registro mencionado en la sección 6.4.2.1. En este caso, ocurrió una falta en la línea RME-ROS que fue despejada con una apertura monofásica. Simultáneamente con dicho cortocircuito, abrió el disyuntor ubicado en el extremo LIB de la línea LIB-COL, quedando la línea transitoriamente abierta en LIB y cerrada en COL.

7.5.3.1. Extremo COL

La figura 7.11 corresponde al registro en el extremo de Colonia.

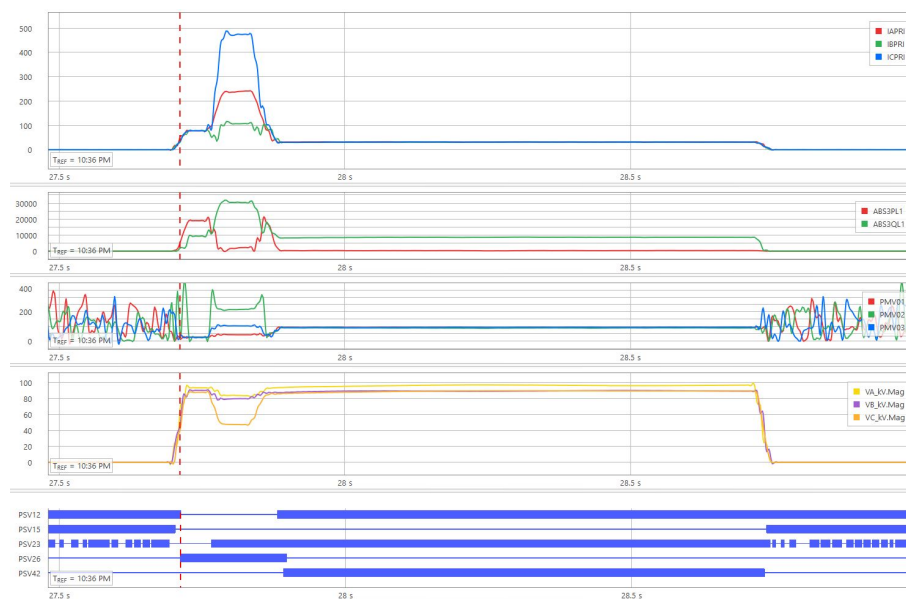


Figura 7.11: Falta en línea RME-ROS, extremo COL

Tal como se puede observar, el algoritmo indica que la línea se encuentra en servicio hasta que se despeja el cortocircuito. Cuando esto ocurre, la línea queda en vacío, por lo que la señal PSV26 pasa a valer 0. A su vez, la variable PSV42 nos dice que el extremo que abrió es el remoto (Libertad).

7.5.3.2. Extremo LIB

Siguiendo con el mismo caso, el siguiente es el registro del extremo de Libertad.

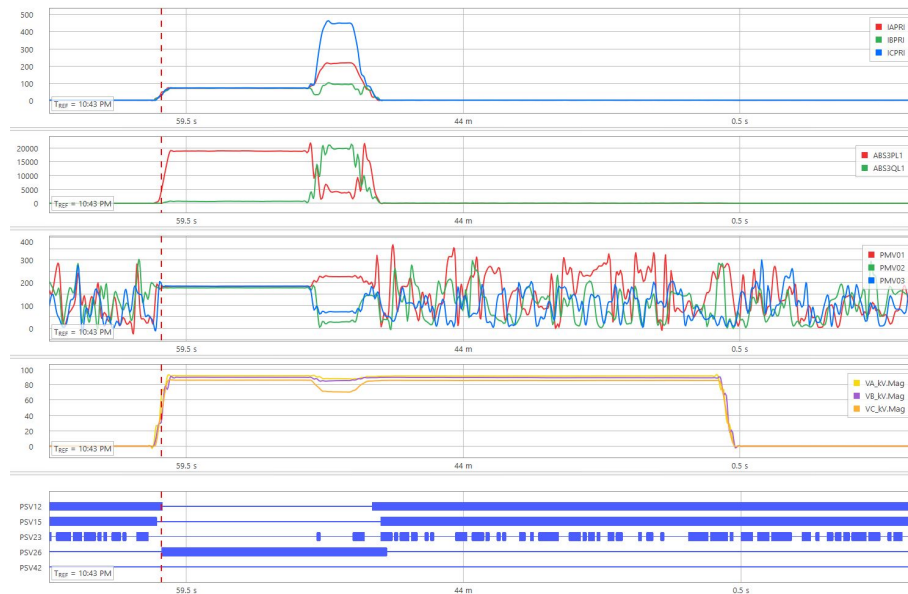


Figura 7.12: Falta en línea RME-ROS, extremo LIB

En la figura 7.12 se ve que la variable PSV26 tiene un comportamiento exacto al registro del extremo de Colonia, lo cual es de esperarse. En cambio, la señal PSV42 corresponde al opuesto de ésta misma variable vista en la figura 7.11 (durante el tiempo en que la línea está fuera de servicio). Esto es debido a que ahora el extremo local es Libertad, cuándo en la simulación anterior era Colonia. Es decir, el algoritmo nos indica nuevamente que el extremo abierto es el correspondiente a Libertad.

7.5.4. Falta monofásica en línea YOU-PAY

Uno de los objetivos planteados al comienzo de este proyecto era que el algoritmo a desarrollar fuera genérico, en el sentido de que mediante cierto ingreso de datos, su funcionamiento se adaptara a cualquier línea de $150kV$.

En la siguiente simulación, figura 7.13, se presenta un registro correspondiente a la línea Young-Paysandu. En este caso, se tiene una falta monofásica con apertura monopolar y luego un recierre exitoso.

Capítulo 7. Adaptación del algoritmo a SELogic

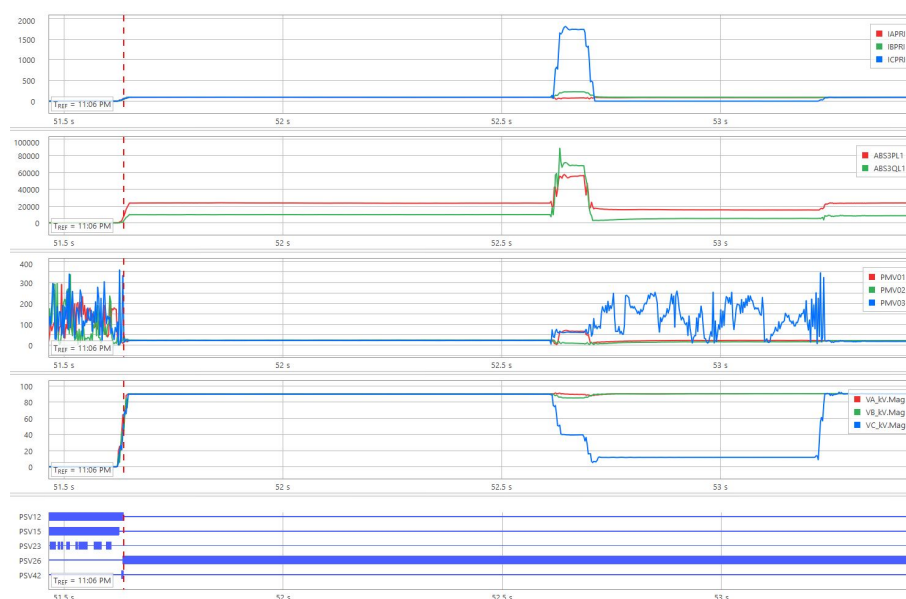


Figura 7.13: Falta monofásica en línea YOU-PAY

Justamente lo esperable es lo que se observa en la figura, PSV26 se encuentra alta durante todo el tiempo de simulación. A pesar de que la línea en cuestión pierde una de sus fases, las restantes permiten el flujo de potencia, por lo tanto la línea se debe considerar en servicio.

7.5.5. Inversión de potencia

Tal como se mencionó en la sección 5.2.3.3, un evento poco frecuente pero existente es una situación de inversión de potencia en la red. En este fenómeno, debido a un cambio en la topología o en las cargas de la red se puede producir una inversión en el flujo de potencia.

Para este tipo de eventos la línea debe considerarse en servicio, ya que el flujo cambió su dirección sin que ocurra ningún evento de apertura en los interruptores de la línea. Vale destacar que en la siguiente figura se presentan las potencias activas de cada fase, en lugar de la activa y reactiva trifásica, ya que de esta forma es posible visualizar claramente la inversión mencionada.

Debido a no contar con registros Comtrades reales para esta situación, se optó por generarlos mediante ATP.

