



UNIVERSIDAD TÉCNICA DE COTOPAXI

DIRECCIÓN DE POSGRADO

MAESTRÍA EN ELECTRICIDAD

MODALIDAD: INFORME DE INVESTIGACIÓN

Título:

Análisis de protecciones eléctricas de microgrids modo isla con elevada penetración de energías renovables no convencionales.

Trabajo de titulación previo a la obtención del título de magister en Electricidad
mención sistemas eléctricos de potencia

Autor:

Ing. Ortiz Santiana Kevin Alexander

Tutor:

Ing. Pazuña Naranjo William Paul MsC.

LATACUNGA –ECUADOR

2023

AVAL DEL TUTOR

En mi calidad de Tutor del Trabajo de Titulación “Análisis de protecciones eléctricas de microgrids modo isla con elevada penetración de energías renovables no convencionales” presentado por Ortiz Santiana Kevin Alexander, para optar por el título magíster en Electricidad mención sistemas eléctricos de potencia

CERTIFICO

Que dicho trabajo de investigación ha sido revisado en todas sus partes y se considera que reúne los requisitos y méritos suficientes para ser sometido a la presentación para la valoración por parte del Tribunal de Lectores que se designe y su exposición y defensa pública.

Latacunga, enero, 09, 2023



.....
MsC. William Paul Pazuña Naranjo
CC.: 0503338592

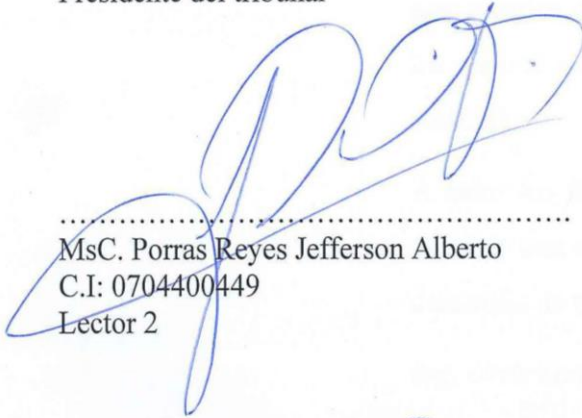
AVAL DEL TRIBUNAL

El trabajo de Titulación: Análisis de protecciones eléctricas de microgrids modo isla con elevada penetración de energías renovables no convencionales, ha sido revisado, aprobado y autorizado su impresión y empastado, previo a la obtención del título de Magíster en Electricidad mención sistemas eléctricos de potencia; el presente trabajo reúne los requisitos de fondo y forma para que el estudiante pueda presentarse a la exposición y defensa.

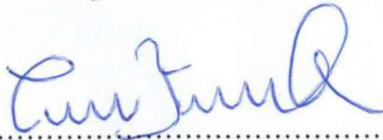
Latacunga, febrero, 17, 2023



.....
MsC. León Segovia Marco Anibal
C.I: 0502305402
Presidente del tribunal



.....
MsC. Porras Reyes Jefferson Alberto
C.I: 0704400449
Lector 2



.....
MsC. Quinatoa Caiza Carlos Iván
C.I: 0503287864
Lector 3

DEDICATORIA

En primer lugar, dedico este trabajo a mi esposa Ángela, por ser la esposa incondicional, por estar siempre a mi lado y nunca dejarme desfallecer en los duros momentos presentados en la vida.

Dedicar este trabajo a mis amados padres, Sonia y Marco, por siempre estar al pendiente de mi vida, de mis logros, decisiones y sin ninguna oposición brindarme apoyo en cualquier circunstancia.

A mis hermanos Israel, Alan y Antonio, quienes son parte fundamental en mi vida, aunque no los veo muy seguido, siempre están en mi mente y corazón, sigan adelante y no descansen hasta cumplir sus sueños.

A la familia de mi esposa, los papos, por siempre estar preocupados del desarrollo diario de nuestra vida, a los peques, que luchen por sus sueños hasta verlos realizados.

A todos los familiares, amigos y conocidos que de alguna y otra circunstancia han estado presentes en el desarrollo de esta nueva oportunidad de superación.

Ing. Ortiz Santiana Kevin Alexander

AGRADECIMIENTO

En primer lugar, agradezco a Dios y a la Santísima Virgen por brindarme salud y a unas personas tan maravillosas que rodean mi vida para poder seguir el curso de la misma con mucha felicidad, por siempre escuchar de mis plegarias y oraciones.

Agradezco a mi esposa Ángela por ser el ente incondicional, por el apoyo brindado en esta etapa de mi vida.

A mis padres Sonia y Marco, a mis hermanos Israel, Alan y Antonio, por siempre estar al pendiente de mi desarrollo en los estudios, por el apoyo brindado en el transcurso de esta etapa de mi vida.

A la familia de mi esposa por estar al pendiente del desarrollo y avance del programa de la maestría.

En general, a todas las personas que me brindaron apoyo, apertura y facilidades para que esta meta se convierta en realidad.

Ing. Ortiz Santiana Kevin Alexander

RESPONSABILIDAD DE AUTORÍA

Quien suscribe, declara que asume la autoría de los contenidos y los resultados obtenidos en el presente trabajo de titulación.

Latacunga, enero, 09, 2023



Ing. Kevin Alexander Ortiz Santiana
1723815849

RENUNCIA DE DERECHOS

Quien suscribe, cede los derechos de autoría intelectual total y/o parcial del presente trabajo de titulación a la Universidad Técnica de Cotopaxi.

Latacunga, enero, 09, 2023




.....
Kevin Alexander Ortiz Santiana
1723815849

AVAL DEL PRESIDENTE DEL TRIBUNAL

Quien suscribe, declara que el presente Trabajo de Titulación: Análisis de protecciones eléctricas de microgrids modo isla con elevada penetración de energías renovables no convencionales, contiene las correcciones a las observaciones realizadas por los lectores en sesión científica del tribunal.

Latacunga, febrero, 17, 2023



.....
MsC. León Segovia Marco Anibal
C.I: 0502305402

UNIVERSIDAD TÉCNICA DE COTOPAXI
DIRECCIÓN DE POSGRADO
MAESTRÍA EN ELECTRICIDAD
MENCIÓN SISTEMAS ELÉCTRICOS DE POTENCIA

Título: ANÁLISIS DE PROTECCIONES ELÉCTRICAS DE MICROGRIDS MODO ISLA CON ELEVADA PENETRACIÓN DE ENERGÍAS RENOVABLES NO CONVENCIONALES

Autor: Ortiz Santiana Kevin Alexander

Tutor: Pazuña Naranjo William Paul. Msc

RESUMEN

La integración de la generación distribuida en microrredes ofrece una alternativa renovable a la generación convencional con una calidad de energía mejorada y pérdidas de energía reducidas. Sin embargo, las microrredes también plantean nuevos retos tecnológicos como la coordinación de medidas de protección eléctrica ante corrientes de cortocircuito y fluctuaciones en el flujo de energía bidireccional. Esta investigación mide las condiciones de operación de la carga y generación para determinar los mejores ajustes y protección contra sobre corriente para microrredes. Se desarrollaron simulaciones para cuatro casos diferentes: barra del generador sincrónico, barra de generación eólica y barra del generador solar 1 y 2, se provocó fallas trifásicas separadas en cada barra a la que estaba conectado cada generador, obteniendo así la curva de funcionamiento de cada relé y el proceso de desconexión de dicha barra, además de la simulación dinámica donde se establece los escenarios de operación de falla anteriormente mencionados con la finalidad de observar la variación de la frecuencia en las barras de la microrred.

PALABRAS CLAVE: Generación distribuida, microrred, modo isla, protección eléctrica.

UNIVERSIDAD TECNICA DE COTOPAXI
DIRECCION DE POSGRADO
MAESTRÍA EN ELECTRICIDAD
MENCIÓN SISTEMAS ELÉCTRICOS DE POTENCIA

Title: Analysis of Electrical Protections of Island Mode Microgrids with High Penetration of Non-Conventional Renewable Energies.

Author: Ortiz Santiana Kevin Alexander

Tutor: Pazuña Naranjo William Paul. Msc

ABSTRACT

The integration of distributed generation in microgrids offers a renewable alternative to conventional generation with improved power quality and reduced energy losses. However, microgrids also pose new technological challenges such as the coordination of electrical protection measures against short-circuit currents and fluctuations in the bidirectional energy flow. This research measures load and generation operating conditions to determine the best settings and overcurrent protection for microgrids. Simulations were developed for four different cases: synchronous generator bus, wind generation bus and solar generator bus 1 and 2, separate three-phase faults were caused in each bus to which each generator was connected, thus obtaining the operating curve of each relay and the process of disconnecting said bar.

KEYWORD: Distributed generation, microgrid, island mode, protection.

Rosales Pijal Verónica Alexandra con cédula de identidad número: 1003106984 magister en lingüística y didáctica de la enseñanza de idiomas extranjeros con número de registro de la SENESCYT: 1005-15-86071967; **CERTIFICO** haber revisado y aprobado la traducción al idioma inglés del resumen del trabajo de investigación con el título: “análisis de protecciones eléctricas de microgrids modo isla con elevada penetración de energías renovables no convencionales” de: Ortiz Santiana Kevin Alexander, aspirante a magister en electricidad mención sistemas eléctricos de potencia.

Latacunga, enero, 09, 2023



.....
MsC. ROSALES PIJAL VERONICA ALEXANDRA
1003106984

ÍNDICE DE CONTENIDOS

AVAL DEL TUTOR.....	ii
AVAL DEL TRIBUNAL.....	iii
DEDICATORIA	iv
AGRADECIMIENTO	v
RESPONSABILIDAD DE AUTORÍA	vi
RENUNCIA DE DERECHOS.....	vii
AVAL DEL PRESIDENTE DEL TRIBUNAL.....	viii
RESUMEN.....	ix
ABSTRACT.....	x
ÍNDICE DE CONTENIDOS	xi
ÍNDICE DE TABLAS	xv
ÍNDICE DE FIGURAS.....	xvi
INTRODUCCIÓN	1
Antecedentes	1
Planteamiento del problema.....	1
Formulación del problema.	2
Objetivo General	2
Objetivos Específicos:.....	2
Justificación.....	4
Hipótesis.....	5
CAPÍTULO I.....	6
FUNDAMENTACIÓN TEÓRICA- METODOLÓGICA.....	6
Antecedentes de la investigación o fundamentación del estado del arte	6

1.1.	Fundamentación Teórica	6
1.1.1	Concepto de microgrid	6
1.1.2	Anomalías en la microgrid	7
1.1.3	Fallas en generadores eólicos	8
1.1.4	Fallas en plantas fotovoltaicas	9
1.1.5	La protección primaria	9
1.1.6	Protecciones de respaldo	9
1.1.7	Cortocircuito	11
1.1.8	Falla asimétrica	11
1.1.9	Falla simétrica	12
1.1.10	Sobrecarga.....	12
1.1.11	Retorno de corriente	12
1.1.12	Subtensión	12
1.1.13	Sobretensión.....	12
1.1.14	Esquema básico de un relé de protección	12
1.1.15	Transformador de potencia (TP)	13
1.1.16	Precisión de los transformadores de potencia	13
1.1.17	Transformadores de corriente (TC).....	14
1.1.18	Características de los TCs	14
1.1.19	Burden	15
1.1.20	Regulación No ARCERNNR – 002/20.....	15
1.1.21	Cargabilidad de una microrred.....	15
1.1.22	Power Factory DigSilent.....	16
1.1.23	Componentes principales de una microrred.....	17
1.1.23.1	Máquina Sincrónica	17

1.1.23.2	Generador eólico.....	18
1.1.23.3	Planta fotovoltaica	18
1.1.23.4	Transformador	18
1.1.23.5	Línea de transmisión.....	19
1.1.23.6	Cargas	19
1.1.24	Módulos de estudio de Power Factory	19
1.1.24.1	Estudio de flujo de carga	20
1.1.24.2	Estudio de cortocircuitos	20
1.1.24.3	Módulo de simulación dinámica.....	20
1.2.	Fundamentación metodológica.....	21
1.3.	Conclusiones Capítulo I	21
CAPÍTULO II		22
PROPUESTA.....		22
2.1.	Título del proyecto.	22
2.2.	Objetivo del proyecto.	22
2.3.	Descripción de la propuesta.....	22
2.4.	Metodología o procedimientos empleados para el cumplimiento de los objetivos planteados	23
2.4.1.	Estudio de flujo de carga.....	27
2.4.2.	Estudio de cortocircuitos.....	28
2.4.3.	1er escenario de operación	29
2.4.4.	2do escenario de operación	29
2.4.5.	3er escenario de operación.....	30
2.4.6.	4to escenario de operación.....	30
2.4.7.	Coordinación de protecciones de sobrecorriente de fase frente a fallas monofásicas.....	31

2.4.8. Simulación dinámica.....	38
2.5. Conclusiones Capítulo II.....	38
CAPÍTULO III.....	40
APLICACIÓN Y/O VALIDACIÓN DE LA PROPUESTA.....	40
3.1. Análisis de los resultados	40
3.1.1. Resultado del estudio de flujo de carga.....	40
3.1.2. Resultado del 1er escenario.....	41
3.1.3. Resultado del 2do escenario.....	42
3.1.4. Resultado del 3er escenario.....	44
3.1.5. Resultado del 4to escenario.....	45
3.1.6. Resultado de la coordinación de protecciones monofásicas	46
3.1.7. Resultado de la simulación dinámica.....	48
3.2. Conclusiones Capítulo III.....	49
3.3. Conclusiones generales	49
3.4. Recomendaciones	50
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	51
ANEXOS	55

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1 Sistemas de tareas en relación a los objetivos específicos:.....	3
Tabla 2 Escenarios de operación definidos para el caso de estudio.....	28
Tabla 3 Voltajes en p.u. de cada barra de la microrred.....	40
Tabla 4 Cargabilidad de los elementos de la microrred.....	41
Tabla 5 Magnitudes de cortocircuito 1er escenario.....	42
Tabla 6 Magnitudes de cortocircuito 2do escenario.....	43
Tabla 7 Magnitudes de cortocircuito 3er escenario.....	44
Tabla 8 Magnitudes de cortocircuito 4to escenario.....	45
Tabla 9 Resumen de resultados de escenarios.....	46

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1 Diagrama representativo de microgrid	7
Figura 2 Aerogenerador de 4,5 MW	8
Figura 3 Falla monofásica a tierra.....	11
Figura 4 Transformador de potencial.....	13
Figura 5 Transformador de corriente	15
Figura 6 Ícono DigSilent.....	16
Figura 7 Componentes de la microrred.....	17
Figura 8 Ícono máquina sincrónica.....	17
Figura 9 Ícono generador eólico	18
Figura 10 Ícono planta fotovoltaica	18
Figura 11 Ícono transformador	18
Figura 12 Ícono línea de transmisión.....	19
Figura 13 Ícono cargas.....	19
Figura 14 Ubicación de módulos de estudio.....	19
Figura 15 Módulo de flujo de carga.....	20
Figura 16 Módulo de cálculo de cortocircuitos.	20
Figura 17 Módulo de simulación dinámica.	20
Figura 18 Cuadro de eventos de simulación.	21
Figura 19 Topología del caso de estudio propuesto [9]......	24
Figura 20 Características de generador sincrónico	24
Figura 21 Características de generador eólico	24
Figura 22 Características de generador fotovoltaico 1.....	25
Figura 23 Características de generador fotovoltaico 2.....	25

Figura 24	Características de línea_1_2.	25
Figura 25	Características de línea_2_3.	26
Figura 26	Características de línea_3_4.	26
Figura 27	Características de línea_4_5.	26
Figura 28	Características de línea_5_1.	26
Figura 29	Características de línea_4_6.	27
Figura 30	Características de línea_6_7.	27
Figura 31	Flujo de potencia en la microrred	28
Figura 32	Ubicación de la falla trifásica y relé de desconexión	29
Figura 33	Ubicación de la falla trifásica y relés de desconexión	29
Figura 34	Ubicación de la falla trifásica y relé de desconexión	30
Figura 35	Ubicación de la falla trifásica y relé de desconexión	30
Figura 36	Falla monofásica en la barra 7	31
Figura 37	Falla monofásica en la línea 6-7	31
Figura 38	Falla monofásica en la barra 6	32
Figura 39	Falla monofásica en la línea 4-6	32
Figura 40	Falla monofásica en la barra 4.	33
Figura 41	Falla monofásica en la línea 3-4	33
Figura 42	Falla monofásica en la barra 3	34
Figura 43	Falla monofásica en la línea 2-3	34
Figura 44	Falla monofásica en la línea 4-5	35
Figura 45	Falla monofásica en la barra 5	35
Figura 46	Falla monofásica en la línea 5-1	36
Figura 47	Falla monofásica en la barra 1	36
Figura 48	Falla monofásica en la línea 1-2	37

Figura 49 Falla monofásica en la barra 2.....	37
Figura 50 Eventos de simulación dinámica	38
Figura 51 Curva de protección del primer escenario	42
Figura 52 Curva de protección del segundo escenario	43
Figura 53 Curva de protección del tercer escenario.....	44
Figura 54 Curva de protección del cuarto escenario.....	45
Figura 55 Curvas de protección de la falla en la barra 7.....	47
Figura 56 Curvas de protección de la falla en la línea 1-2.....	47
Figura 57 Curvas de protección de la falla en la línea 2-3.....	48
Figura 58 Frecuencia en barras de la microrred.....	48

INTRODUCCIÓN

Antecedentes

La línea de investigación que abarca el presente proyecto es energías alternativas y renovables, eficiencia energética y proyección ambiental; así también las sublíneas que respaldan la investigación son energética en sistemas electromecánico y uso de fuentes renovables de energía, automatización, control y protecciones de sistemas electromecánicos.