7.5. Resultados

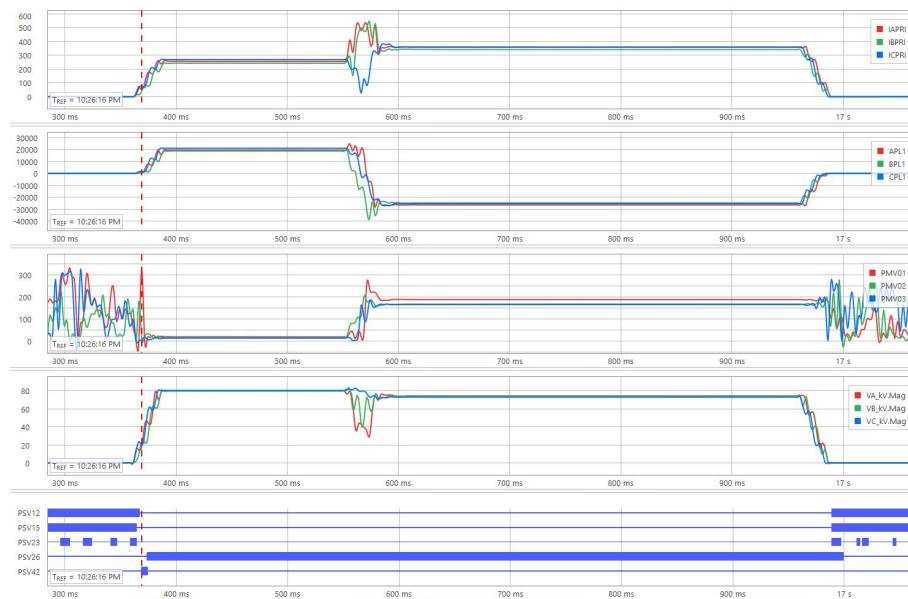


Figura 7.14: Inversión de potencia

Nuevamente en la figura 7.14 se observa que PSV26 se encuentra alta durante toda la simulación, indicando que la línea se encuentra en servicio.

7.5.6. Casos bases

En las siguientes simulaciones se presentan las situaciones de energización y desenergización de la línea LIB-COL con carga nominal, en ambas situaciones se analiza la apertura o el cierre por su extremo local y remoto.

Cada simulación corresponde a la situación planteada anteriormente en las secciones 6.4.1.2, 5.2.2.1, B.0.0.5 y 6.4.1.4 respectivamente.

Al igual que en la simulación anterior, los archivos Comtrade de las siguientes simulaciones fueron generados mediante ATP.

Capítulo 7. Adaptación del algoritmo a SELogic

7.5.6.1. Energización con carga nominal cierre en extremo local

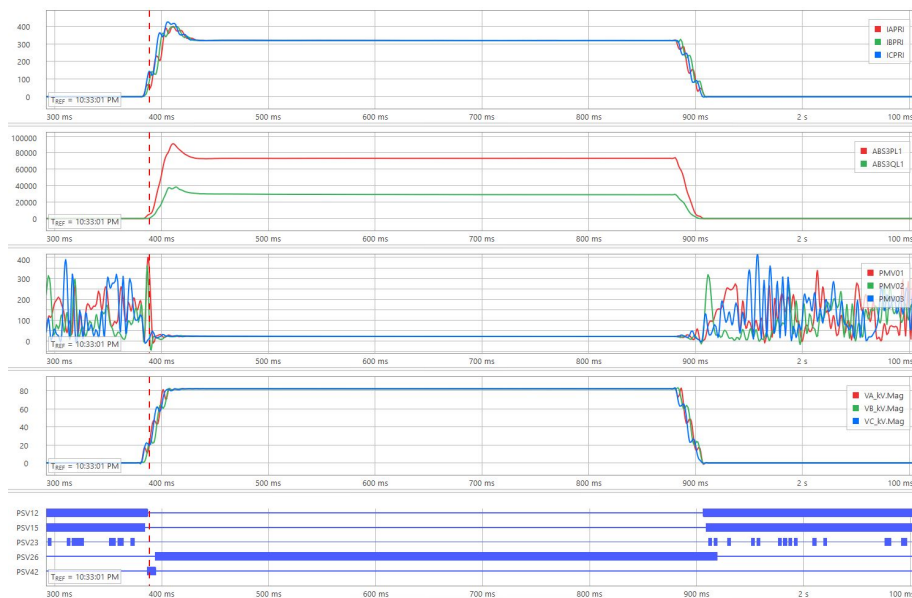


Figura 7.15: Energización con carga nominal cierre en extremo local

7.5.6.2. Energización con carga nominal cierre en extremo remoto

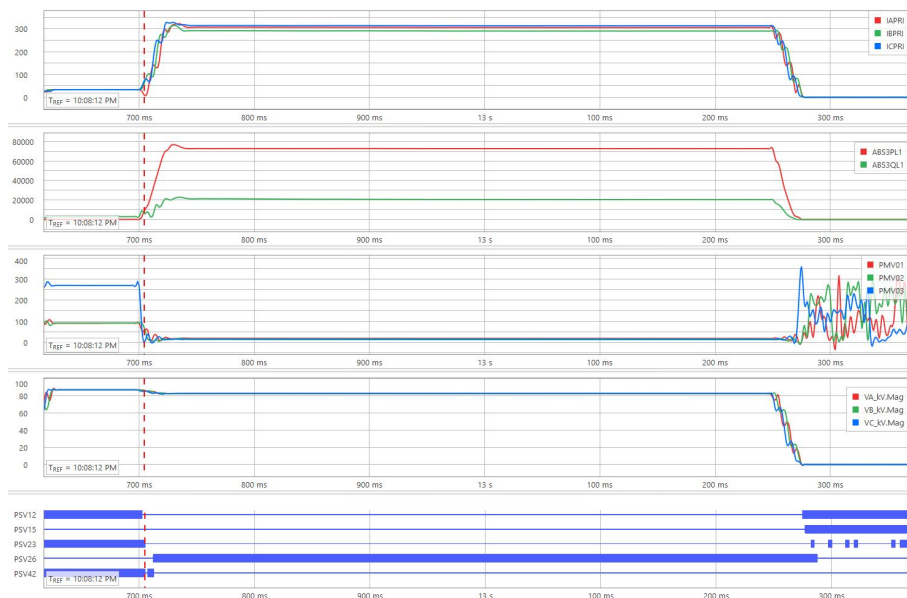


Figura 7.16: Energización con carga nominal cierre en extremo remoto

7.5. Resultados

7.5.6.3. Desenergización con carga nominal apertura en extremo local

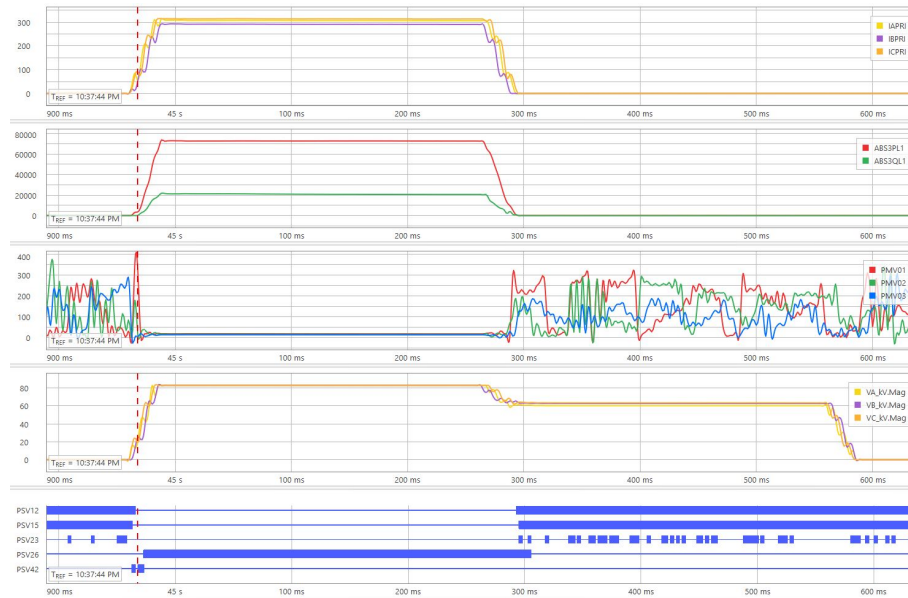


Figura 7.17: Desenergización con carga nominal apertura en extremo local

7.5.6.4. Desenergización con carga nominal apertura en extremo remoto

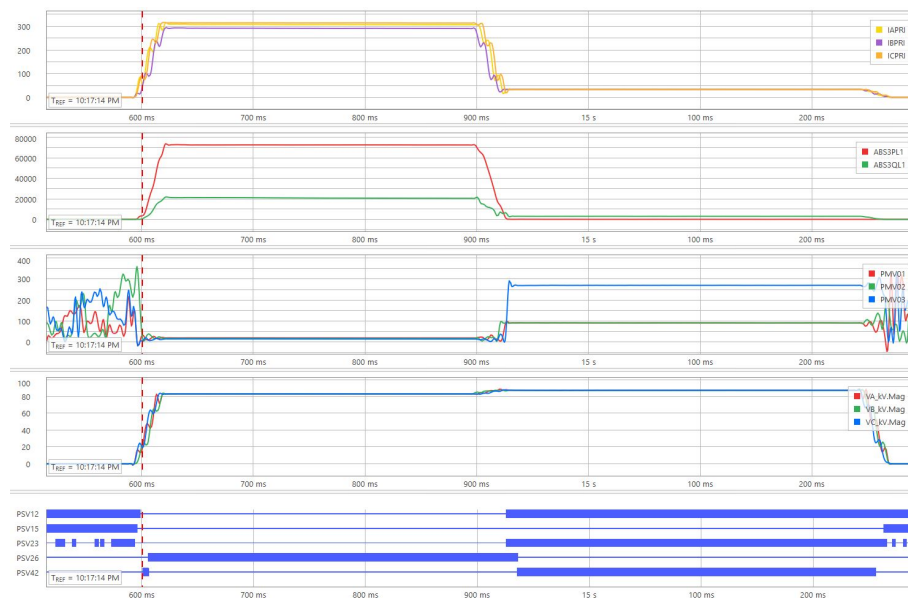


Figura 7.18: Desenergización con carga nominal apertura en extremo remoto

En función de los resultados de las simulaciones expuestas en la presente sección, se puede determinar el correcto funcionamiento del algoritmo para todas las posibilidades de energización o desenergización de la línea en cuestión.

7.5.7. Tiempos de actuación

Uno de los requisitos para el éxito del proyecto era tener un tiempo de actuación del algoritmo de alrededor de una tercera parte del tiempo que necesita el sistema RAS para funcionar adecuadamente, el cual ronda los 200 ms. La elección de dividir este tiempo en tres se debe a la asunción de que el tiempo requerido por el RAS se reparte equitativamente entre: el tiempo de procesamiento lógico del algoritmo, la comunicación de la información y la actuación del interruptor. Es decir, se tiene como objetivo que el algoritmo actúe en menos de 65 ms.

En la tabla 7.1 se presentan los tiempos de respuesta del algoritmo frente a un cambio en el estado de la línea. Dichos tiempos fueron medidos desde el momento en el que comienza el transitorio de la desenergización ó energización de la corriente, hasta el momento en el que la variable de salida PSV26 cambia de estado.

Tabla 7.1: Tiempos de actuación del algoritmo en el relé

Simulación	Tiempo (ms)
Falta monofásica 1	20
Falta monofásica 2	15
Falta en línea RME-ROS (COL)	60
Falta en línea RME-ROS (LIB)	60
Energización con carga nominal cierre en extremo local	12,5
Energización con carga nominal cierre en extremo remoto	15
Desenergización con carga nominal apertura en extremo local	42,5
Desenergización con carga nominal apertura en extremo remoto	40

Claramente las desenergizaciones producidas por el despeje de faltas resultan ser los eventos en los que el algoritmo presenta la respuesta más lenta, rondando los $60ms$ en el peor caso.

Capítulo 8

Conclusiones y Desarrollo a futuro

En primer lugar, consideramos que todos los objetivos propuestos al inicio del proyecto fueron cumplidos.

Comenzando por el funcionamiento del algoritmo para cualquier estado de la red, se simularon: energizaciones y desenergizaciones en ambos extremos de la línea (estando la misma en vacío, con carga nominal y con poca carga), faltas de tipo monofásico y trifásico, así como también una inversión de potencia. Se concluye que para todas estas simulaciones el algoritmo reportó el estado correcto de la línea.

Otro de los objetivos fundamentales del proyecto era que la respuesta del algoritmo fuera menor a $65ms$, tiempo correspondiente a la tercera parte del tiempo límite de actuación del RAS. A pesar de haberse implementado una función de retardo para la salida, todos los tiempos de actuación registrados fueron menores a $60ms$. Se entiende que el tiempo de actuación obtenido para la implementación supera los requerimientos necesarios.

En tercer lugar, cuando la línea se encuentra fuera de servicio, se tenía como objetivo que el algoritmo pueda identificar en qué extremo de la línea se produjo la apertura (local o remoto). Tal como se observó en las secciones correspondientes a los resultados, la función Local/Remoto implementada tuvo un desempeño satisfactorio, pudiendo cumplir con el objetivo planteado.

Finalmente, para cubrir todos los objetivos planteados en un comienzo, el último requerimiento era la flexibilidad que el algoritmo debía presentar, pudiendo ser utilizado en cualquier línea de $150kV$ mediante alguna información a ingresar por el usuario. Las simulaciones fueron realizadas principalmente en la línea Libertad-Colonia, pero también se simuló sobre la línea Young-Paysandú, obteniéndose para ambas resultados satisfactorios.

Por último, cabe destacar que a pesar de que el objetivo del algoritmo no era detectar si una línea está o no en vacío, se puede observar que en la situación donde la señal Estado Línea se encuentra en 0 y Local/Remoto se encuentra en 1,

Capítulo 8. Conclusiones y Desarrollo a futuro

el algoritmo comunica que la línea se encuentra en vacío.

En cuanto a la herramienta de simulación utilizada, se ahondó en el software ATPDraw, un programa ajeno en el desarrollo de la carrera de Ingeniería Eléctrica, pero que resultó ser fundamental para el modelado de la red eléctrica y para la generación de simulaciones que nos permitieron verificar el funcionamiento del algoritmo. Se pudo observar de primera mano lo poderoso del software, pudiendo simular de manera muy similar a la realidad, los fenómenos transitorios presentes en estas líneas.

Resulta muy interesante pensar que existe la posibilidad de que el desarrollo realizado en este trabajo pueda ser implementado en campo para todas o para algún número de líneas de transmisión de $150kV$ de la red eléctrica Uruguaya.

Como avances para la continuación de este trabajo se plantean una serie de puntos que pueden resultar de interés.

En las situaciones donde no se cuente con datos sobre la corriente de vacío de la línea a supervisar, podría ser de interés el desarrollo de una lógica tal que el anterior dato no sea necesario, ya que se puede determinar a partir de los datos del modelo π de la línea. Es decir, se podría implementar una función en la cual los datos de entrada sean la impedancia y admitancia de la línea, y la salida sea la corriente de vacío.

A pesar de que para los casos simulados no se encontró una situación donde el algoritmo no determinara el correcto estado de la línea, no se puede asegurar que la lógica desarrollada sea cien por ciento confiable. Por lo tanto, para aumentar su grado de confiabilidad se podría proponer la adición de nuevas funciones que complementen las ya desarrolladas. Por otro lado, la implementación de una lógica difusa en lugar de la booleana podría resultar en una modificación que puede aumentar aún más la certeza del algoritmo.

En este proyecto el ingreso de datos al relé se realizó mediante una computadora cableada al relé a configurar. A futuro podría ser de interés desarrollar una interfaz gráfica mediante la cual el operario o quien desee configurar el relé, pueda realizarlo sin la necesidad de conectarse físicamente a él, mediante el HMI (Human Machine Interfase) integrado en el equipo o a de manera remota.

Como último punto podría ser interesante simular el comportamiento del algoritmo para un mayor número de líneas de $150kV$, así como también corroborar su funcionamiento para líneas de mayor o menor nivel de tensión.

Apéndice A

Modelado y simulaciones de la red

A.0.0.1. Desenergización con carga nominal, apertura en extremo remoto

Se utilizó el circuito de la figura 5.6 para esta simulación. A diferencia de la sección 5.2.2.1, la carga comienza conectada a la línea y en el segundo 0,3 se produce su desconexión en su extremo remoto.

Lo que observamos en las figuras A.1 y A.2 es análogo a lo visto en la simulación 5.2.2.1, con la única diferencia que se pasó de un estado de alimentación de la carga a una situación en vacío.