En este caso podemos observar la relación que existe entre el tema propuesto y las líneas y sublíneas de investigación es directa, pues el tema destaca el aprovechamiento de energías alternativas renovables para la generación de energía eléctrica para ser utilizada en un SEP que trabaja desconectado de la red eléctrica, además del planteamiento del análisis de las protecciones eléctricas de este sistema.

Planteamiento del problema

Con el pasar del tiempo el consumo de energía eléctrica ha incrementado a nivel global debido al igual incremento poblacional y su necesidad de mejorar el estilo de vida; el ser humano ha identificado que el uso de combustibles fósiles provoca un gran impacto contaminante al medio ambiente, relacionando este factor con la producción eléctrica se ha optado por distintos tipos de generación de energía eléctrica los cuales no presentan esta característica de contaminación al medio ambiente, o por lo menos no directamente, es así que actualmente en el Ecuador predomina la generación hidroeléctrica, aprovechando el recurso hídrico del país; en años previos también se utilizaba la generación térmica en la cual se involucraba el uso de combustibles fósiles. Cabe destacar que en los últimos años la tecnología ha avanzado a pasos agigantados, y en la rama eléctrica no es la excepción, ya que en la actualidad existe varias fuentes de producción de energía eléctrica a partir de energías naturales no convencionales como lo es la energía eólica y la energía solar. Por otro lado, este aumento durante el uso de energía conlleva a no abastecer la demanda máxima con generación renovable, en consecuencia, se utilizan centrales térmicas que contribuyen a la contaminación y agotamiento de combustibles fósiles. Existe varias comunidades apartadas de la civilización las cuales pretenden mejorar

su estilo de vida utilizando aparatos eléctricos o electrónicos, penosamente la red eléctrica no llega a estos lugares remotos, es así que este tipo de generación con fuentes renovables no convencionales permite generar energía eléctrica en dichos lugares, es decir no es necesario que este pequeño sector podrá tener energía eléctrica sin estar conectado a la red eléctrica.

Formulación del problema.

Debido al desconocimiento de requerimientos para el ajuste de protecciones de sobrecorriente cuando se utiliza generación distribuida con fuentes de generación no renovables.

Objetivo General

El objetivo general de esta tesis es analizar las protecciones de sobrecorriente de microgrids modo isla con elevada penetración de energías renovables no convencionales aplicando herramientas computacionales para la apropiada condición operativa de acuerdo al caso de estudio planteado.

Objetivos Específicos:

- Revisar antecedentes de estudios relacionados al tema establecido.
- Plantear un caso de estudio práctico en el cual se pueda efectuar análisis de flujo de potencia y de cortocircuito.
- Simular el caso de estudio propuesto en el software DigSilent.
- Determinar el comportamiento de la microrred en estado estable y obtener las curvas de operación de los relés de sobre corriente frente a fallas trifásicas.
- Realizar la coordinación de protecciones de sobre corriente de fase de la microrred frente a fallas monofásicas.
- Obtener la curva de frecuencia en las barras.

Tabla 1 Sistemas de tareas en relación a los objetivos específicos:

Objetivos específicos	Actividad	Resultado de la actividad	Descripción de la actividad
Revisar antecedentes de estudios relacionados al tema establecido.	Investigación bibliográfica de tesis, papers o documentos que tengan relación con el tema planteado.	Problemas referentes a protecciones eléctricas en microgrids.	Búsqueda de documentos que tengan información referente al tema planteado.
Plantear un caso de estudio práctico en el cual se pueda efectuar análisis de flujo de potencia y de cortocircuito.	Revisión bibliográfica de casos relacionados al tema planteado.	Obtención de caso de estudio.	Indagación de un caso de estudio el cual presente características referentes al tema.
Simular el caso de estudio propuesto en el software DigSilent.	Identificación de los componentes que conforman la microrred.	Convergencia de la simulación.	Insertar los respectivos componentes de la microrred en el software de simulación con las respectivas características.
Determinar el comportamiento de la microrred en estado estable y obtener las curvas de operación de los relés de sobrecorriente frente a fallas trifásicas.	Obtención del comportamiento de la microrred y de las gráficas de operación de los relés frente a fallas.	Comportamiento de la microrred y curvas de operación.	Mediante el módulo de flujo de potencia y de fallas se provoca la falla en barras y se obtiene la curva de operación de relés.
Realizar la coordinación de protecciones de sobrecorriente de fase de la microrred frente a fallas monofásicas.	Determinación de la coordinación de protecciones de sobrecorrientes de fase en la microrred.	Correcta protección de la microrred frente a fallas monofásicas.	Provocar fallas en la microrred, validar la magnitud de las fallas y coordinar la protección de sobrecorriente de fases.

Elaborado por: Investigador

Continúa

Objetivos específicos	Actividad	Resultado de la actividad	Descripción de la actividad
Obtener la curva de frecuencia en las barras	Determinación de la gráfica de variación de frecuencia frente a fallas.	Gráfica de frecuencia en barras de la microrred	Mediante el módulo de simulación dinámica se plantea los eventos a simularse.

Elaborado por: Investigador

Justificación

La formulación está basada en la necesidad de proteger la microrred frente a fallas significativas, como es el caso de las fallas trifásicas, además de censar la afectación que estas perturbaciones tienen en la confiabilidad del servicio y la propia seguridad de la microrred; esto permitirá a futuros investigadores considerar un sistema de protección que no esté basado en el uso distintivo de dispositivos de sobrecorriente, ya que esto puede aumentar el riesgo en el funcionamiento de la microrred, pues éstos dispositivos no responden correctamente frente a fallas, las cuales son caracterizadas por corrientes limitadas de cortocircuito, que ocurren dependiendo de las circunstancias de funcionamiento; el análisis de protección establecida en de la microrred es en dos zonas diferenciadas por el tipo de energía que maneja, la zona de distribución de corriente alterna y la zona de corriente continua de la planta eólica y las plantas fotovoltaicas, permite la detección correcta de fallas en la microrred; uno de los mayores riesgos en las operaciones de microrredes puede surgir por la presencia de errores de operación en unidades de generación distribuida, estas fallas no son detectados por los dispositivos de protección contra cortocircuito.

Hipótesis

Si se realiza el adecuado ajuste de protecciones de sobrecorriente en la microrred modo isla con elevada penetración de energías renovables, se podrá garantizar el suministro de energía eléctrica.

CAPÍTULO I

FUNDAMENTACIÓN TEÓRICA- METODOLÓGICA

Antecedentes de la investigación o fundamentación del estado del arte

Una de las particularidades más relevantes de las microrredes es que pueden contener una vasta diversidad de generación y cargas. Varios proyectos guías están analizando la potencial incorporación de las microrredes en la red eléctrica de cada uno de los países, al mismo tiempo de buscar descentralizar las fuentes de generación, esto hace un sistema con un reducido nivel de vulnerabilidad e interrupciones de funcionamiento. En [12] afirma que en la actualidad U.S.A. aproximadamente posee una capacidad instalada de 1,1 GW y posee una proyección de 4,7 GW de capacidad instalada, mientras que [18] referencia al uso aplicativo de la microrred en modo isla en el país de Japón en el año 2011 cuando la región de Tohoku sufrió un terremoto y posteriormente un tsunami, la microrred trabajó durante 2 días desconectado de la red, mientras que los sectores aledaños se quedaron sin servicio eléctrico. Los proyectos referenciados expresan microrredes funcionales y activas que aplican conceptos que podrán ser utilizados en futuras redes.

1.1. Fundamentación Teórica.

1.1.1 Concepto de microgrid

El concepto de microgrid se orienta como un nuevo paradigma para los Sistemas Eléctricos de Potencia, como una forma de promover la integración de unidades de Generación Distribuida, principalmente para la generación de energía eléctrica de fuentes de energía renovables cerca del centro de consumo.[1]

La Figura 1 muestra un diagrama distintivo de una microgrid que presenta el punto de conexión al sistema eléctrico, la red de distribución en Corriente Alterna, unidades de generación en Corriente Directa con sus respectivos inversores, unidades de generación rotativas, dispositivos de protección y cargas. [2]

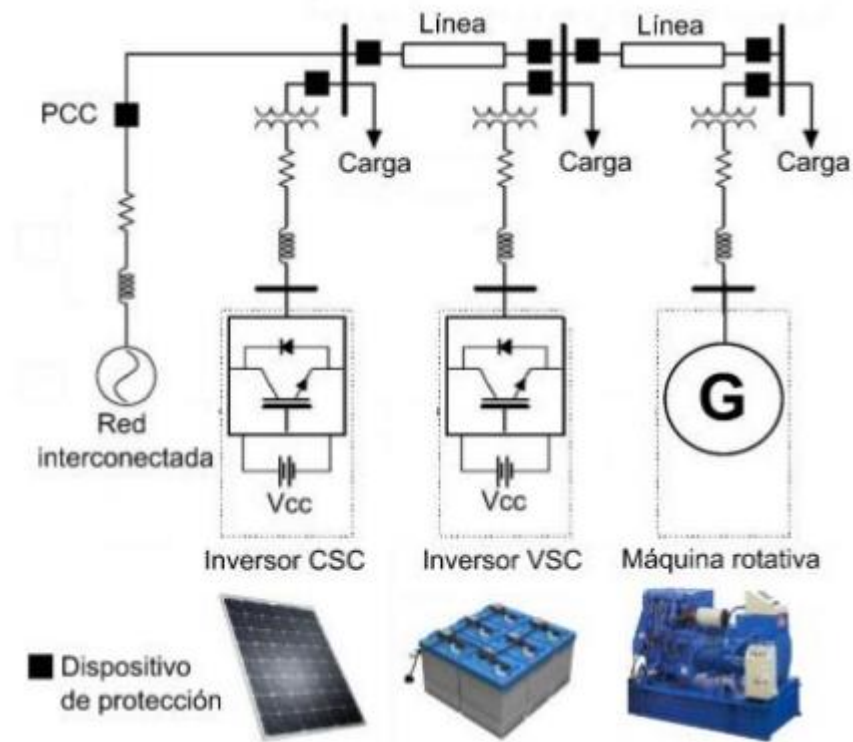


Figura 1 Diagrama representativo de microgrid

El término microgrid incluye diferentes tipos dependiendo del modo de operación y esquema, niveles de voltaje, entre otras características. En el desarrollo de esta investigación se pretende realizar el análisis de una microgrid aislada permanentemente, es decir una población remota, ciudad o isla alejada de la red eléctrica.[3]

Similar que los Sistemas Eléctricos de Potencia, las microgrids se comportan dinámicamente a lo largo del tiempo debido al cambio constante de su operación, cuando ocurre tal cambio las opciones de control definidas previamente pueden ser defectuosas y deben redefinirse.

Lo mismo se aplica al sistema de protección, sus parámetros deben actualizarse, después de efectuarse cambios en la microgrid.[4]

1.1.2 Anomalías en la microgrid

A partir del análisis de posibles anomalías en la microrred, se establece el diseño de un sistema de protección, que se utilizará para detallar el listado de requisitos. Las anomalías pueden variar en magnitud y patrón. Esta sección examina los tipos

y características para los cuales es factible y necesaria la implementación de un sistema de protección.[2]

Una anomalía se define como una condición indeseable que, cuando se aplica a un Sistema Eléctrico de Potencia, tiende a afectar negativamente el valor de una variable controlada.[5]

En esta investigación se reportarán perturbaciones como: desequilibrios, sobrecargas, contactos a tierra, sobrevoltajes y subvoltajes moderados.[6]

Se instalan dispositivos de protección para hacer frente a las diferentes anomalías que pueden efectuarse en los componentes de la microgrid.[7]

1.1.3 Fallas en generadores eólicos

Los aerogeneradores son una fuente de energía renovable procedente del viento. Estos incluyen los siguientes componentes: la caja de cambios y el cojinete; el generador, el inversor, así como también el rotor, el impulsor y el sistema hidráulico. Dado que el aerogenerador es una máquina rotativa, los principales defectos del estaban en la caja de cambios y el cojinete. Sin embargo, es posible que varios de los otros componentes puedan fallar.[8]



Figura 2 Aerogenerador de 4,5 MW

1.1.4 Fallas en plantas fotovoltaicas

El módulo fotovoltaico es una fuente de energía renovable a partir de la radiación solar. Algunos modos de falla se pueden ocultar de los instrumentos protectores comunes, que generalmente protegen según la corriente. Como resultado, los dispositivos de protección contra sobrecorriente eventualmente no funcionarán correctamente despejando la falla.

Sin la protección adecuada, las fallas potenciales en el sistema fotovoltaico causarían daños graves.[8]

1.1.5 La protección primaria

La protección primaria es que en primer lugar nos encargamos de eliminar el mal funcionamiento y determinar el número mínimo de elementos necesarios para localizar el mal funcionamiento y desactivarlo.

En esta clase de protección se trata en que se divide las zonas de protección las cuales se encuentran definidas alrededor de cada elemento importante, como se describe en la figura en este caso se da un eficiente abastecimiento a toda la zona en caso que exista dos zonas se cuenta con un traslape que cubra estos límites y configurando de mejor manera el abastecimiento de los elementos correspondientes [25].

En el caso de que se produzca una falla dentro de una zona, las protecciones primarias deben buscar soluciones que estén relacionadas con las mismas, con esto estaríamos usando las herramientas para tratar de solventar la falla, pero solo usaríamos las herramientas destinadas para esa falla, solo en el caso en el que se produzca una falla en una zona traslapada, en las cuales las protecciones primarias se debe desconectar un área para poder tratar la falla de una mejor manera.

1.1.6 Protecciones de respaldo

Las protecciones de respaldo son aquellas que tienen la responsabilidad de eliminar la falla por segunda vez, es decir, solo debe funcionar si falla la protección primaria correspondiente. Por esta razón, es muy importante aislar entre sí las causas de las fallas de protección primaria y de respaldo, de modo que nada que pueda causar una falla de protección primaria también pueda causar una falla de protección de

respaldo. Esto generalmente se logra mediante el uso de varios componentes de la fuente de alimentación y circuitos, controles, etc. mediante alguna forma de protección [26].

Las defensas de respaldo deben operar con un retraso de tiempo en relación con las primarias para darles tiempo suficiente para actuar. Luego de realizada esta acción, se deben restablecer las protecciones de respaldo para evitar la apertura innecesaria del interruptor automático.

La protección de respaldo local se encuentra en la misma subestación que la protección primaria correspondiente. La duplicación de componentes, como transformadores de medida para la protección que los alimenta, es importante en algunos casos si se quiere aislar las causas de un tipo de fallo de protección de otro.

Si la protección de respaldo está instalada en una subestación adyacente a una contenida La protección primaria se denomina protección de copia de seguridad remota. las protecciones de las copias de seguridad remotas tienen la ventaja del aislamiento, como resultado de su propia filosofía.

La instalación, causas de fallo con protecciones primarias asociadas. Sin embargo, tienen la desventaja de que sus acciones a menudo resultan en una interrupción de una parte de la red que es más severa de lo necesario para aislar la falla. Finalmente, cabe señalar que una misma protección puede realizar funciones de protección primaria para un componente específico y, al mismo tiempo, realizar funciones de protección de respaldo para otros componentes. Asimismo, si las protecciones primarias para operaciones de reparación o mantenimiento están fuera de servicio, las protecciones de respaldo correspondientes se convierten en la principal protección frente a los fallos que se puedan producir.