Apéndice A. Modelado y simulaciones de la red

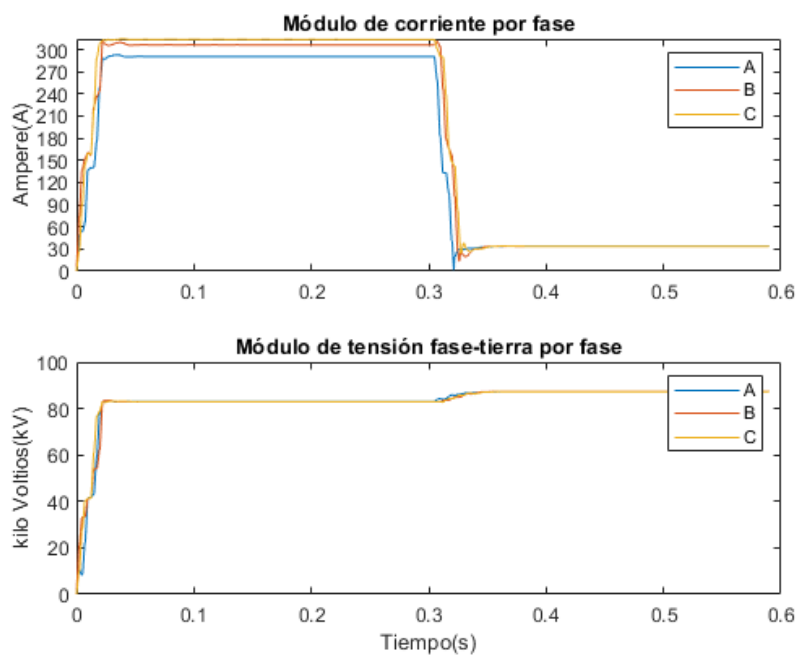


Figura A.1: Módulo de corriente y tensión

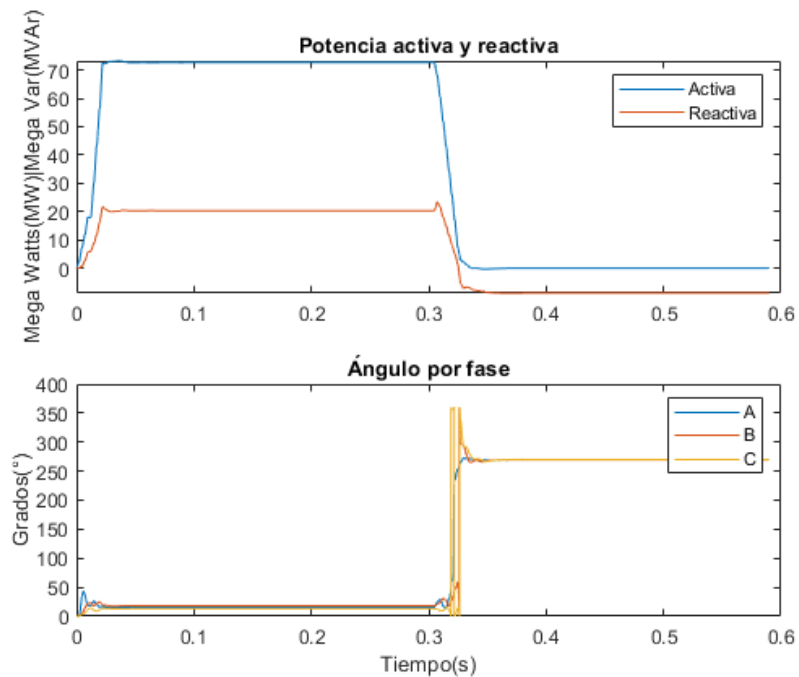


Figura A.2: Potencia activa, reactiva y ángulo

A.0.0.2. Desenergización con carga nominal, apertura en extremo local

En esta simulación el disyuntor que se encuentra operando es el ubicado en Libertad y se busca mostrar qué ocurre cuando se da su desconexión. Este evento toma lugar en el segundo 0,3.

Lo que observamos en las figuras A.3 y A.4 es análogo a lo observado en la sección 6.4.1.2, con la única diferencia que se pasó de un estado de alimentación de la carga a una situación de desconexión de la línea en su extremo local.

Apéndice A. Modelado y simulaciones de la red

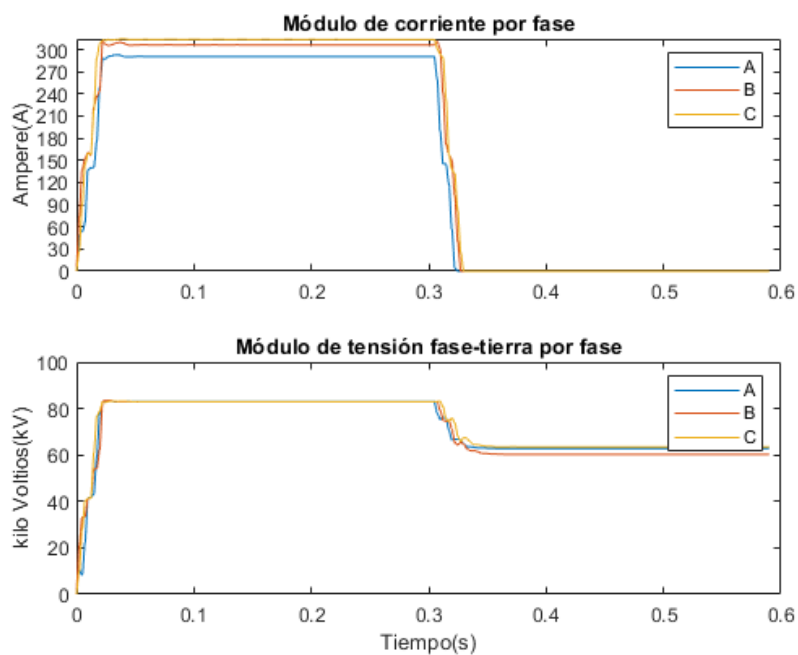


Figura A.3: Módulo de corriente y tensión

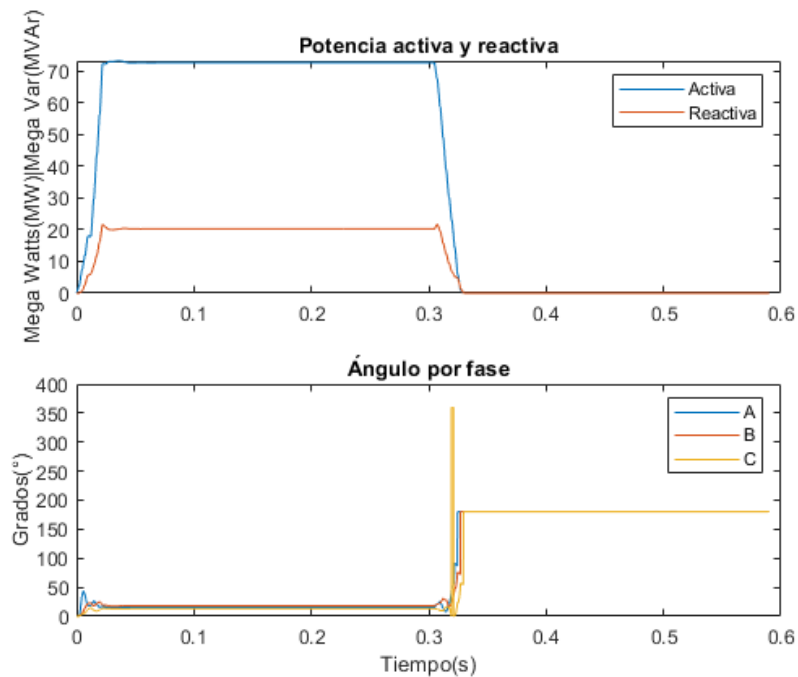


Figura A.4: Potencia activa, reactiva y ángulo

A.0.0.3. Desenergización con poca carga, apertura en extremo local

Esta simulación es análoga a la de la sección A.0.0.2, con la diferencia de que la carga a conectar es la de pequeño valor.

Lo que observamos en las figuras A.5, A.6, es análogo a lo observado en la sección 5.2.2.3, con la diferencia que pasamos de un estado de alimentación de la carga a una situación de desconexión de la línea en su extremo local.

Apéndice A. Modelado y simulaciones de la red

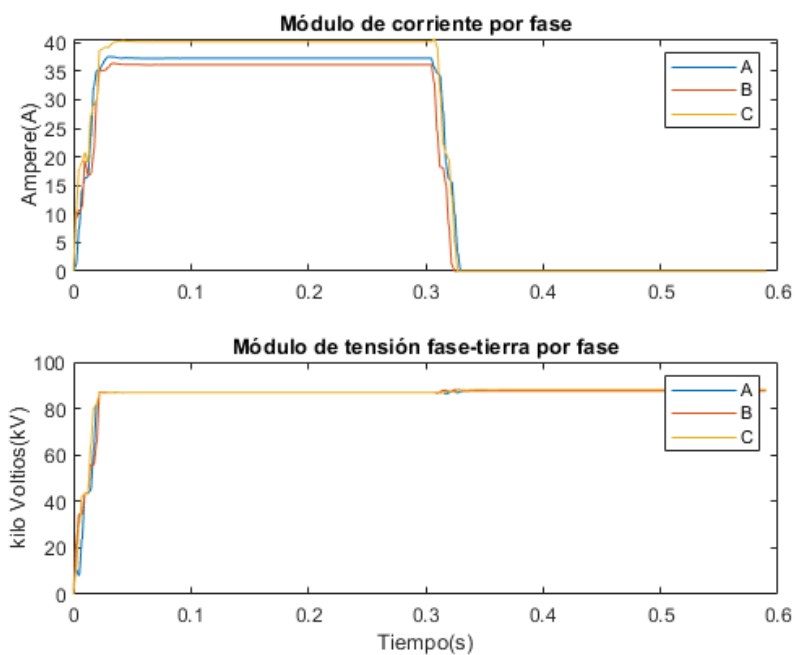


Figura A.5: Módulo de corriente y tensión

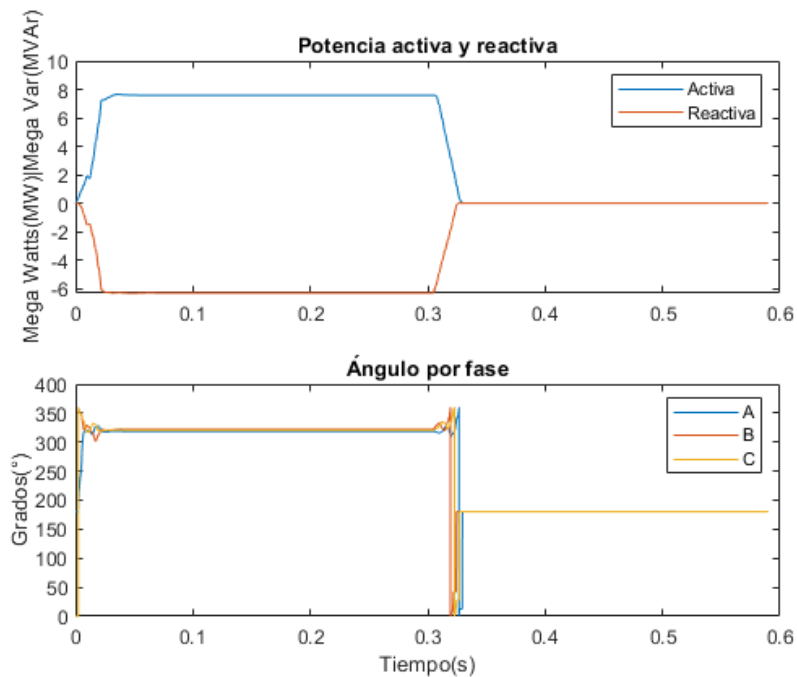


Figura A.6: Potencia activa, reactiva y ángulo

A.0.0.4. Desenergización con poca carga, apertura en extremo remoto

Esta simulación es análoga a la de la sección A.0.0.3, con la diferencia de que el disyuntor que opera es el ubicado en el extremo local.

Lo que observamos en las figuras A.7 y A.8 es análogo a lo observado en la sección 6.4.1.3, únicamente que pasando de un estado de alimentación de la carga a una situación de desconexión de la línea en su extremo remoto.

Apéndice A. Modelado y simulaciones de la red

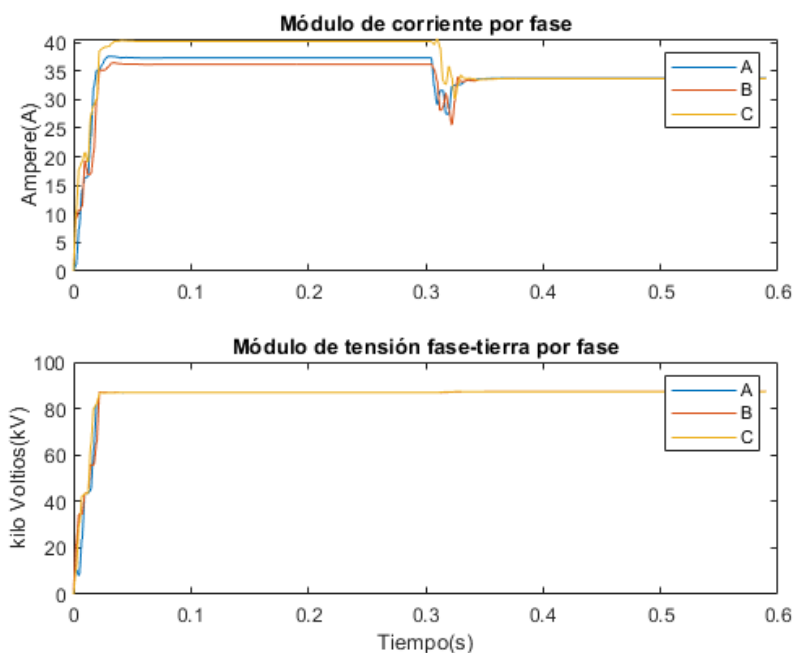


Figura A.7: Módulo de corriente y tensión

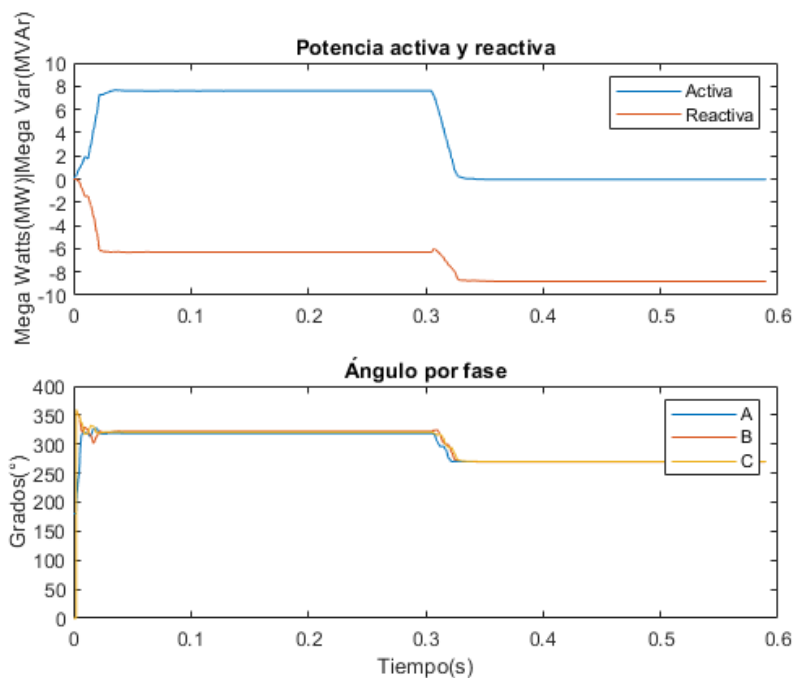


Figura A.8: Potencia activa, reactiva y ángulo

Apéndice B

Desarrollo del algoritmo en MATLAB

B.0.0.1. Energización con línea abierta, cierre en extremo local

Al comienzo de esta simulación, la línea se encuentra desconectada en ambos extremos, por lo cual el algoritmo indica que se encuentra fuera de servicio y abierto el extremo local (figura B.2). Una vez que se cierra el disyuntor del extremo local, la salida del programa continúa indicando que la línea se encuentra fuera de servicio, ya que su extremo remoto sigue abierto. Por último, el programa también nos comunica con el valor 1 de la función Local/Remoto que el extremo que se encuentra abierto ahora es el remoto.

Apéndice B. Desarrollo del algoritmo en MATLAB

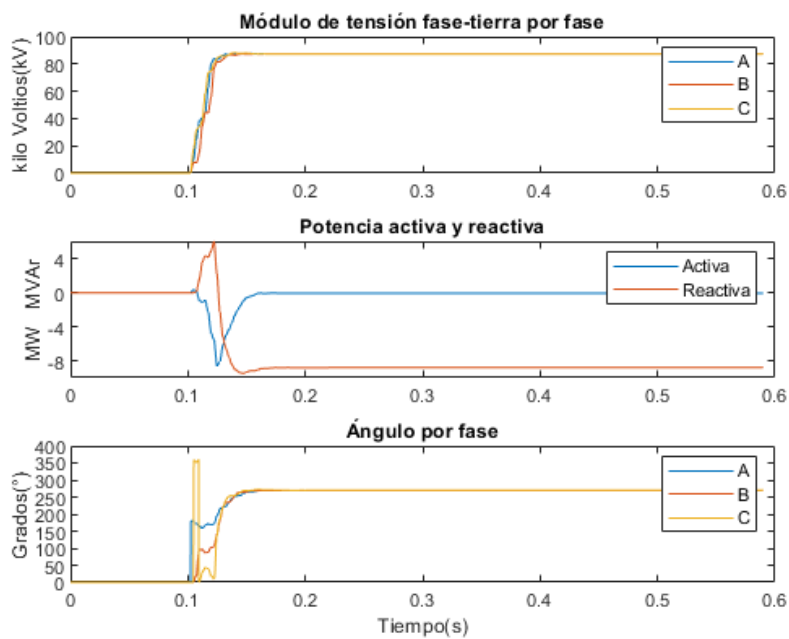


Figura B.1: Tensión, potencia, ángulo

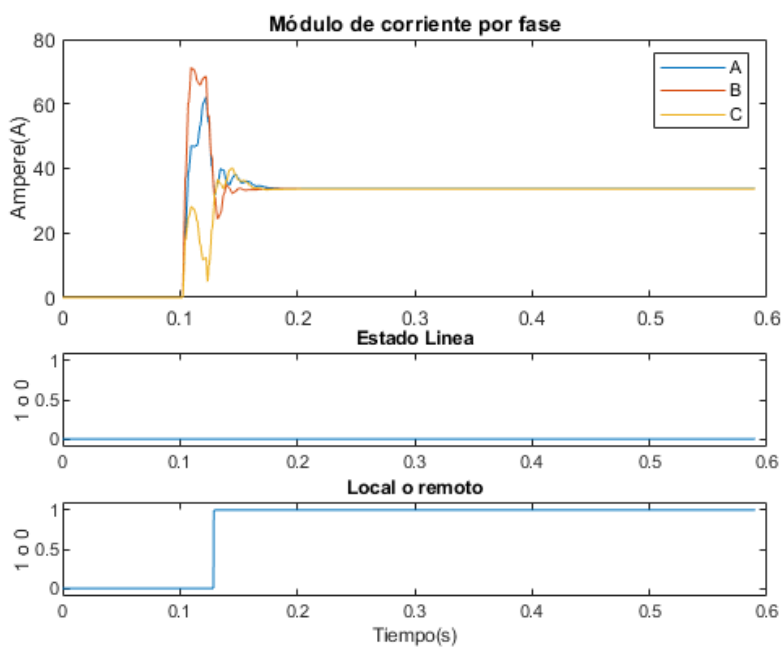


Figura B.2: Corriente, estados

B.0.0.2. Desenergización línea abierta, apertura en extremo local

Este caso es análogo al de la sección B.0.0.1, ya que la línea pasa de estar conectada solo en su extremo local a estar descontada en ambos extremos. Es decir, se encuentra siempre fuera de servicio.