A continuación, se habla de los tipos de perturbaciones en instalaciones de alta tensión en los cuales se menciona los más comunes que se encuentra en este campo y son:

- Defecto en aislamientos
- Descargas atmosféricas
- Acción de animales

- Caída de árboles u otros objetos sobre líneas
- Destrucción mecánica de máquinas rotativas
- Exceso de carga conectada a una línea
- Factores humanos
- Puestas a tierra intempestivas

1.1.7 Cortocircuito

Se produce esta falla cuando hay una conexión directa entre dos o más conductores de distinta fase, en si este se caracteriza por un aumento de corriente intensificado cuyo valor está limitado por la impedancia de cortocircuito y de las maquinas asociadas al mismo [27].

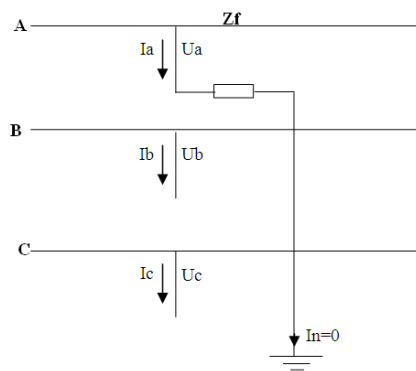


Figura 3 Falla monofásica a tierra

1.1.8 Falla asimétrica

Las tres fases del sistema están desequilibradas. Entre tales fallas son: fase-tierra, fase-fase, fase-fase-tierra, circuito abierto monofásico y circuito abierto bifásico [18]. Este tipo de error requiere la aplicación del teorema de las componentes simétricas para resolver el problema.

Los tres fasores de un sistema trifásico se pueden dividir en tres sistemas de fase balanceada; el conjunto equilibrado de componentes es: componente de secuencia positiva (+), componente de secuencia negativa (-) y componentes de secuencia cero (0) [19].

El origen de falla monofásica línea-tierra comúnmente se produce por la descarga a través de la atmósfera o a través del conductor que realizan contacto con

estructuras [20]. Esta falla es de las más comunes que suceden en un sistema eléctrico.

1.1.9 Falla simétrica

Este tipo de fallas corresponde a un cortocircuito trifásico balanceado, para realizar el cálculo de este tipo de fallas no es necesario conocer ni usar los fasores de secuencia negativa, positiva y cero [21].

1.1.10 Sobrecarga

Esta se conoce como una elevación de la intensidad de la corriente encima de las que se puede permitir en la misma instalación.

1.1.11 Retorno de corriente

En algunas circunstancias se ha podido evidenciar una inversión en el sentido cotidiano de la corriente.

1.1.12 Subtensión

Este es un acto que se produce y suele presentarse en los centrales generadores cuando la tensión en la misma es más baja a la que se encuentra normalmente, por lo que así exige una carga conectada a la red esta no puede disminuir su potencia, por lo que se trata de compensar su deficiencia con mayor consumo de corriente [28].

1.1.13 Sobretensión

Este es el caso contrario al fenómeno mencionado anteriormente, es decir se trata de que se eleva el valor de la tensión sobre los valores normales de explotación [28].

1.1.14 Esquema básico de un relé de protección

Es importante mencionar que para poder solventar esta clase de perturbaciones se hace la presencia necesaria de dispositivos de proyección los cuales deben ser capaces de separar uno de otro tipo de perturbación, a esto se le conoce como relés de protección [29].

En esta representación gráfica se puede ver y distinguir varias partes como las siguientes:

- Miembro de entrada: en este se trata de un transformador que realiza una doble función en el cual debe adaptar las señales de perturbación y a la vez sirven de separación galvánica de las partes de alta y baja tensión.
- Miembro de conversión: este se encarga de convertir las señales recolectadas para que las mismas puedan ser medidas.
- Miembro de medida: en este se recolectan medidas que se obtienen y realiza comparaciones con las demás medidas este es importante mencionar que es el ms importante del relé.
- Miembro de salida: este tiene la misión de amplificar las señales de débil potencia procedentes del órgano anterior para que se pueda realizar un buen funcionamiento.
- Miembro accionado: cuando esta bobina se acciona produce una desconexión del disyuntor correspondiente.
- Fuente auxiliar de tensión: se encarga de alimentar al relé de protección.

1.1.15 Transformador de potencia (TP)

El transformador de potencia para instrumentos: tiene dos arrollamientos primario y secundario, este está conectado directamente con el circuito de potencia ya sea entre dos fases o entre una fase y tierra.



Figura 4 Transformador de potencial

1.1.16 Precisión de los transformadores de potencia

Los transformadores de potencial no tienen valor práctico en la protección de relés si el voltio-amperio del transformador está dentro de la clasificación "térmica".

La capacidad térmica es igual a la capacidad de carga total del transformador de potencia y mayor que la capacidad utilizada para clasificar los transformadores de potencial como precisión para fines de medición [30].

La carga es la carga externa total en voltios-amperios en el secundario al voltaje secundario nominal. Si se conectan varias cargas en paralelo, las cargas individuales se suman matemáticamente para determinar la carga total.

Un transformador de potencial con una precisión nominal de voltaje aceptable es adecuado para este propósito.

Opera de cero a 110% de su voltaje nominal. El funcionamiento con una sobretensión superior al 10 % puede provocar errores y sobrecalentamiento.

1.1.17 Transformadores de corriente (TC)

Para la protección de (C.A) los relés dan cuenta de la corriente y tensión suministrada por los transformadores de corriente y potencia.

Estos TCs brindan aislamiento contra altas tensiones en el circuito de potencia y sirven para alimentar relés con valor proporcional en el circuito de potencia, pero también se reduce su valor para que los relés puedan ser más pequeños y menos costoso [30].

Los requisitos para la aplicación de transformadores de corriente son: falla mecánica, tipo de aislamiento (seco o líquido), relación en función de la corriente primaria y secundaria, régimen térmico continuo, cortocircuito térmico y mecánico, tipo de aislamiento, precisión y conexión.

1.1.18 Características de los TCs

El primario del transformador de corriente es el que se conecta directamente con el circuito, cabe recalcar que el transformador es un transformador reductor, así el lado secundario está normalizado en 5 A, en casos excepcionales donde la distancia entre el instrumento de medida y el transformador es considerable, se utilizan intensidades de 1 A.

Las corrientes estandarizadas para el lado primario son: 5, 10, 15, 25, 30, 75, 100, 150 A y 1,5; 2; 3; 4; 6; 10 kA [22].

La incidencia de la relación de transformación influye en la corriente de salida en el lado secundario, pues recordemos que existe una corriente secundaria estandarizada, es así que de acuerdo al nivel de corriente en el lado primario se debe estimar dicha salida secundaria [23].

1.1.19 Burden

El Burden del transformador corresponde a la carga que se conecta sin alterar la precisión del mismo, este representa la potencia.

La norma ANSI admite cargas nominales expresadas como: B-0.1, B-0.2, B-0.5, B-1, B-2, B-4, B-8, los valores indican la impedancia en ohmios; los cuales respectivamente en la norma IEC representan: 2.5VA; 5VA; 15VA; 30VA; 50VA; 100VA; 200VA [24].



Figura 5 Transformador de corriente

1.1.20 Regulación No ARCERNNR – 002/20

Esta regulación de la Agencia de Regulación y Control de Electricidad y Recursos Naturales No Renovables (ARCERNNR) está vigente en el Ecuador desde el año 2020, establece los límites e indicadores de la calidad del servicio de comercialización y distribución de la energía eléctrica, además de los procedimientos para realizar la medición, registro y evaluación que deben ser cumplidos por las distintas empresas eléctricas que laboran en el país [32].

1.1.21 Cargabilidad de una microrred

La cargabilidad de redes eléctricas operando en condiciones normales debe ser máximo del 70% con la finalidad de garantizar la confiabilidad del servicio. La red

al estar siempre propensa a contingencias el 30% restante debe estar en la capacidad de operar trabajando al 100%, es decir a la potencia nominal [33].

1.1.22 Power Factory DigSilent

Power Factory DigSilent es el software de análisis de sistemas de potencia para el análisis de sistemas industriales, de generación, transmisión y distribución.

Cubre funciones estándar hasta aplicaciones avanzadas y altamente complejas, entre ellas está incluida la generación de energía eólica, la generación distribuida, la simulación en tiempo real y el monitoreo del rendimiento y las pruebas del sistema. Fácil de usar, totalmente amigable con el usuario, está disponible para distintos sistemas operativos. Power Factory combina capacidades de modelado de sistemas confiables y flexibles con algoritmos avanzados y un concepto de base de datos único. Además, Power Factory, con su scripting y flexibilidad de interfaz, es adecuado para soluciones altamente automatizadas e integración en sus aplicaciones comerciales.

Power Factory es un software de uso bajo licencia de compra, existe versiones de prueba con tiempo limitado de 30 días, pero la disponibilidad del uso de sus módulos no es completo.

Este software es usado actualmente por dos de las principales entidades del sector eléctrico del Ecuador como es TRANSELECTRIC y CENACE, la finalidad del uso de este software es para obtener información necesaria para poder realizar sus funciones técnicas.

En la figura 6 se muestra el ícono de presentación del software Power factory DigSilent.



Figura 6 Ícono DigSilent

1.1.23 Componentes principales de una microrred

Todos los íconos correspondientes a los componentes se encuentran en la parte derecha de la ventana principal del software Power factory como se evidencia en la figura 7.

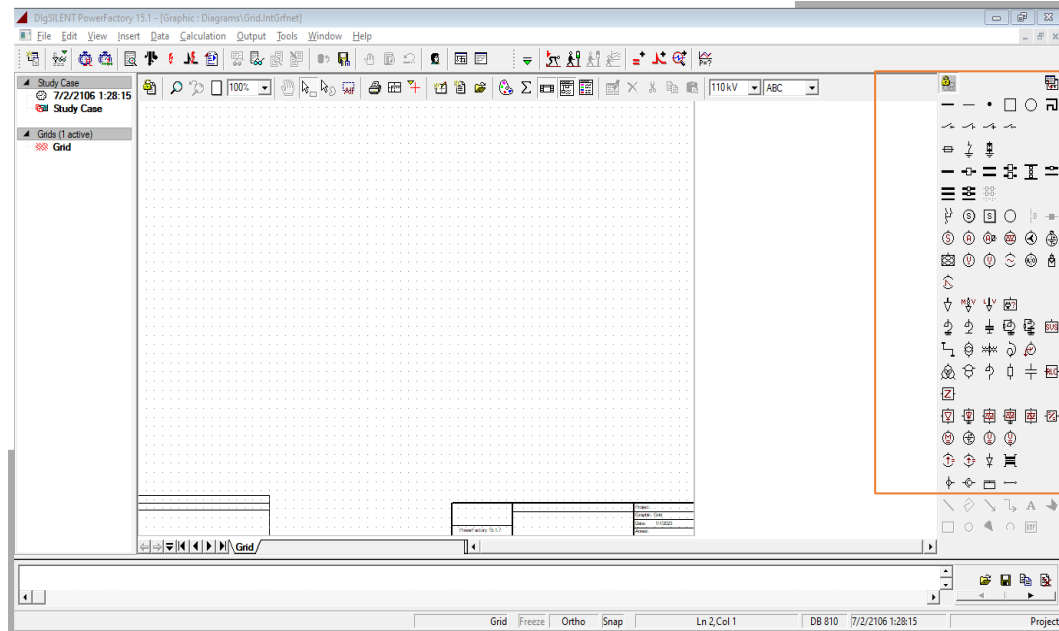


Figura 7 Componentes de la microrred

1.1.23.1 Máquina Sincrónica

La máquina síncrona es considerada como uno de los componentes más importantes de un sistema eléctrico pues pasa a ser parte fundamental por ser generador de la energía para que resto de componentes pueda funcionar [14]. Esta máquina consta de dos partes principales, como son el estator y el rotor; el segundo de estos es el que se encarga de crear una fuerza magnetomotriz por medio del devanado de campo que es energizado por una fuente de corriente continua.

La figura 8 presenta el ícono de la máquina síncrona en el software Power Factory de Digsilent.



Figura 8 Ícono máquina síncrona

1.1.23.2 Generador eólico

El generador eólico es uno de los principales aprovechadores de energías renovables para la generación de energía eléctrica, este convierte la energía cinética del viento por medio de una turbina; la generación de esta máquina es en corriente continua, por lo que es sumamente necesario el uso de inversores de corriente para poderse conectar a la microrred, pues la disposición de esta es en corriente alterna, en la figura 9 se puede evidenciar el ícono del generador eólico en el software a utilizarse.



Figura 9 Ícono generador eólico

1.1.23.3 Planta fotovoltaica

La planta fotovoltaica es otro generador, este aprovecha la irradiancia sobre un área determinada para convertirla en energía eléctrica, la generación de esta electricidad es en CC, por lo que al igual que el generador eólico es indispensable el uso de inversores de corriente para poderse conectar al sistema de la microrred, en la figura 10 se evidencia el ícono de la planta fotovoltaica en el software Power Factory.

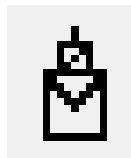


Figura 10 Ícono planta fotovoltaica

1.1.23.4 Transformador

Este elemento permite enlazar los distintos sistemas de generación, los de transmisión y estos con los de distribución por su característica de cambiar los niveles de voltaje, además que por medio de taps permite regular los perfiles de voltaje [15]. La figura 11 presenta el ícono del transformador en el software.

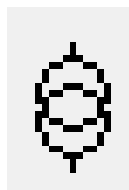


Figura 11 Ícono transformador

1.1.23.5 Línea de transmisión

Este elemento del sistema eléctrico es el encargado de transportar la potencia desde los puntos de generación de la microrred hasta las subestaciones que se encargan de satisfacer la demanda que necesitan las cargas para poder operar con el mínimo consumo económico posible [16], podemos apreciar el ícono de la línea de transmisión en la figura 12 presentada a continuación.

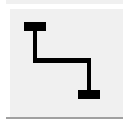


Figura 12 Ícono línea de transmisión

1.1.23.6 Cargas

Este elemento es uno de los más variables, pues cambia constantemente, es así que existen tres tipos de representación de cargas, potencia constante, impedancia constante y corriente constante [17], en el software se lo puede identificar con el ícono indicado en la figura 13.



Figura 13 Ícono cargas

1.1.24 Módulos de estudio de Power Factory

Los íconos de los módulos para estudios se encuentran en la parte superior de la ventana principal del software Power Factory como se muestra en la figura 14.

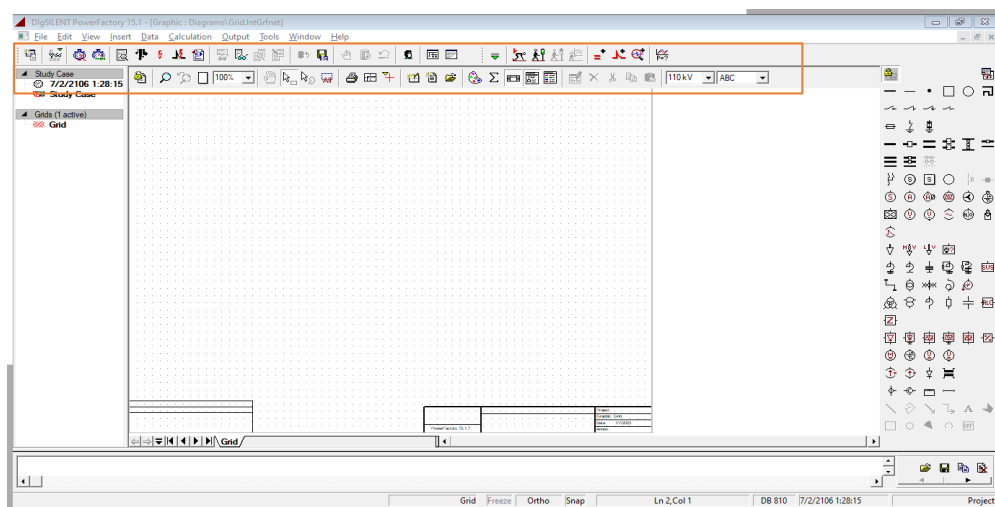


Figura 14 Ubicación de módulos de estudio

1.1.24.1 Estudio de flujo de carga

La realización de este estudio es de suma importancia, ya sea para la planeación de expansión de la microrred o a su vez para determinar el comportamiento del sistema en estado estacionario, ya que se obtiene los perfiles de voltaje y los valores de ángulo de fase de las barras de la microrred, estos valores muestran cómo se está efectuando el flujo de potencia en toda la microrred, además que este módulo nos permite determinar si el sistema eléctrico está correctamente armado o existen falencias al momento de armar la red; este estudio se lo puede efectuar una vez armado el sistema eléctrico en el software por medio del ícono que se muestra en la figura 15.



Figura 15 Módulo de flujo de carga

1.1.24.2 Estudio de cortocircuitos

Efectuar este tipo de estudio es de mucha importancia para un sistema eléctrico, pues por medio de este estudio se puede dimensionar y posteriormente seleccionar los dispositivos de protección que van a ser los encargados de proteger los diferentes componentes de la red, el ícono que permite realizar este tipo de cálculos se puede evidenciar en la figura 16.



Figura 16 Módulo de cálculo de cortocircuitos.

1.1.24.3 Módulo de simulación dinámica

Efectuar una simulación dinámica nos brinda el comportamiento del sistema frente a distintas condiciones o perturbaciones, es necesario programar los eventos en intervalos de tiempo para obtener las gráficas que el usuario desee, comúnmente las gráficas más obtenidas son las de ángulo en las barras o frecuencia en las barras, los íconos que permiten realizar este tipo de simulaciones se pueden observar en la figura 17.



Figura 17 Módulo de simulación dinámica.

Los eventos se pueden modificar en la ventana “eventos de simulación” que se muestra en la figura 18.

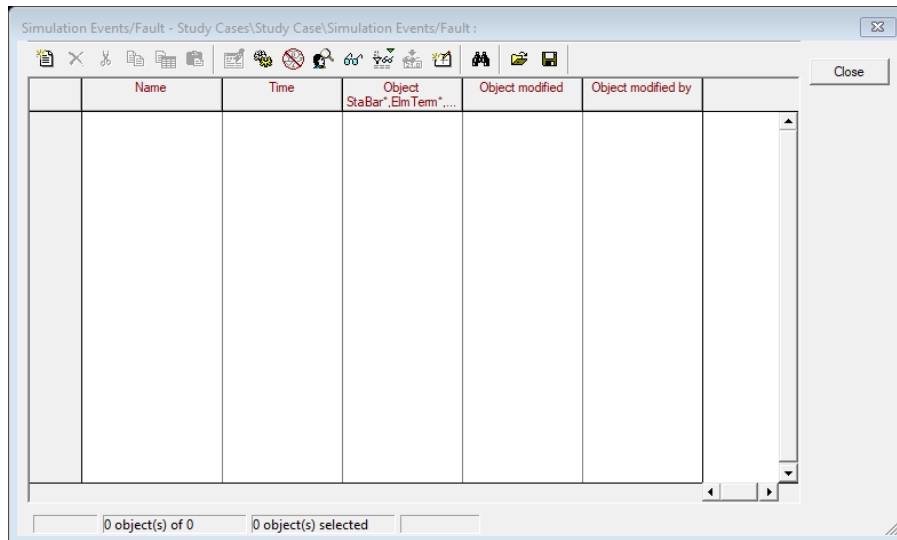


Figura 18 Cuadro de eventos de simulación.

1.2. Fundamentación metodológica

- El enfoque brindado para este proyecto es cualitativo, pues al referirnos a protecciones eléctricas, hablamos de la cualidad de proteger los equipos del sistema eléctrico.
- El proyecto a desarrollarse refiere a un caso de estudio en el cual se pretende implementar un circuito de estudio de la IEEE y obtener las protecciones eléctricas.
- El punto de partida del proyecto es el circuito planteado como caso de estudio

1.3. Conclusiones Capítulo I

La realización de este proyecto comprende una síntesis de módulos estudiados en la maestría, pero entre las más destacables son protecciones eléctricas y energías renovables.

Para el desarrollo del estudio es necesario la utilización de software, en este caso por el uso los módulos de la maestría, además de la respectiva licencia que posee la universidad es el software Power Factory.

CAPÍTULO II

PROPUESTA

2.1. Título del proyecto.

Simulación del caso de estudio planteado en el software Power Factory de DigSilent.

2.2. Objetivo del proyecto.

Determinar el comportamiento de la microrred en estado estable, gráficas de operación de dispositivos de protección frente a los distintos escenarios planteados, gráficas de coordinación de protecciones de sobrecorriente de fase frente a fallas monofásicas, así como las curvas de frecuencias en las barras frente a distintas perturbaciones.

2.3. Descripción de la propuesta.

Hoy en día, en el mercado eléctrico se escucha el concepto de microrredes, el cual es una serie de generadores de cargas y almacenamiento de energía que forman una pequeña red, que se puede conectar a una red convencional u operar en modo isla, es decir sin conexión a la red eléctrica.

La creciente demanda de energía eléctrica y la predisposición a reducir los gases de efecto invernadero que aportan al calentamiento global exigen la integración de fuentes de energía renovables como la eólica y la solar a través de la generación distribuida; los usuarios ya no son solo una carga en la red, sino que pueden aportar energía a la misma, reduciendo así las pérdidas de electricidad y la contaminación que se produce al generar energía eléctrica a partir de fuentes de energía fósiles.

Sin embargo, debido a la imprevisibilidad de la energía renovable, el flujo bidireccional y las corrientes de cortocircuito variables que exhiben las barras de generación distribuida complican enormemente la operación y protección del sistema. Esta es la razón por la que la protección de circuitos eléctricos tradicional no funciona correctamente.

Las fallas tanto grandes como pequeñas en el sistema eléctrico, provocan importantes pérdidas económicas que afectan directamente la calidad de vida de las personas. Por este motivo, se requiere un estudio exhaustivo de los dispositivos de protección eléctrica. Los estudios sobre la protección de las microrredes son de gran interés para mejorar la confiabilidad considerando el uso de energías renovables, ya que pueden operar en islas con solo generación distribuida, pero esto implica que los componentes de las microrredes necesitan un control para asegurar los niveles de voltaje, frecuencia, potencia activa y reactiva en valores nominales.

En el presente proyecto se realiza la simulación en el software Power Factory DigSilent de un caso de estudio en el cual se efectúa el análisis de flujo de carga, análisis de cortocircuito en las barras donde se encuentran conectadas las fuentes de generación, coordinar las protecciones de sobrecorriente de fase frente a fallas monofásicas y una simulación dinámica de cortocircuito en las barras previamente mencionadas, con la finalidad de obtener criterios de protección de sobrecorrientes y verificar el comportamiento de la frecuencia del sistema frente a dichas contingencias.

2.4. Metodología o procedimientos empleados para el cumplimiento de los objetivos planteados

La implementación de energía distribuida en las microrredes es una oferta muy beneficiosa para el mercado eléctrico, ya que es una propuesta renovable y limpia, pero la misma naturaleza de estas fuentes de energía, además de la tecnología necesaria para poder utilizarlas presenta desafíos técnicos muy grandes, entre ellos está la protección del sistema [5], [10], [11]; para el caso de estudio se plantea la simulación de [9], sin considerar la red eléctrica convencional, además de añadir un pequeño generador síncrono en la barra 2 y una carga 1 en la barra 1; en este estudio se aborda el análisis de curvas de relés frente a fallas trifásicas individuales en las barras donde se encuentran conectados generadores, además de verificar el estado de la red con un flujo de carga y comprobar la frecuencia mediante una simulación dinámica frente a las fallas anteriormente mencionadas.

Para poder desarrollar las actividades propuestas, es necesario en primera instancia realizar la simulación del caso de estudio, dicha simulación se la realiza en el

software DigSilent, del cual la Universidad Técnica de Cotopaxi posee licencia; la topología de la red se detalla en la figura 19.

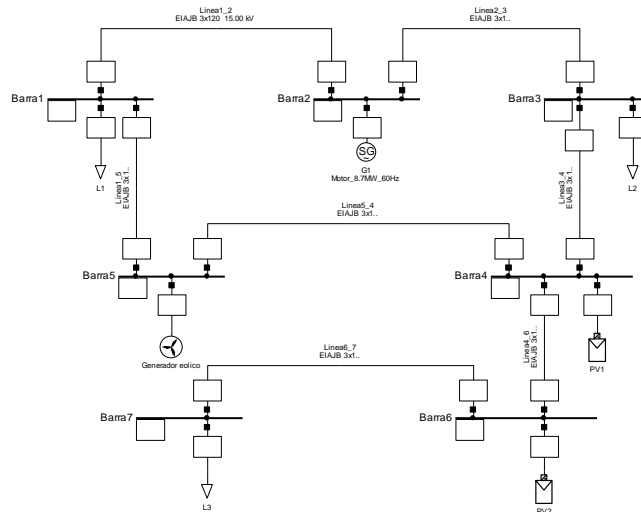


Figura 19 Topología del caso de estudio propuesto [9].

La topología de la red se puede identificar de mejor manera en el ANEXO A.

Las características técnicas de los componentes de la microrred se detallan a continuación

Generador síncronico

Nominal <u>A</u> pparent Power	9,39	MVA
Nominal <u>V</u> oltage	11,	kV
Power <u>F</u> actor	0,9	
Connection	YN	

Figura 20 Características de generador síncronico

Generador eólico

Dispatch	
Input Mode	P, cos(phi)
<u>A</u> ctive Power	1, MW
Power <u>F</u> actor	0,8 ind.
<u>V</u> oltage	1, p.u.
Angle	0, deg
Droop	1, %
Prim. Frequency Bias	0, MW/Hz

Figura 21 Características de generador eólico

Generador fotovoltaico 1

Active Power	
Active Power	2000, kW
Prim. Frequency Bias	0, kW/Hz

Reactive Power/Voltage	
Input Mode	P, cos(phi) ...
Power Factor	0,8 ind. ...
Voltage	1, p.u.
Angle	0, deg
Drop	1, %

Figura 22 Características de generador fotovoltaico 1

Generador fotovoltaico 2

Active Power	
Active Power	1900, kW
Prim. Frequency Bias	0, kW/Hz

Reactive Power/Voltage	
Input Mode	P, cos(phi) ...
Power Factor	0,8 ind. ...
Voltage	1, p.u.
Angle	0, deg
Drop	1, %

Figura 23 Características de generador fotovoltaico 2.

Línea_1_2

Number of parallel Lines	
Number of parallel Lines	1

Parameters	
Thermal Rating
Length of Line	5, km
Derating Factor	1,
Laying	Ground

Resulting Values	
Rated Current (act.)	0,265 kA
Pos. Seq. Impedance, Z1	1,470693 Ohm
Pos. Seq. Impedance, Angle	23,27558 deg
Pos. Seq. Resistance, R1	1,351 Ohm
Pos. Seq. Reactance, X1	0,58115 Ohm
Zero Seq. Resistance, R0	5,4045 Ohm
Zero Seq. Reactance, X0	2,3245 Ohm
Earth-Fault Current, Ice	13,9153 A
Earth Factor, Magnitude	1,000095
Earth Factor, Angle	-0,00375731 deg

Figura 24 Características de línea_1_2.

Línea_2_3

Number of parallel Lines		1
Parameters		
Thermal Rating	▼ → ...	
Length of Line	3.	km
Derating Factor	1.	
Laying	Ground	▼
Resulting Values		
Rated Current (act.)		0,44 kA
Pos. Seq. Impedance, Z1		0,4232794 Ohm
Pos. Seq. Impedance, Angle		43,64455 deg
Pos. Seq. Resistance, R1		0,3063 Ohm
Pos. Seq. Reactance, X1		0,29214 Ohm
Zero Seq. Resistance, R0		1,2255 Ohm
Zero Seq. Reactance, X0		1,16859 Ohm
Earth-Fault Current, Ice		8,349178 A
Earth Factor, Magnitude		1,000187
Earth Factor, Angle		-0,00835877 deg

Figura 25 Características de línea_2_3.

Línea_3_4

Number of parallel Lines		1
Parameters		
Thermal Rating	▼ → ...	
Length of Line	2.	km
Derating Factor	1.	
Laying	Ground	▼
Resulting Values		
Rated Current (act.)		0,4 kA
Pos. Seq. Impedance, Z1		0,3231254 Ohm
Pos. Seq. Impedance, Angle		38,46596 deg
Pos. Seq. Resistance, R1		0,253 Ohm
Pos. Seq. Reactance, X1		0,201 Ohm
Zero Seq. Resistance, R0		1,0118 Ohm
Zero Seq. Reactance, X0		0,8042 Ohm
Earth-Fault Current, Ice		5,566119 A
Earth Factor, Magnitude		0,9999669
Earth Factor, Angle		0,01660523 deg

Figura 26 Características de línea_3_4.

Línea_4_5

Number of parallel Lines		1
Parameters		
Thermal Rating	▼ → ...	
Length of Line	3.	km
Derating Factor	1.	
Laying	Ground	▼
Resulting Values		
Rated Current (act.)		0,398 kA
Pos. Seq. Impedance, Z1		0,484744 Ohm
Pos. Seq. Impedance, Angle		38,47429 deg
Pos. Seq. Resistance, R1		0,3795 Ohm
Pos. Seq. Reactance, X1		0,30159 Ohm
Zero Seq. Resistance, R0		1,5177 Ohm
Zero Seq. Reactance, X0		1,2063 Ohm
Earth-Fault Current, Ice		8,349178 A
Earth Factor, Magnitude		0,9998129
Earth Factor, Angle		0,00550124 deg

Figura 27 Características de línea_4_5.

Línea_5_1

Number of parallel Lines		1
Parameters		
Thermal Rating	▼ → ...	
Length of Line	7.	km
Derating Factor	1.	
Laying	Ground	▼
Resulting Values		
Rated Current (act.)		0,45 kA
Pos. Seq. Impedance, Z1		0,9876519 Ohm
Pos. Seq. Impedance, Angle		43,64455 deg
Pos. Seq. Resistance, R1		0,7147 Ohm
Pos. Seq. Reactance, X1		0,68166 Ohm
Zero Seq. Resistance, R0		2,8595 Ohm
Zero Seq. Reactance, X0		2,72685 Ohm
Earth-Fault Current, Ice		19,48141 A
Earth Factor, Magnitude		1,00022
Earth Factor, Angle		-0,00640013 deg

Figura 28 Características de línea_5_1.

Línea_4_6

Number of parallel Lines		1
Parameters		
Thermal Rating	▼ → ...	
Length of Line	3. km	
Derating Factor	1.	
Laying	Ground	▼
Resulting Values		
Rated Current (act.)		0,505 kA
Pos. Seq. Impedance, Z1		0,3680549 Ohm
Pos. Seq. Impedance, Angle		50,15855 deg
Pos. Seq. Resistance, R1		0,2358 Ohm
Pos. Seq. Reactance, X1		0,2826 Ohm
Zero Seq. Resistance, R0		0,9426 Ohm
Zero Seq. Reactance, X0		1,1307 Ohm
Earth-Fault Current, Ice		8,349178 A
Earth Factor, Magnitude		0,9998606
Earth Factor, Angle		0,0338792 deg

Figura 29 Características de línea_4_6.

Línea_6_7

Number of parallel Lines		1
Parameters		
Thermal Rating	▼ → ...	
Length of Line	2. km	
Derating Factor	1.	
Laying	Ground	▼
Resulting Values		
Rated Current (act.)		0,315 kA
Pos. Seq. Impedance, Z1		0,4473748 Ohm
Pos. Seq. Impedance, Angle		29,44147 deg
Pos. Seq. Resistance, R1		0,3896 Ohm
Pos. Seq. Reactance, X1		0,2199 Ohm
Zero Seq. Resistance, R0		1,5586 Ohm
Zero Seq. Reactance, X0		0,87964 Ohm
Earth-Fault Current, Ice		5,566119 A
Earth Factor, Magnitude		1,000144
Earth Factor, Angle		-0,00270767 deg

Figura 30 Características de línea_6_7.

2.4.1. Estudio de flujo de carga

Los criterios considerados para desarrollar el flujo de potencia en el circuito de caso de estudio: la red podrá abastecer las cargas, la red debe mantener continuidad del servicio ante la existencia de falla de algún elemento del sistema, no se aceptan sobrecargas en los elementos de la red, el nivel de voltaje no debe exceder al 5%.

La figura 31 presenta el estado de la microrred en el momento de ejecutar el flujo de potencia a la misma.

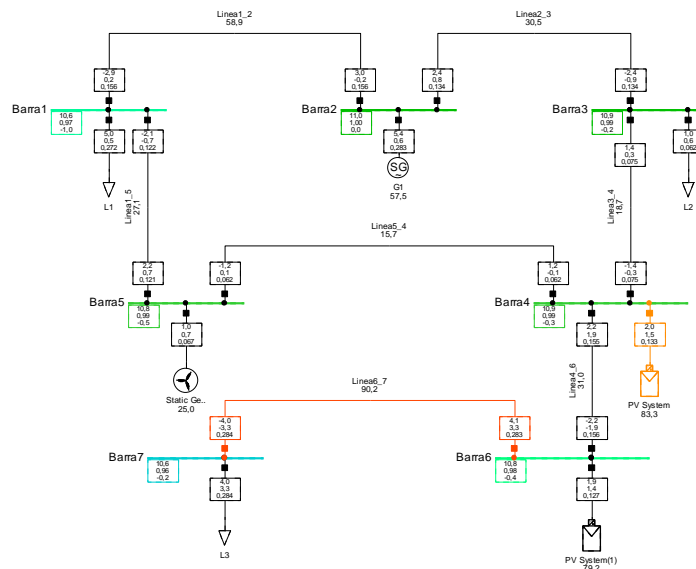


Figura 31 Flujo de potencia en la microrred

2.4.2. Estudio de cortocircuitos

En un sistema eléctrico, cualquier evento que interrumpa el flujo normal de energía se lo conoce como falla, la más grave es la simétrica o también conocida como falla trifásica, pero lo más común es que exista fallas asimétricas.