Apéndice B. Desarrollo del algoritmo en MATLAB

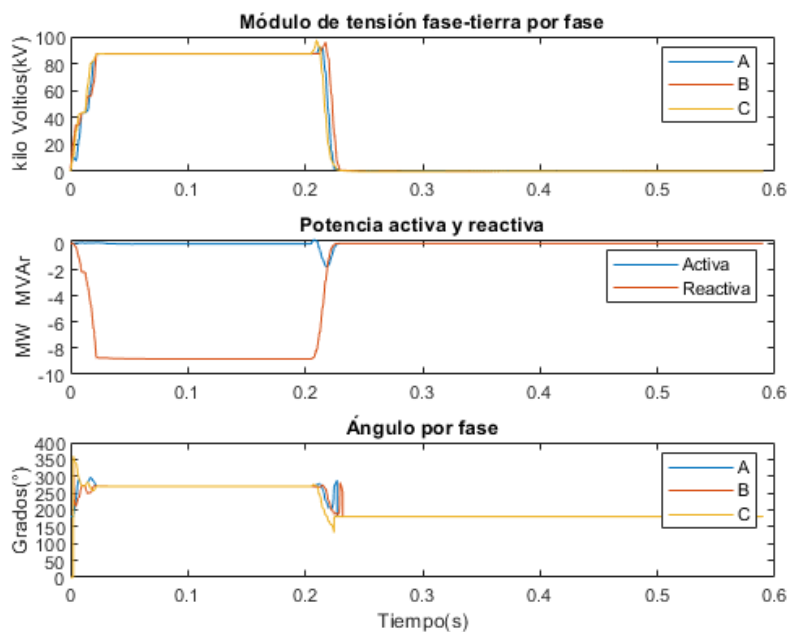


Figura B.3: Tensión, potencia, ángulo

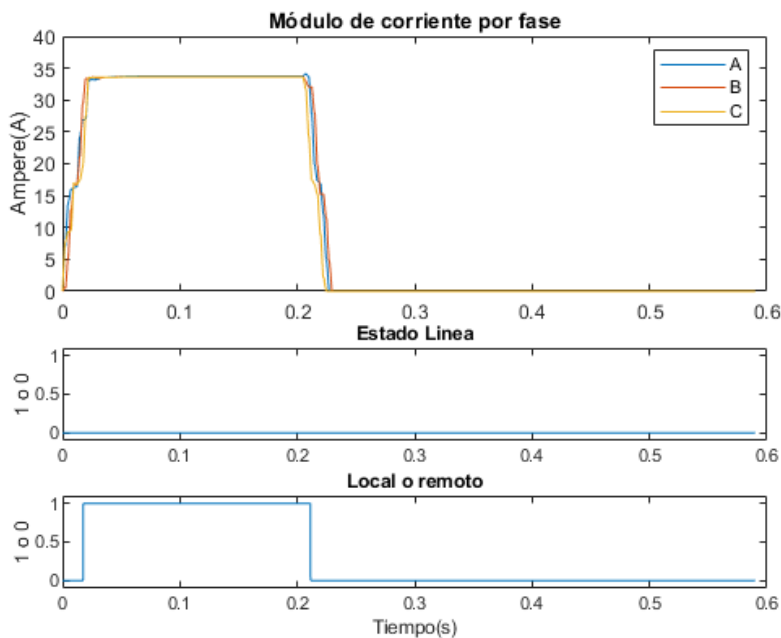


Figura B.4: Corriente, estados

B.0.0.3. Energización con carga nominal, cierre en extremo remoto

Esta simulación es análoga a la de la sección 6.4.1.2. La diferencia es que en este caso la línea comienza con su extremo remoto desconectado, lo cual es indicado por la función Local/Remoto en la figura B.6.

Apéndice B. Desarrollo del algoritmo en MATLAB

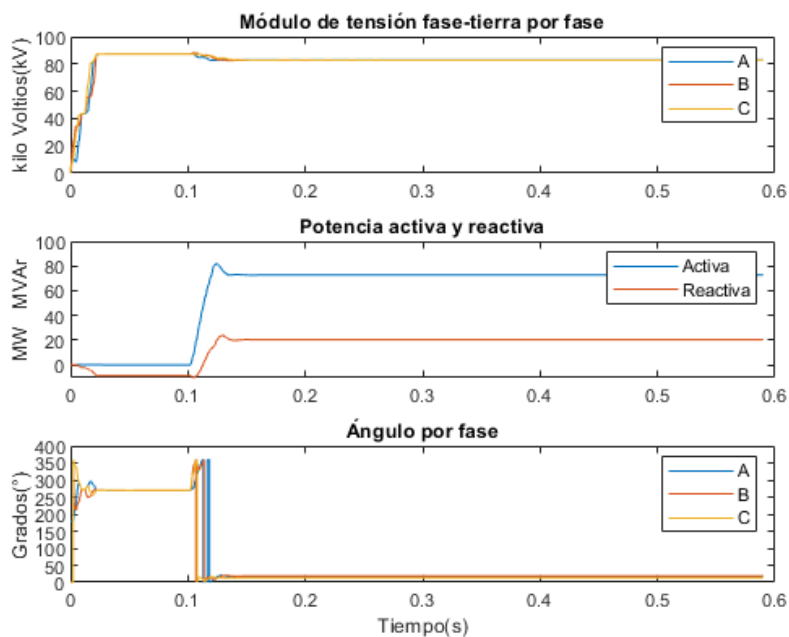


Figura B.5: Tensión, potencia, ángulo

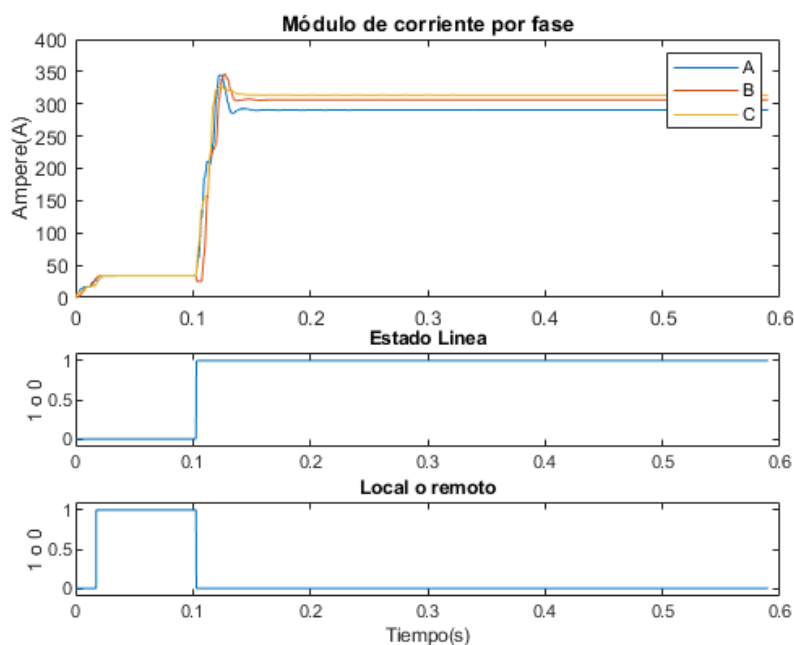


Figura B.6: Corriente, estados

B.0.0.4. Energización con poca carga, cierre en extremo local

Esta simulación es análoga a la de la sección 6.4.1.3. La diferencia es que en este caso la línea comienza con su extremo local desconectado, lo cual es indicado por la función Local/Remoto en la figura B.8.