El resultado de estas fallas provoca: flujos no deseados de corriente, corrientes que podrían dañar equipos y producir armónicos en la red entre los más relevantes.

El estudio de cortocircuito considera las condiciones de falla más relevantes en la microrred que serían fallas trifásicas en las barras donde se encuentran conectados los generadores, es así que la tabla 1 plantea los escenarios de operación.

Tabla 2 Escenarios de operación definidos para el caso de estudio

Escenario de operación	Generador 1	Generador eólico	Generador fotovoltaico 1	Generador fotovoltaico 2
1	Cortocircuito			
2		Cortocircuito		
3			Cortocircuito	
4				Cortocircuito

Nota: Las fallas se efectúan en las barras donde se encuentran conectados los generadores.

2.4.3. 1er escenario de operación

La figura 32 muestra la falla trifásica en la barra 2, además de la ubicación del relé que desconecta el generador que aporta a la falla.

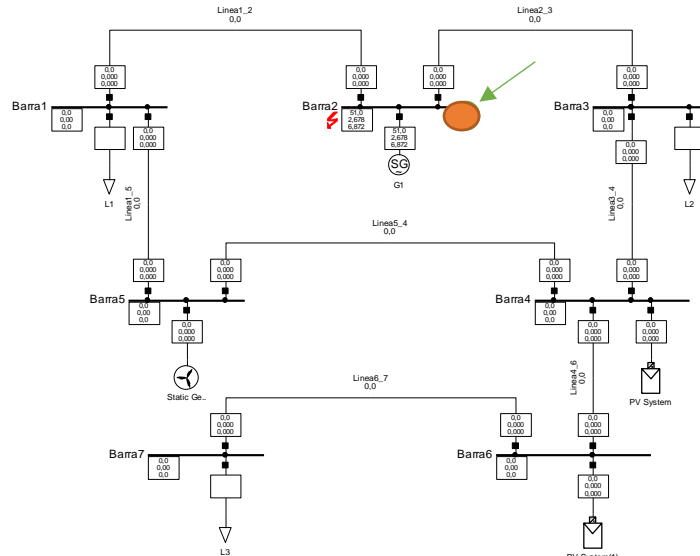


Figura 32 Ubicación de la falla trifásica y relé de desconexión

2.4.4. 2do escenario de operación

La figura 33 muestra la falla trifásica en la barra 5, además de la ubicación de los relés que desconecta al generador de la red.

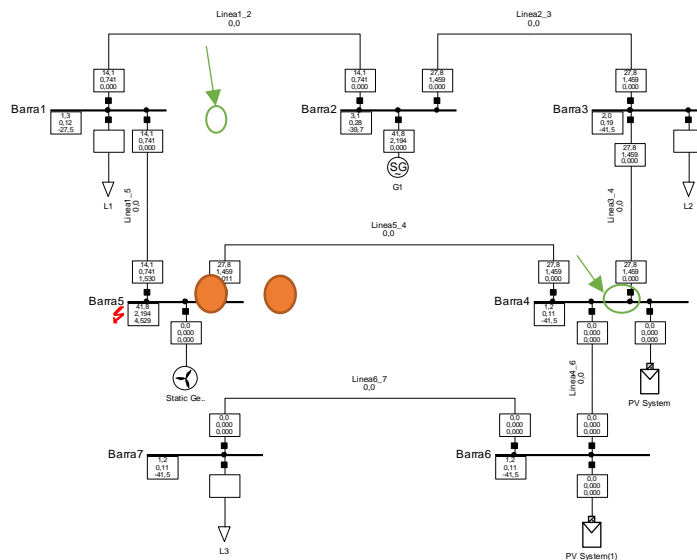


Figura 33 Ubicación de la falla trifásica y relés de desconexión

2.4.5. 3er escenario de operación

La figura 34 muestra la falla trifásica en la barra 4, además de la ubicación del relé que desconecta al generador de la red.

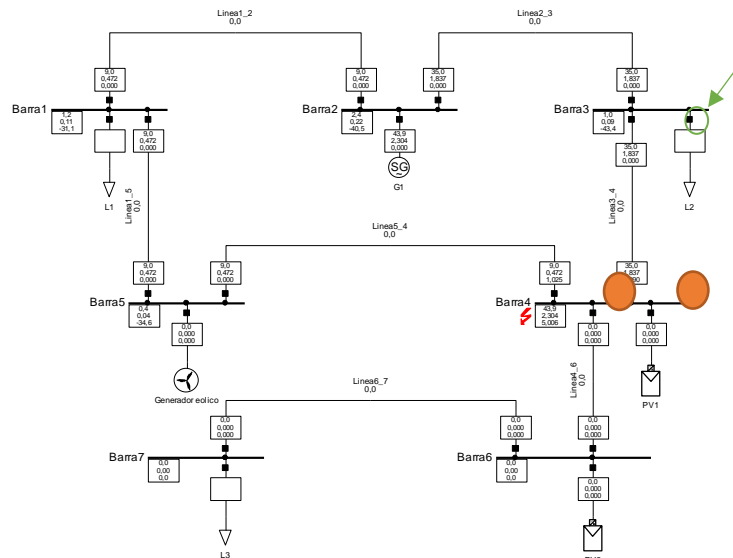


Figura 34 Ubicación de la falla trifásica y relé de desconexión

2.4.6. 4to escenario de operación

La figura 35 muestra la falla trifásica en la barra 6, además de la ubicación del relé que desconecta al generador de la red.

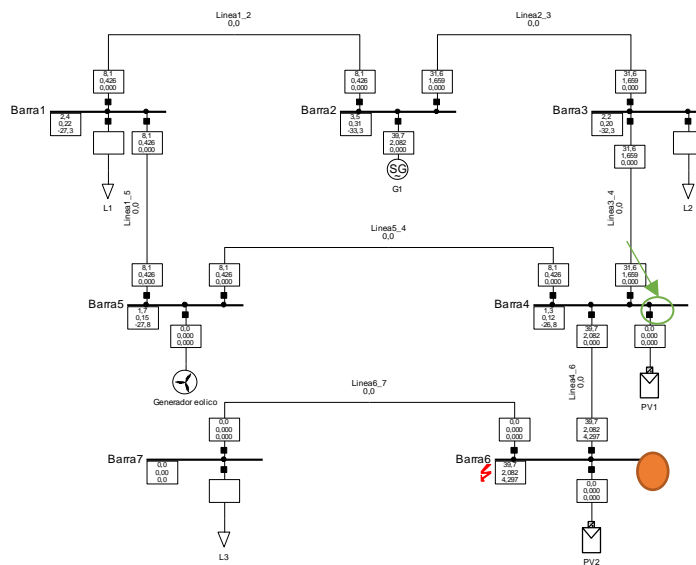


Figura 35 Ubicación de la falla trifásica y relé de desconexión

2.4.7. Coordinación de protecciones de sobrecorriente de fase frente a fallas monofásicas

Para iniciar con la coordinación de protecciones de sobrecorriente de fase, se realizó fallas monofásicas en todos los elementos de la microrred con la finalidad de estimar la mínima corriente de falla, es así que la figura 36 hasta la figura 49 muestran las fallas anteriormente mencionadas.

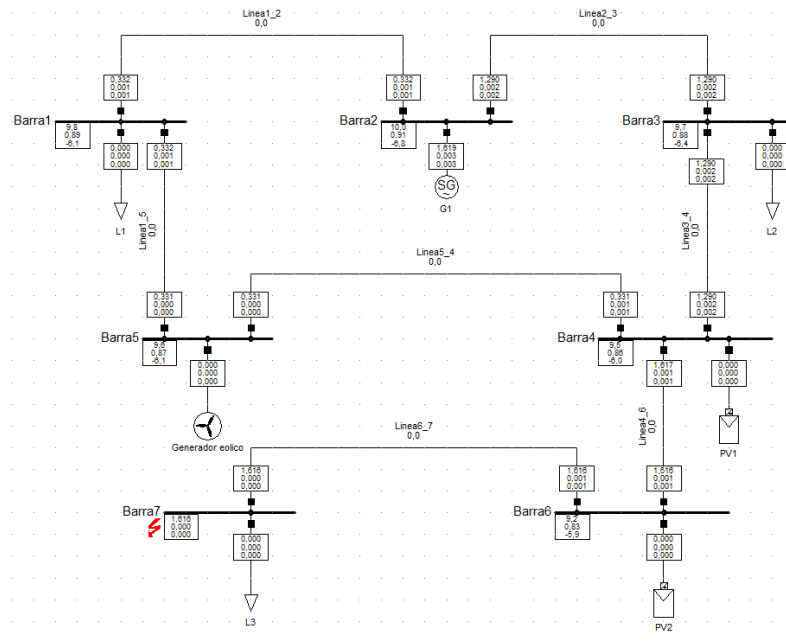


Figura 36 Falla monofásica en la barra 7

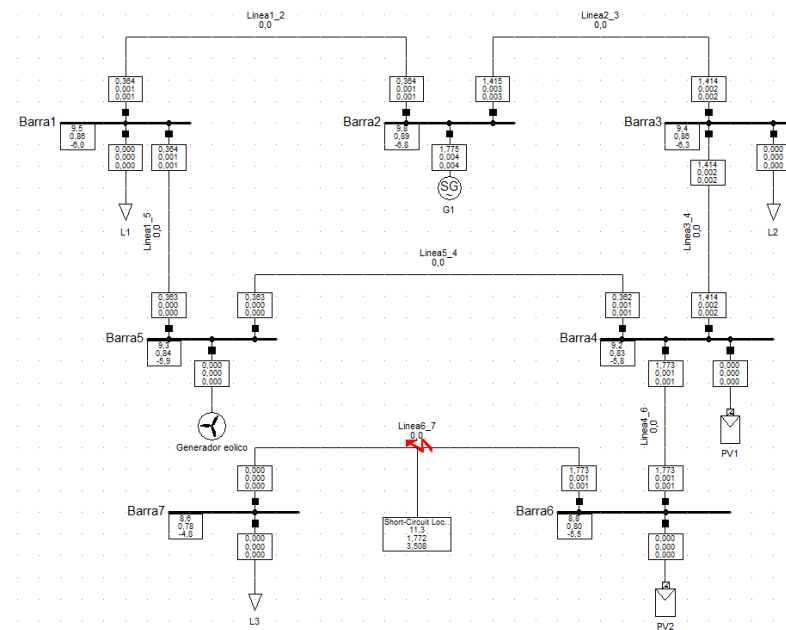


Figura 37 Falla monofásica en la línea 6-7

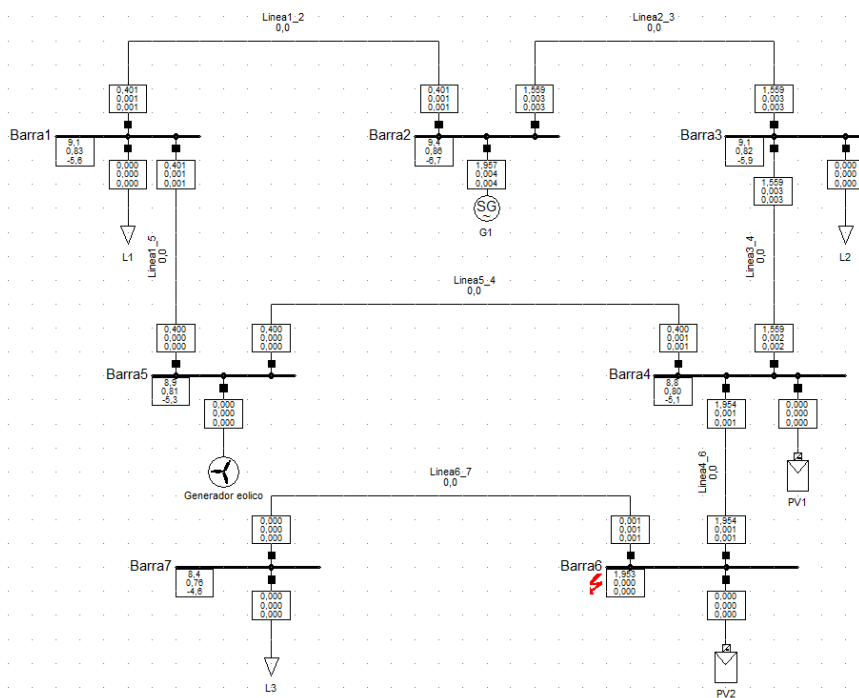


Figura 38 Falla monofásica en la barra 6

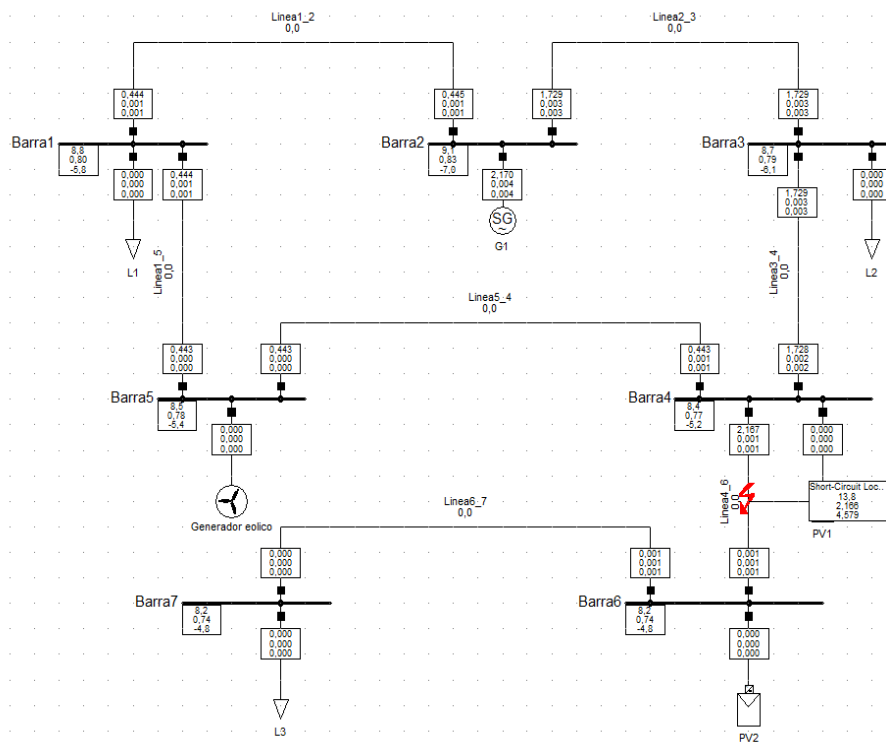


Figura 39 Falla monofásica en la línea 4-6

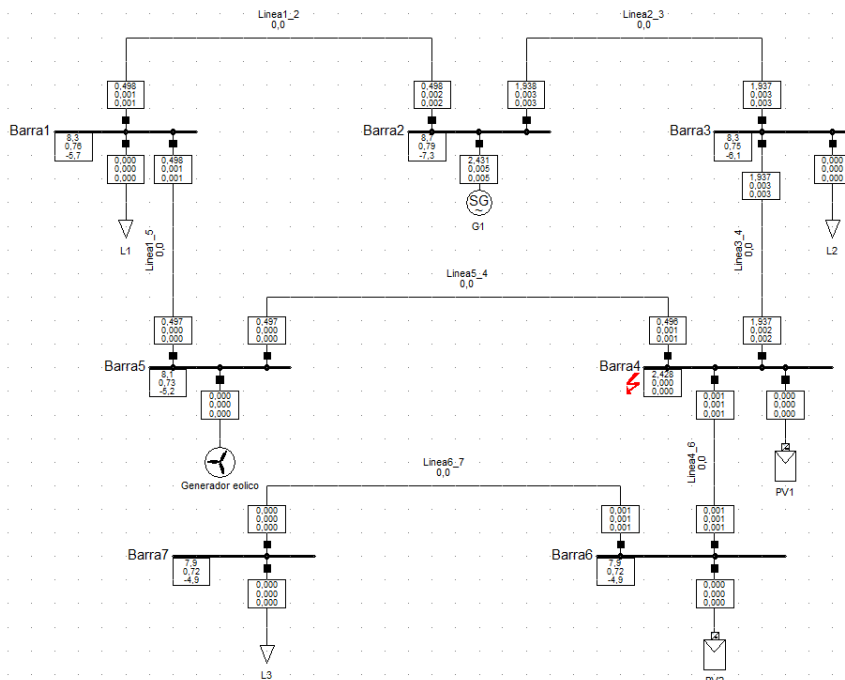


Figura 40 Falla monofásica en la barra 4.

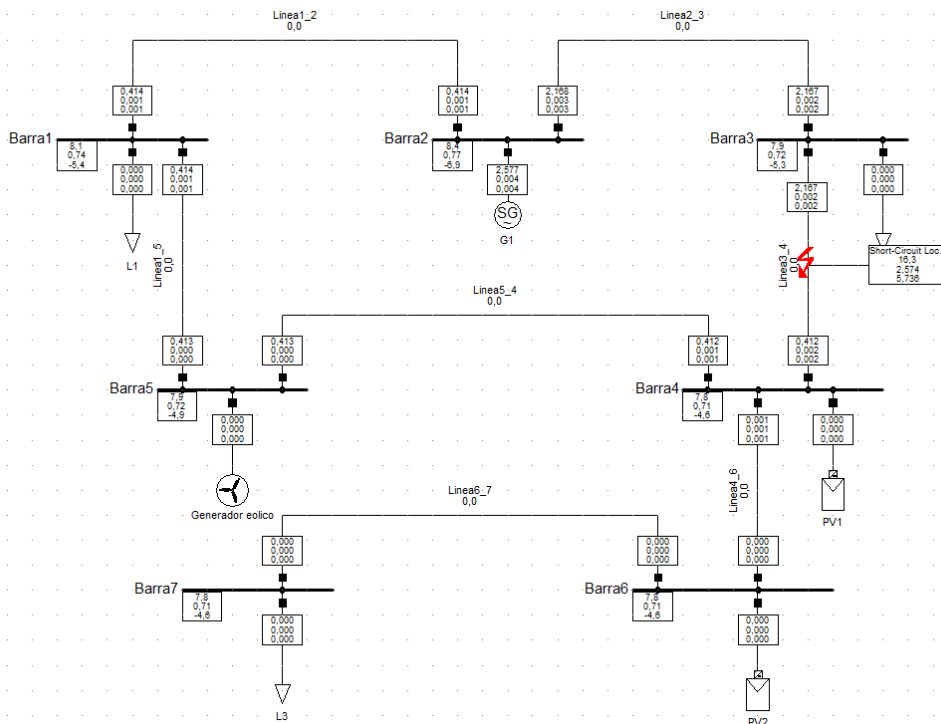


Figura 41 Falla monofásica en la línea 3-4

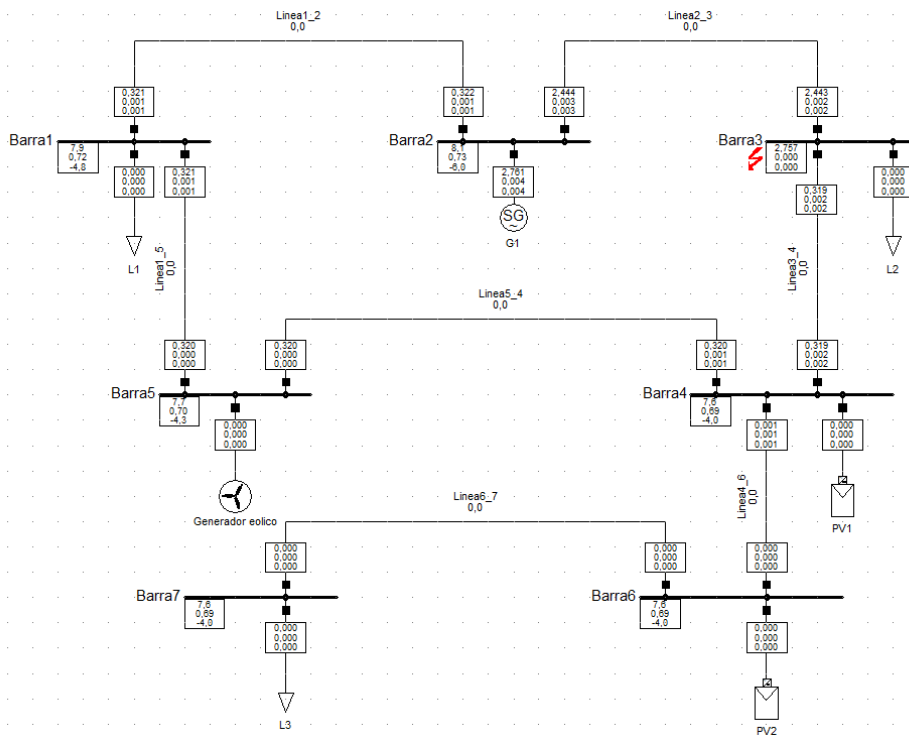


Figura 42 Falla monofásica en la barra 3

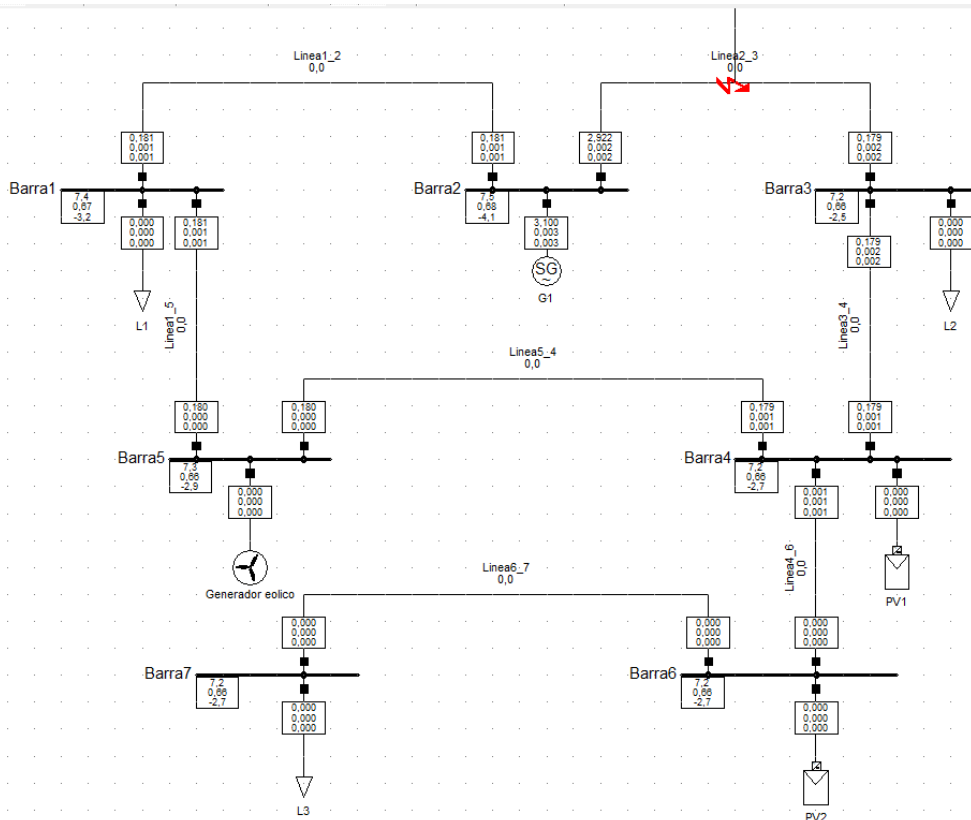


Figura 43 Falla monofásica en la línea 2-3

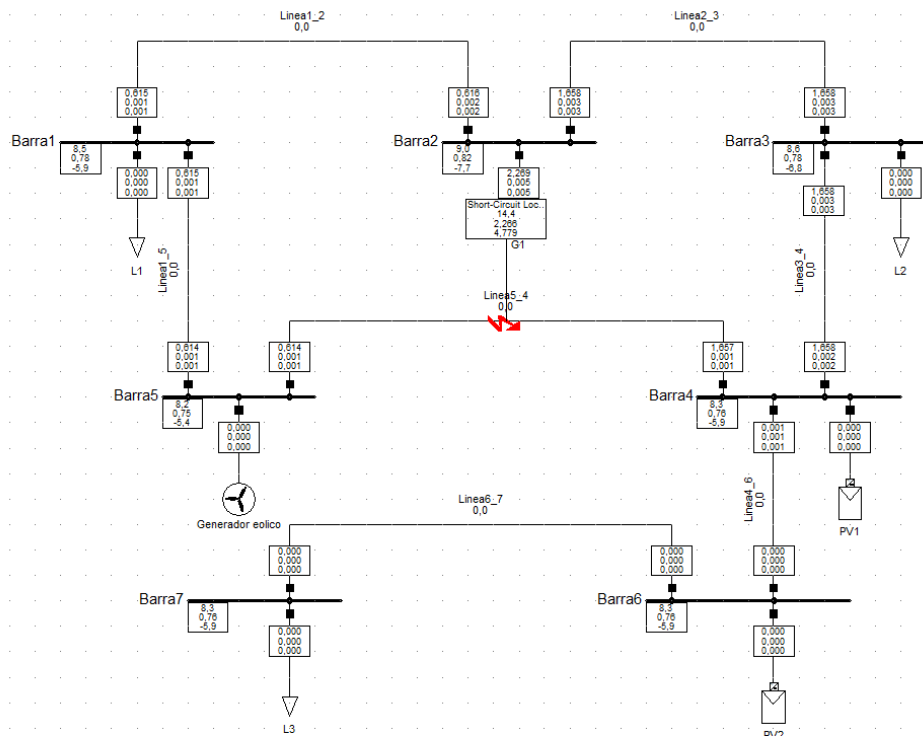


Figura 44 Falla monofásica en la línea 4-5

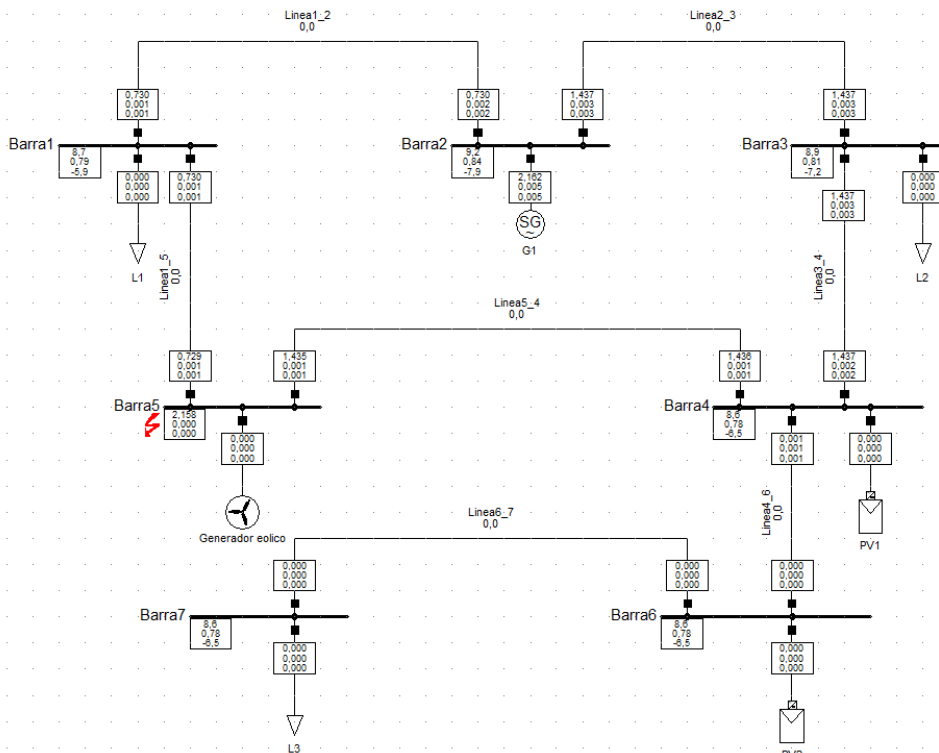


Figura 45 Falla monofásica en la barra 5

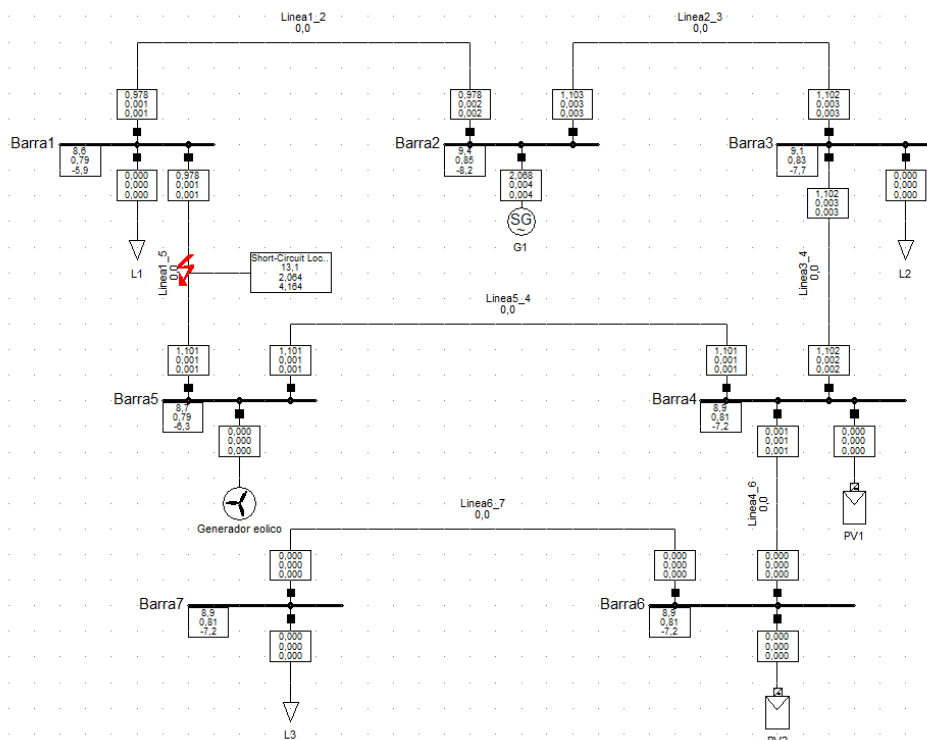


Figura 46 Falla monofásica en la línea 5-1

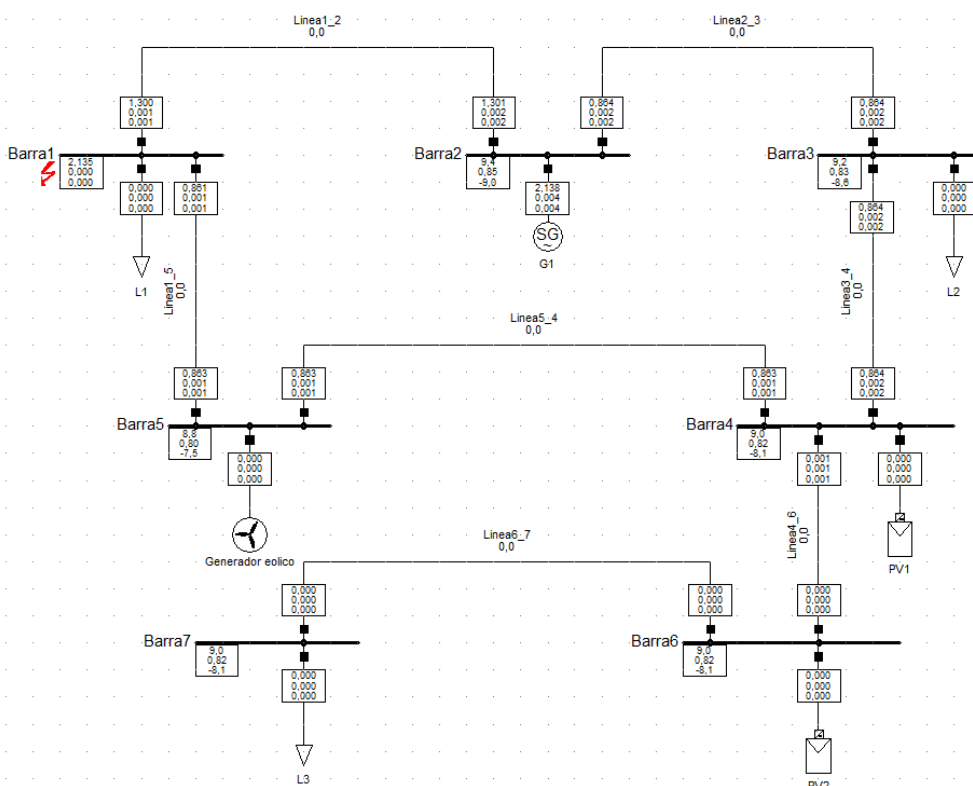


Figura 47 Falla monofásica en la barra 1

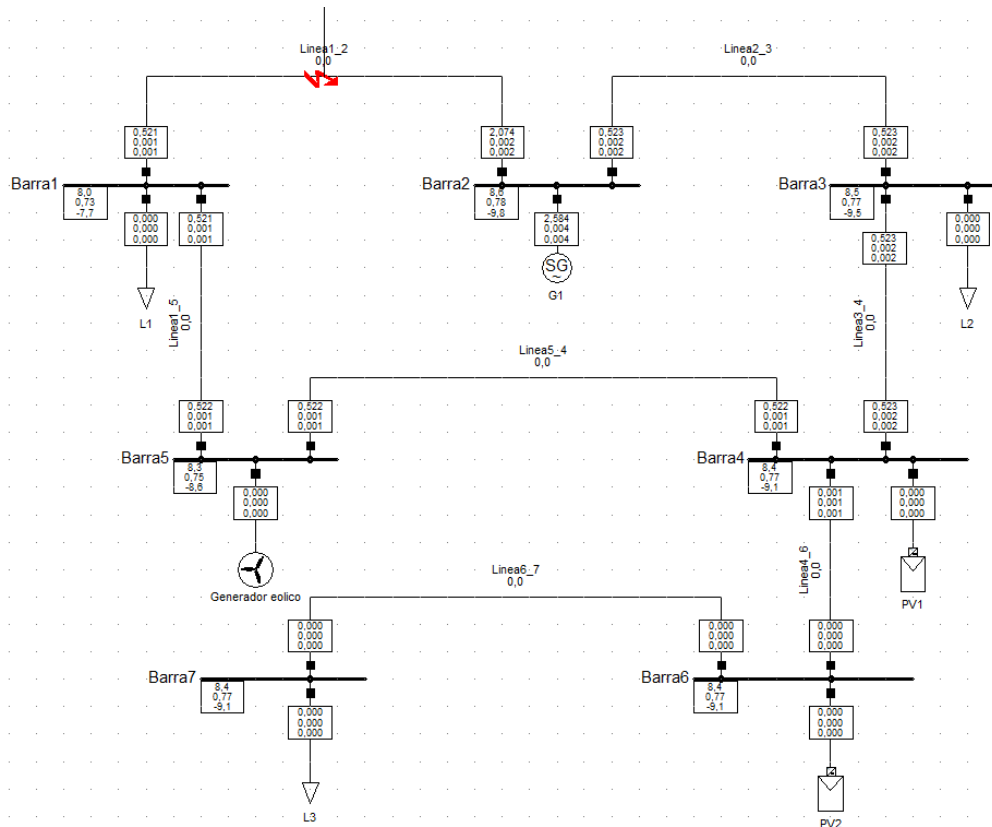


Figura 48 Falla monofásica en la línea 1-2

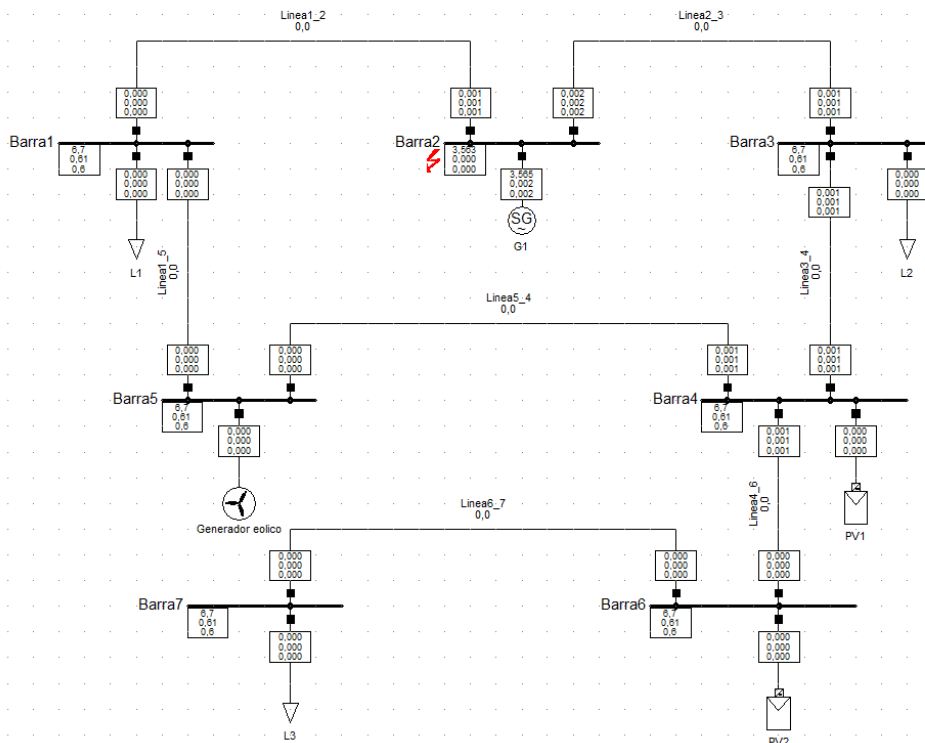


Figura 49 Falla monofásica en la barra 2

Como era de esperarse, la corriente mínima de falla se encuentra localizada cuando se realiza una falla en la barra más alejada del generador sincrónico, es decir la falla monofásica en la barra 7, así también se separó el circuito de la microrred en dos partes, la primera corresponde a la parte radial del circuito, es decir desde la barra 4, hasta la barra 7; y la segunda corresponde a toda la parte superior del circuito, es decir el circuito en anillo integrado por las barras 1, 2, 3, 4 y 5.

2.4.8. Simulación dinámica

La figura 36 presenta eventos de cortocircuito trifásicos en las barras donde se encuentran conectados generadores, con la finalidad de observar algún tipo de transitorio en la frecuencia.

Name	Time	Object StaBar*, Elm Term*....	Out of Service	Object modified	Object modified by
Short-Circuit Event	0,1	Barra2	<input type="checkbox"/>	6/11/2022 21:42:05	Acer
Short-Circuit Event(1)	0,5	Barra2	<input type="checkbox"/>	6/11/2022 22:07:56	Acer
Short-Circuit Event(2)	0,6	Barra5	<input type="checkbox"/>	6/11/2022 22:08:57	Acer
Short-Circuit Event(3)	1,	Barra5	<input type="checkbox"/>	6/11/2022 22:09:15	Acer
Short-Circuit Event(4)	1,1	Barra4	<input type="checkbox"/>	6/11/2022 22:09:36	Acer
Short-Circuit Event(5)	1,5	Barra4	<input type="checkbox"/>	6/11/2022 22:10:09	Acer
Short-Circuit Event(6)	1,6	Barra6	<input type="checkbox"/>	6/11/2022 22:10:27	Acer
Short-Circuit Event(7)	2,	Barra6	<input type="checkbox"/>	6/11/2022 22:10:37	Acer

Figura 50 Eventos de simulación dinámica

2.5. Conclusiones Capítulo II

Las distintas simulaciones efectuadas en el software fueron exitosas gracias a que las características técnicas de cada elemento de la microrred fueron ingresadas minuciosamente.

Los eventos de la simulación dinámica deben estar programados en orden con referencia al tiempo de ejecución de la simulación.

Las fallas más significativas que se puede obtener en la microrred son las trifásicas en las barras donde se encuentran conectadas las centrales de generación.

Otro tipo de fallas efectuadas para el análisis de protecciones de sobrecorriente son las fallas monofásicas, por el hecho de que este tipo de falla es más propenso a que suceda.

CAPÍTULO III

APLICACIÓN Y/O VALIDACIÓN DE LA PROPUESTA

3.1. Análisis de los resultados

3.1.1. Resultado del estudio de flujo de carga

La tabla 2 muestra los voltajes en p.u. de las barras de la microrred correspondiente al caso de análisis.

Tabla 3 Voltajes en p.u. de cada barra de la microrred

Barra	Voltaje (p.u.)
1	0,97
2	1,00
3	0,99
4	0,99
5	0,99
6	0,98