Apéndice B. Desarrollo del algoritmo en MATLAB

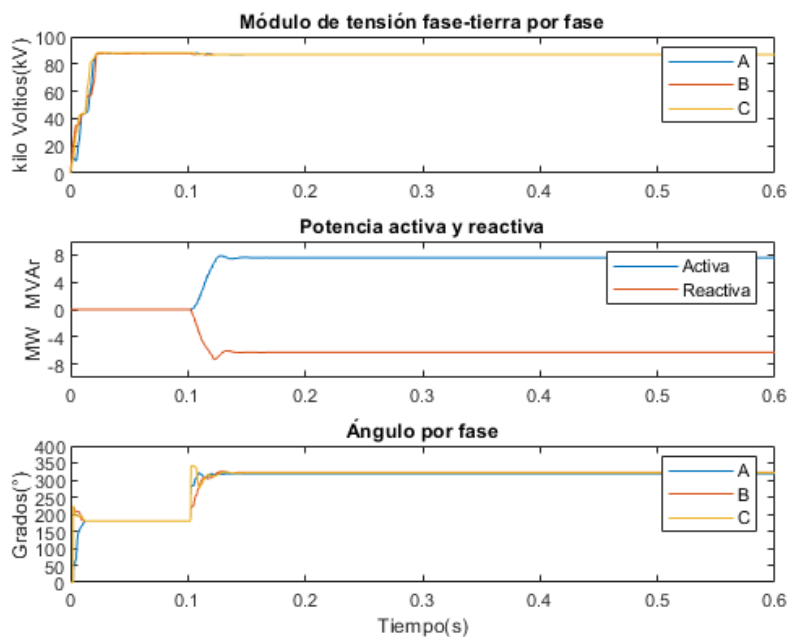


Figura B.7: Tensión, potencia, ángulo

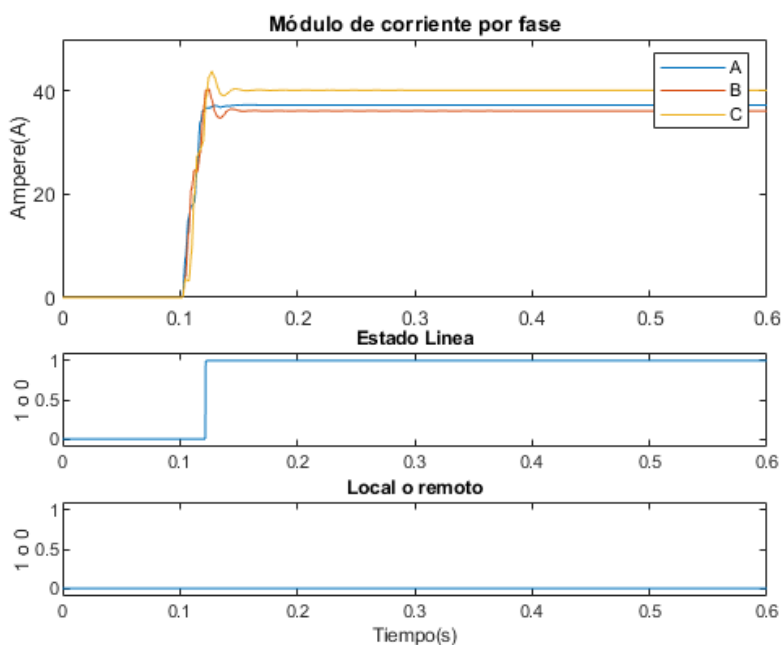


Figura B.8: Corriente, estados

B.0.0.5. Desenergización con carga nominal, apertura en extremo local

Esta simulación es análoga a la de la sección 6.4.1.4. La diferencia es que en este caso la línea sale de servicio cuando se abre su extremo local, lo cual es indicado por la función Local/Remoto en la figura B.10.

Apéndice B. Desarrollo del algoritmo en MATLAB

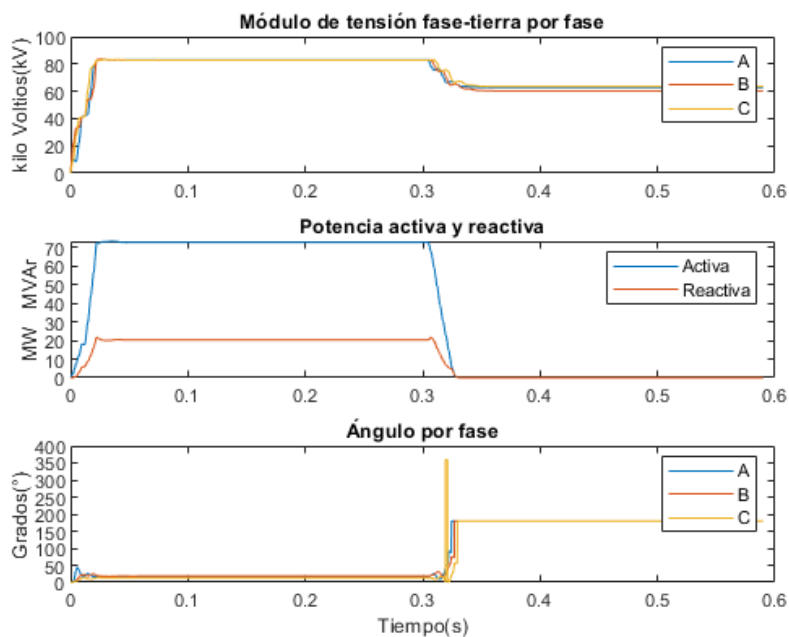


Figura B.9: Tensión, potencia, ángulo

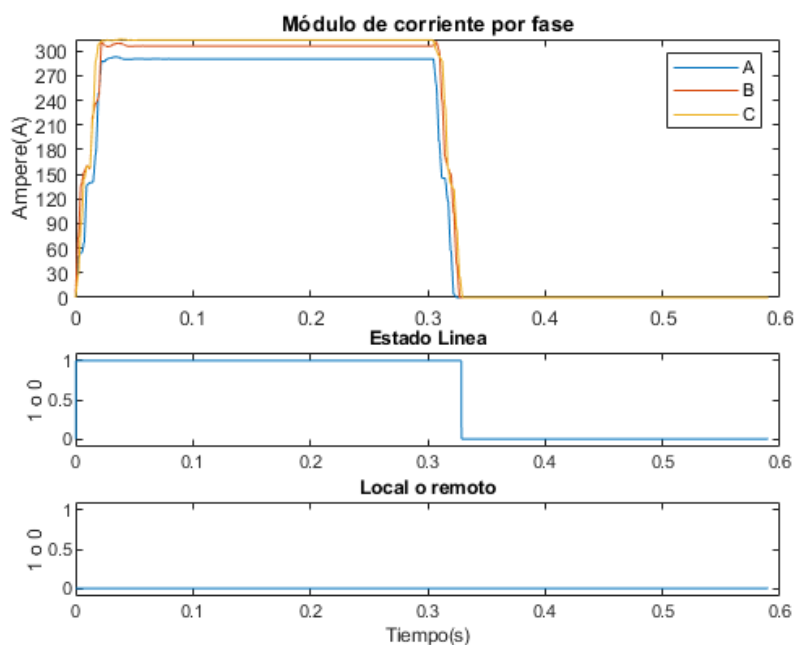


Figura B.10: Corriente, estados

B.0.0.6. Desenergización con poca carga, apertura en extremo remoto

Esta simulación es análoga a la de la sección 6.4.1.5. La diferencia es que en este caso la línea sale de servicio cuando se abre su extremo remoto, lo cual es indicado por la función Local/Remoto en la figura B.12.