7	0,96

Nota: Los valores de la tabla son obtenidos a partir de la simulación en el software DigSilent

El perfil de voltaje en todas las barras de la microrred se encuentra en un margen tolerable, ya que los valores mostrados en p.u. no sobrepasan del 4% en caídas de voltaje; la regulación 002/20 de la ARCERNNR establece que para el nivel de voltaje de 11KV existe un margen tolerable de +- 6%.

La tabla 3 presenta la cargabilidad de los elementos de la microrred.

Tabla 4 Cargabilidad de los elementos de la microrred

Elemento	Cargabilidad (%)
Generador 1	57,5
Generador eólico	25,0
PV 1	83,3
PV 2	79,2
Línea 1_2	58,9
Línea 2_3	30,5
Línea 3_4	18,7
Línea 4_5	15,7
Línea 5_1	27,1
Línea 4_6	31,0
Línea 6_7	90,2

Nota: Los valores de la tabla son obtenidos a partir de la simulación realizada en DigSilent

Los elementos que se encuentran más cercanos a trabajar en el límite nominal son el generador fotovoltaico 1 con una cargabilidad del 83,3% y la Línea_6_7 con una cargabilidad del 90,2%; pero de acuerdo a [33], además de los elementos anteriormente mencionados también el generador fotovoltaico 2 con una cargabilidad del 79,2% deben considerarse que ya están trabajando propensos a no colaborar frente a una contingencia en la microrred.

3.1.2. Resultado del 1er escenario

En la figura 37 se puede evidenciar la solución de curvas para el generador que está conectado a la barra 2.

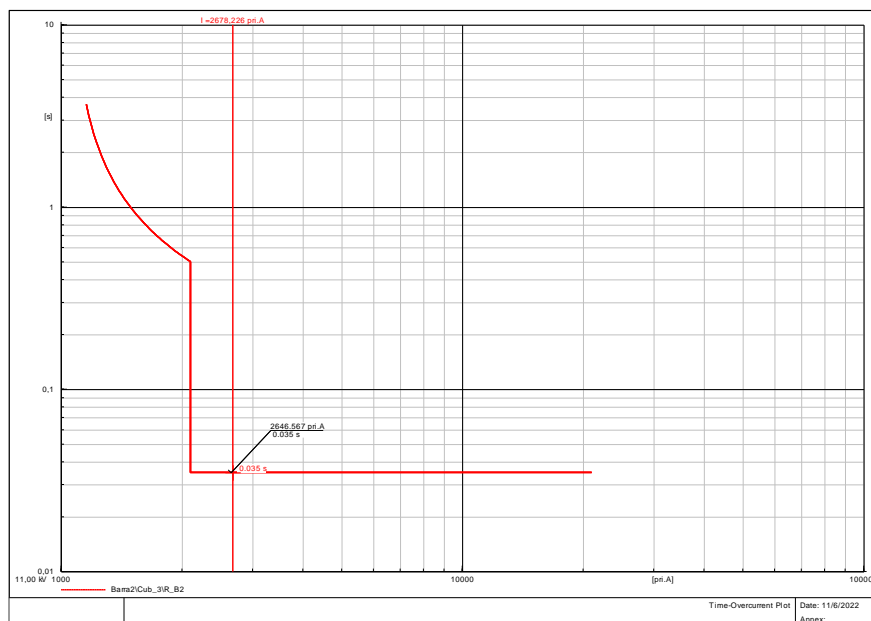


Figura 51 Curva de protección del primer escenario

El relé opera a corriente de falla con un valor de 2,68 KA con un tiempo de operación 35 ms, La tabla 5 nos muestra que el aporte completo al cortocircuito es por parte del generador sincrónico.

Tabla 5 Magnitudes de cortocircuito 1er escenario

Elemento	Vn [KV]	V [KV]	Scc [MVA]	Icc [KA]
Barra 2	11	0	51,03	2,68
Línea1_2				
Línea2_3				
G1			51,03	2,68

Nota: Los valores de la tabla son obtenidos a partir del reporte que se puede visualizar en el ANEXO B.

3.1.3. Resultado del 2do escenario

En la figura 38 se puede evidenciar la solución de curvas para el generador que está conectado a la barra 5.

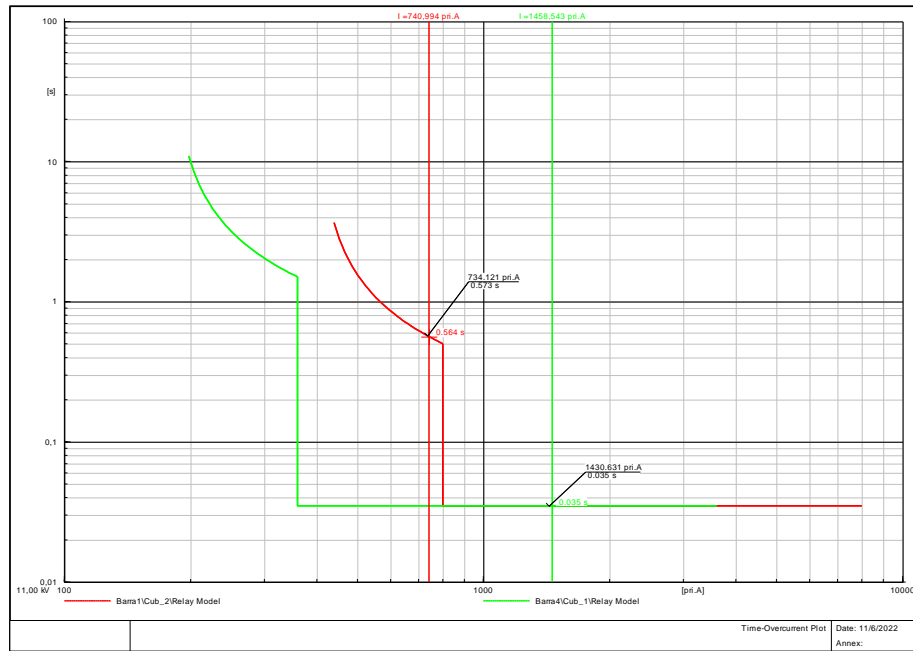


Figura 52 Curva de protección del segundo escenario

El relé que opera en la barra 1 censa una corriente de falla de 0,74 KA con un tiempo de operación de 0,573 s, además del relé que opera en la barra 4, censa un valor de 1,46 KA con un tiempo de operación de 0,035 s, es evidente notar que la corriente en la barra 4 duplica en valor a la barra 1; además la tabla 6 muestra que el aporte al cortocircuito es desde la barra 1 y la barra 4 hacia la barra 5.

Tabla 6 Magnitudes de cortocircuito 2do escenario

Elemento	Vn [KV]	V [KV]	Scc [MVA]	Icc [KA]
Barra 5	11	0	41,8	2,19
Línea1_5			14,12	0,74
Línea5_4			27,79	1,46
Ge. eólico			0	0

Nota: Los valores de la tabla son obtenidos a partir del reporte que se puede visualizar en el ANEXO C

3.1.4. Resultado del 3er escenario

En la figura 39 se presenta la solución de curvas para el generador que está conectado a la barra 4.

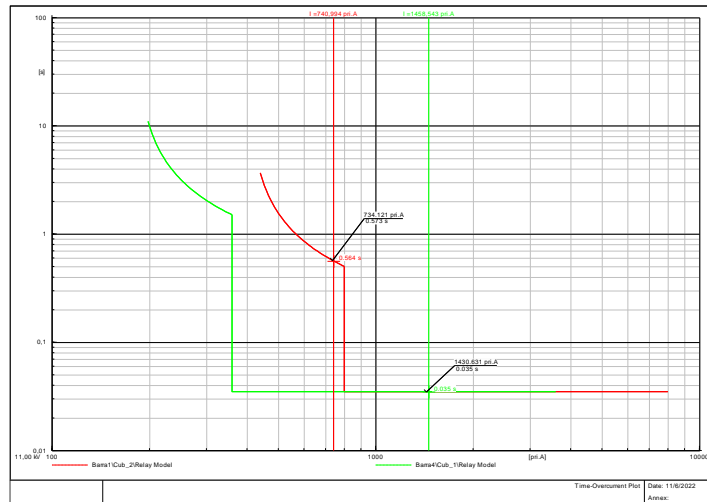


Figura 53 Curva de protección del tercer escenario

El relé que opera en la barra 5 censa una corriente de falla de 0,47 KA con un tiempo de operación de 0,628 s, además del relé que opera en la barra 3, censa un valor de 1,84 KA con un tiempo de operación de 0,035 s.