Apéndice B. Desarrollo del algoritmo en MATLAB

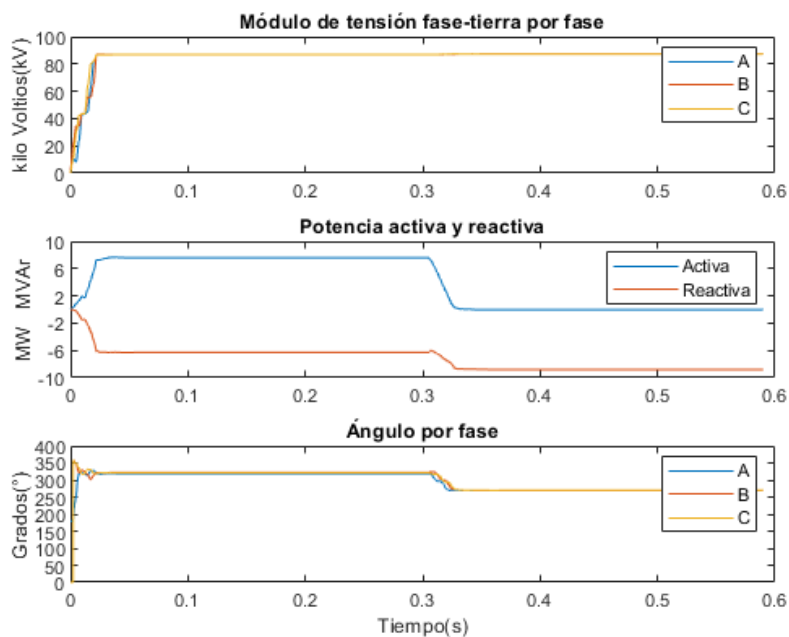


Figura B.11: Tensión, potencia, ángulo

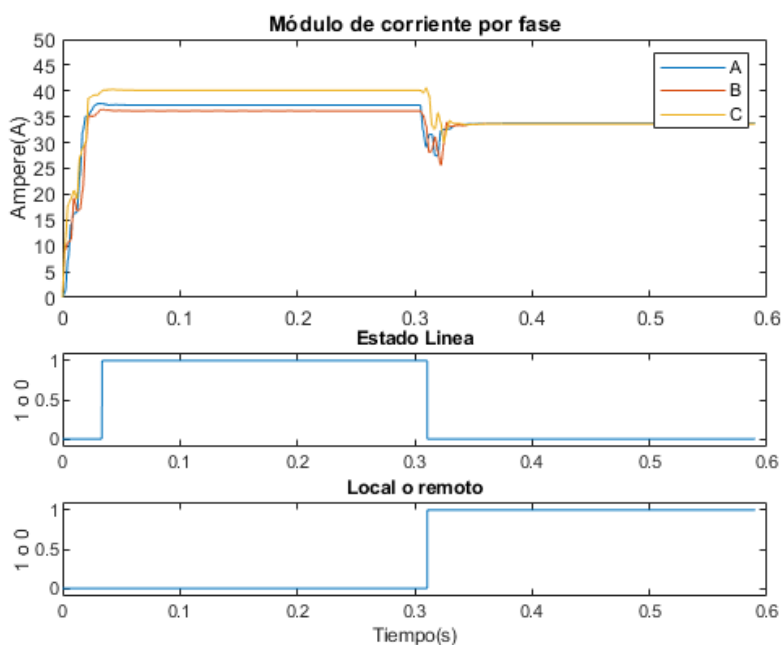


Figura B.12: Corriente, estados

Referencias

- [1] Curso redes eléctricas. Capítulo 3, la línea larga como cuadripolo pasivo, 2018.
- [2] J. R. Marti. Accurate modelling of frequency-dependent transmission lines in electromagnetic transient simulations. *IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems*, PAS-101(1):147–157, 1982.
- [3] Robinson Quilumba Collaguazo. Modelación de transitorios electromagnéticos en sistemas de transmisión por medio del modelo j. martí. Universidad Politécnica Salesiana sede Quito, 2017.
- [4] Curso máquinas eléctricas. Transformadores de medida, 2018.
- [5] IIE-FING-Udelar Conceptos Avanzados sobre Protecciones de Sistemas Eléctricos de Potencia. A-ii. protecciones numéricas, 2019.
- [6] Inc. Engineering Laboratories Schweitzer. *Data Sheet, SEL-451-5 Protection, Automation, and Bay Control System*.
- [7] Inc. Engineering Laboratories Schweitzer. *Folleto, Sistema de protección, automatización y control de bahía SEL-451*.
- [8] Ieee standard electrical power system device function numbers, acronyms, and contact designations. *IEEE Std C37.2-2008 (Revision of IEEE Std C37.2-1996)*, pages 1–48, 2008.
- [9] John P. Bickford and P. S. Doepel. Calculation of switching transients with particular reference to line energisation. 1967.
- [10] Krishnanjan Gubba Ravikumar and Anurag K. Srivastava. Zero-setting algorithm for high-speed open line detection using synchrophasors. In *2018 IEEE/PES Transmission and Distribution Conference and Exposition (T D)*, pages 1–9, 2018.
- [11] I. Kamwa, R. Grondin, Innocent Kamwa, Michel Rousseau, Claude Lafond, Jean Béland, Dac Bui, Brian Kirby, and John Attas. Topology detection based on open line detection relays, a strategic function in power system protection. 08 2004.

Referencias

- [12] European EMTP-ATP User Group. About atp. <https://www.emtp.org/index.php/about-eeug/about-atp>. Last accessed 01 November 2021.
- [13] European EMTP-ATP User Group. About atpdraw. <https://www.emtp.org/index.php/about-eeug/about-atp-draw>. Last accessed 01 November 2021.
- [14] UTE. Modelado en emtp-rv de líneas aéreas 150kv y 500kv, 2018.

Índice de tablas

7.1. Tiempos de actuación del algoritmo en el relé	104
--	-----

Esta página ha sido intencionalmente dejada en blanco.

Índice de figuras

2.1. Línea de transmisión	4
2.2. Elemento infinitesimal de la línea	4
2.3. Modelo pi del cuadripolo	8
2.4. Modelo CP de una línea sin pérdidas	9
2.5. Distintos equipos actuales	12
2.6. Diagrama de bloques genérico	13
3.1. Tensión de la línea en su extremo remoto energizada con fuente ideal	18
3.2. Tensión de la línea en su extremo remoto energizada con fuente inductiva	19
3.3. Tensión de la línea sin carga atrapada en su extremo remoto y local energizada con fuente ideal e inductiva	20
4.1. Red simplificada entre dos barras	24
4.2. Configuración de la línea en la subestación	27
4.3. Diagrama de bloques funcional	29
5.1. Mapa eléctrico de Uruguay	34
5.2. Datos de línea	35
5.3. Medidas de torre	35
5.4. Tramos de línea LIB-COL	36
5.5. Circuito general utilizado	37
5.6. Simulación de Energización con Línea Abierta en extremo remoto .	38
5.7. Módulo de corriente y tensión	39
5.8. Potencia activa, reactiva y ángulo	39
5.9. Módulo de corriente y tensión	42
5.10. Potencia activa, reactiva y ángulo	42
5.11. Circuito de Simulación Desenergización-Energización	43
5.12. Módulo de corriente y tensión	44
5.13. Potencia activa, reactiva y ángulo	44
5.14. Módulo de corriente y tensión	46
5.15. Potencia activa, reactiva y ángulo	46
5.16. Potencia activa vista por el relé cuando ocurre la energización de la línea (con carga nominal) en su extremo local	48
5.17. Potencia reactiva vista por el relé cuando ocurre la energización de la línea (con carga nominal) en su extremo local	48

Índice de figuras

5.18. Potencia activa vista por el relé cuando ocurre la energización de la línea (con poca carga) en su extremo local 1	50
5.19. Potencia reactiva vista por el relé cuando ocurre la energización de la línea (con poca carga) en su extremo local 2	50
5.20. Módulo de corriente y tensión	52
5.21. Potencia activa, reactiva y ángulo	52
5.22. Circuito de Simulación de Falta Trifásica	53
5.23. Módulo de corriente y tensión	54
5.24. Potencia activa, reactiva y ángulo	54
5.25. Módulo de corriente y tensión	56
5.26. Potencia activa, reactiva y ángulo	56
5.27. Circuito de Simulación Inversión de Potencia	57
5.28. Módulo de corriente y tensión	58
5.29. Potencia activa, reactiva y ángulo	58
6.1. Concepto función ángulo	63
6.2. Tensión, potencia, ángulo	69
6.3. Corriente, estados	69
6.4. Tensión, potencia, ángulo	71
6.5. Corriente, estados	71
6.6. Tensión, potencia, ángulo	73
6.7. Corriente, estados	73
6.8. Tensión, potencia, ángulo	75
6.9. Corriente, estados	75
6.10. Tensión, potencia, ángulo	77
6.11. Corriente, estados	77
6.12. Tensión, potencia, ángulo	79
6.13. Corriente, estados	79
6.14. Tensión, potencia, ángulo	81
6.15. Corriente, estados	81
6.16. Tensión, potencia, ángulo	83
6.17. Corriente, estados	83
6.18. Tensión, potencia, ángulo	85
6.19. Corriente, estados	85
6.20. Tensión, potencia, ángulo	87
6.21. Corriente, estados	87
6.22. Detalle de corriente	88
7.1. Relé SEL-451	90
7.2. Equipo de prueba de relés	90
7.3. Función potencia SELogic	93
7.4. Función corriente SELogic	93
7.5. Función ángulo SELogic	94
7.6. Función salida SELogic	95
7.7. Función retardo SELogic	95
7.8. Función retardo SELogic	95

7.9. Falta monofásica 1	96
7.10. Falta monofásica 2	97
7.11. Falta en línea RME-ROS, extremo COL	98
7.12. Falta en línea RME-ROS, extremo LIB	99
7.13. Falta monofásica en línea YOU-PAY	100
7.14. Inversión de potencia	101
7.15. Energización con carga nominal cierre en extremo local	102
7.16. Energización con carga nominal cierre en extremo remoto	102
7.17. Desenergización con carga nominal apertura en extremo local	103
7.18. Desenergización con carga nominal apertura en extremo remoto	103
A.1. Módulo de corriente y tensión	108
A.2. Potencia activa, reactiva y ángulo	108
A.3. Módulo de corriente y tensión	110
A.4. Potencia activa, reactiva y ángulo	110
A.5. Módulo de corriente y tensión	112
A.6. Potencia activa, reactiva y ángulo	112
A.7. Módulo de corriente y tensión	114
A.8. Potencia activa, reactiva y ángulo	114
B.1. Tensión, potencia, ángulo	116
B.2. Corriente, estados	116
B.3. Tensión, potencia, ángulo	118
B.4. Corriente, estados	118
B.5. Tensión, potencia, ángulo	120
B.6. Corriente, estados	120
B.7. Tensión, potencia, ángulo	122
B.8. Corriente, estados	122
B.9. Tensión, potencia, ángulo	124
B.10. Corriente, estados	124
B.11. Tensión, potencia, ángulo	126
B.12. Corriente, estados	126

Esta es la última página.
Compilado el miércoles 3 agosto, 2022.
<http://iie.fing.edu.uy/>