La tabla 7 muestra el aporte de corriente al cortocircuito es por parte de la barra 5 y la barra 3 hacia la barra 4.

Tabla 7 Magnitudes de cortocircuito 3er escenario

Elemento	Vn [KV]	V [KV]	Scc [MVA]	Icc [KA]
Barra 4	11	0	43,9	2,3
Línea5_4			8,99	0,47
Línea3_4			34,99	1,84
Línea4_6			0	0
PV1			0	0

Nota: Los valores de la tabla son obtenidos a partir del reporte que se puede visualizar en el ANEXO D.

3.1.5. Resultado del 4to escenario

En la figura 40 se presenta la solución de curvas para el generador que está conectado a la barra 6.

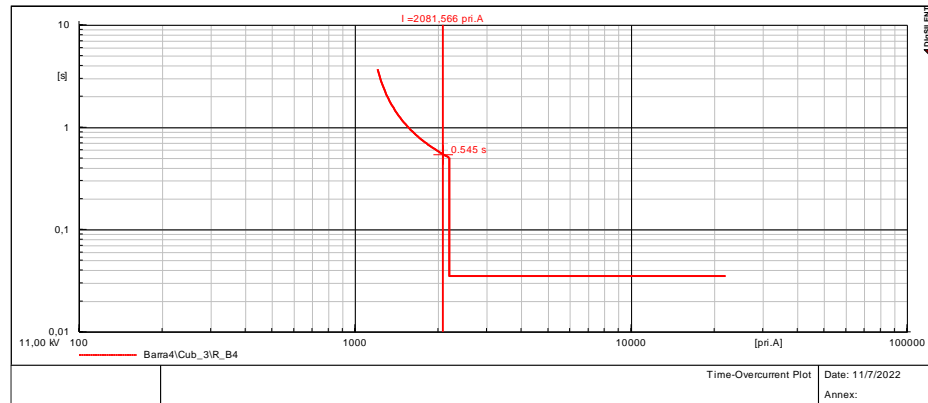


Figura 54 Curva de protección del cuarto escenario

El relé de la barra 4, censa una corriente de falla de 2 081, 56 A en un tiempo de operación de 0,545 s, la barra 7 no brinda aporte a la falla trifásica puesto que es una barra de carga. La tabla 8 nos muestra que el aporte al cortocircuito en la barra 6 es por parte de la barra 4.

Tabla 8 Magnitudes de cortocircuito 4to escenario

Elemento	Vn [KV]	V [KV]	Scc [MVA]	Icc [KA]
Barra 6	11	0	39,66	2,08
Línea4_6			39,66	2,08
Línea6_7			0	0
PV2			0	0

Nota: Los valores de la tabla son obtenidos a partir del reporte que se puede visualizar en el ANEXO E.

Tabla 9 Resumen de resultados de escenarios

Escenario	Ubicación	Icc (KA)	Sec (MVA)	t (s)
1	Barra 2	2,68	51,03	0,035
2	Barra 1	0,74	14,12	0,573
	Barra 4	1,46	27,79	0,035
3	Barra 3	1,84	34,99	0,628
	Barra 5	0,47	8,99	0,035
4	Barra 4	2,08	39,66	0,545

Nota: Los valores de la tabla son obtenidos a partir de los reportes obtenidos de simulaciones

En la tabla 9 se muestra un resumen de los resultados de las corrientes de cortocircuito, la referencia de aporte al cortocircuito, la potencia del cortocircuito además del tiempo de actuación para el despeje de la falla.

Considerando que las tecnologías utilizadas para la generación con energías renovables no convencionales tienen un elevado costo, además de los inversores, se ha optado por la utilización de relés con curva instantánea.

3.1.6. Resultado de la coordinación de protecciones monofásicas

La figura 55 nos muestra el análisis de la coordinación, se estimó el cortocircuito con mínima corriente de falla en la barra 7, como el aporte de corriente viene directamente del generador sincrónico, existe flujo por parte de los lados de la zona en anillo, así se evaluó obteniendo la siguiente gráfica, en primera instancia operando el relé instantáneo de la barra 6 con vista a la barra 7 y como respaldo opera el relé de la barra 4 con dirección a la barra 6; para el lado izquierdo del anillo, opera el relé de la barra 5, y como respaldos están los relés de las barras 1 y 2; y por el lado derecho del anillo operarían los relés de las barras 3 y 2.

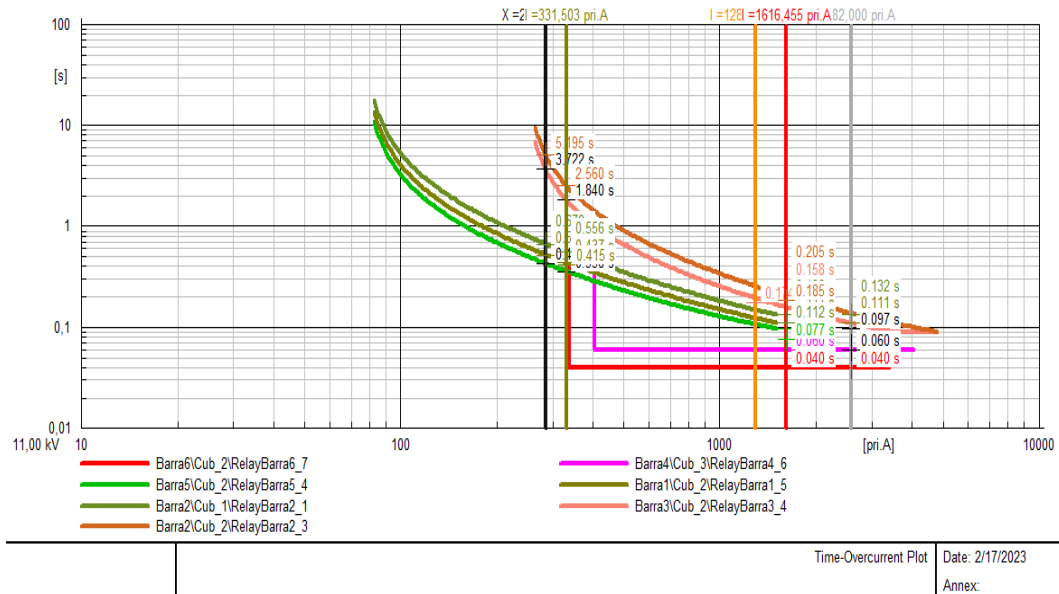


Figura 55 Curvas de protección de la falla en la barra 7

Al efectuar un cortocircuito en la línea de la barra 1 a la 2, la figura 56 muestra una circulación de corriente desde la barra 2 directamente al cortocircuito con un valor de 2,07 KA y otro aporta que rodea todo el anillo con un valor de 507 A, al actuar el relé de la barra 2 abre la línea desde la barra 2 y el aporte va a rodear el anillo con una corriente de 967 A, es ahí que actúa el relé de la barra 1, y quedaría como respaldo los relés de las barras 5, 4, 3 y 2.

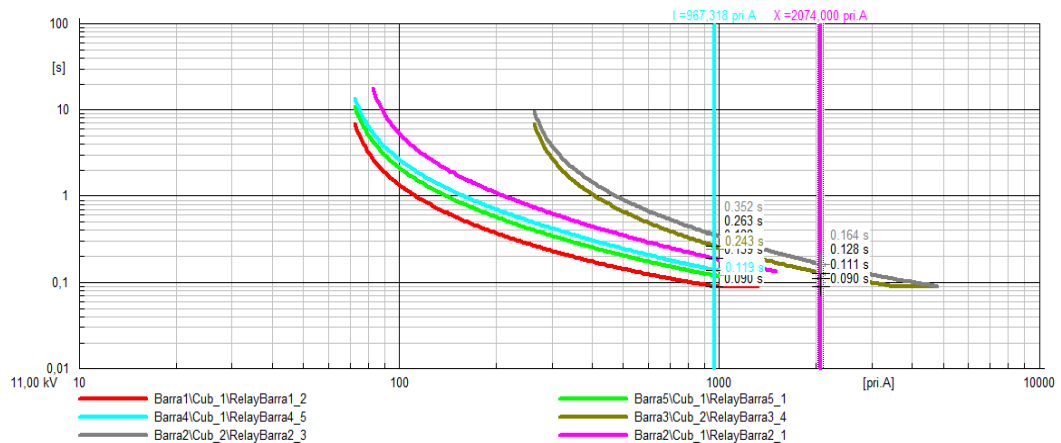


Figura 56 Curvas de protección de la falla en la línea 1-2

La figura 57 nos muestra la curva de operación frente a una falla en la línea 2-3, el relé de la barra 2 censa 2922 A por el lado izquierdo de la falla, abre la línea, y la corriente que circula por el anillo hasta la falla por el lado derecho tiene un valor de 858 A, así queda como relé de apertura, el relé de la barra 3, y de respaldo los relés de las barras 4, 5, 1 y 2.

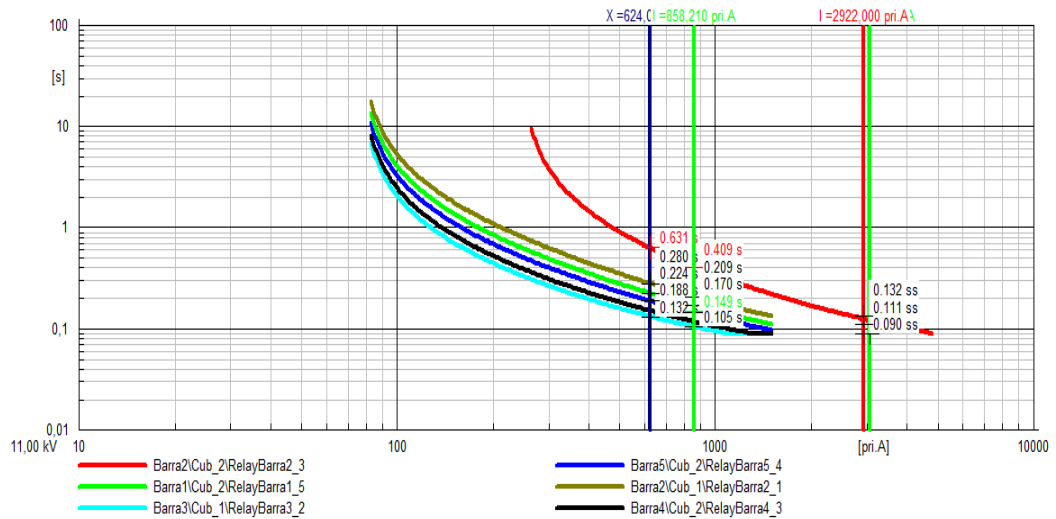


Figura 57 Curvas de protección de la falla en la línea 2-3

3.1.7. Resultado de la simulación dinámica

La importancia que tiene el mantener la frecuencia de la red dentro de una banda tolerable es de mucha importancia, es así que se ha efectuado una simulación dinámica en el dominio del tiempo para determinar la afectación que existe en la frecuencia de la red.

La figura 41 muestra el comportamiento de la frecuencia en las barras de la microrred.

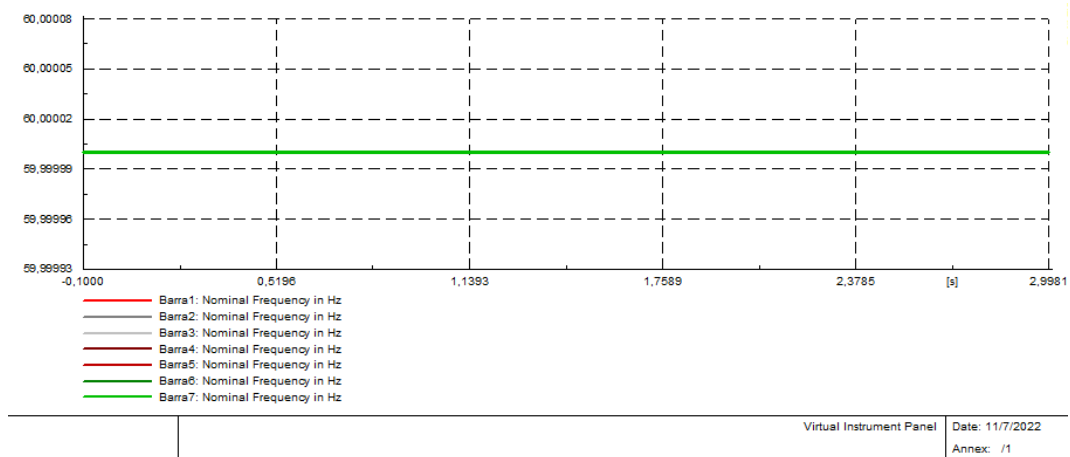


Figura 58 Frecuencia en barras de la microrred.

Es notable que la frecuencia de las barras se mantiene constante a pesar de que existe contingencias, todas las barras mantienen la frecuencia nominal de 60 Hz, por lo que la gráfica nos muestra una sola línea constante que se entiende por la superposición del resto de curvas de las barras que no se puede observar.

3.2. Conclusiones Capítulo III

Se obtuvo los perfiles de voltaje de todas las barras de la microrred con la cual se puede determinar comportamiento de la microrred en estado estacionario, además de la cargabilidad de los elementos.

Las gráficas obtenidas de las curvas de operación de los dispositivos de protección permitieron establecer las magnitudes de corriente y potencia de falla.

La gráfica de la simulación dinámica permitió determinar la afectación de los eventos sobre la estabilidad del sistema de la microrred.

3.3. Conclusiones generales

- Se revisó varios estudios de casos relacionados con microrredes, energía distribuida y fuentes de energía renovables.
- A partir de la revisión bibliográfica de estudios relacionados se obtuvo el caso de estudio en el cual se puede efectuar flujos de carga como también estudio de cortocircuitos.
- Gracias al conocimiento de las características del caso de estudio, se pudo realizar la simulación en el software Power Factory de DigSilent.
- A partir de los reportes de las simulaciones, se determina que el aporte de corriente de falla es proporcionado por el generador sincrónico.
- Para todos los escenarios de operación se desarrolló un estudio de cortocircuito, en el cual se verificó la diferencia en las magnitudes de corriente de cortocircuito de los diferentes escenarios, la cantidad más elevada corresponde a una I_{cc} en la barra del generador sincrónico con 2,68 KA.
- La coordinación de protecciones satisface su objetivo, puesto que el generador sincrónico es el único que aporta a la falla, se protegió la sección radial con dos relés 50, mientras que, en la zona en anillo, se efectuó dos fallas en las líneas próximas al generador considerando el despeje oportuno con sus respectivos respaldos, siendo relés 51.
- El nivel de cortocircuito de las microrredes está muy relacionado con la tecnología del inversor que se utiliza en ellas, ya que se trata de un limitado aporte de corriente.

- La curva obtenida a partir de la simulación dinámica muestra que las contingencias planteadas como los cortocircuitos no perturban la frecuencia de las barras de la microrred.

3.4. Recomendaciones

- El presente proyecto es una contribución adicional a la investigación de la corriente de cortocircuito en microrredes, en este campo se recomienda realizar estudios correspondientes a otro tipo de protecciones que se puedan implementar en el caso de estudio, o a su vez con la posibilidad de extender el trabajo a microrredes más complejas y con diferentes generaciones y escenarios.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS.

- [1] F. G.-T. L. V. Carlos Bordonsa, «Gestión Óptima de la Energía en Microrredes con Generación Renovable, » Sciencedirect, vol. 12, n° 2, pp. 117-132, 2015.
- [2] J. A. B. Eneko Unamuno, «Hybrid ac/dc microgrids-Part I, » ScienceDirect, vol. 52, n° 1, pp. 1251-1259, 2015.
- [3] P. Arboleya et al., “Efficient energy management in smart micro-grids: ZERO grid impact buildings,” IEEE Trans. Smart Grid, vol. 6, no. 2, pp.1055–1063, 2015
- [4] R. H. Lasseter, “MicroGrids,” 2002 IEEE Power Eng. Soc. Winter Meet. Conf. Proc. (Cat. No.02CH37309), vol. 1, pp. 305– 308, 2002.
- [5] S. D. Saldarriaga-Zuluaga, J. M. López-Lezama, y N. Muñoz-Galeano, «Optimal coordination of over-current relays in microgrids considering multiple characteristic curves», Alexandria Engineering Journal, vol. 60, n.o 2, pp. 2093-2113, abr. 2021, doi: 10.1016/j.aej.2020.12.012.
- [6] C. Li, P. Rakhra, P. J. Norman, G. M. Burt, y P. Clarkson, «Multi-Sample Differential Protection Scheme in DC Microgrids», IEEE Journal of Emerging and Selected Topics in Power Electronics, vol. 9, n.o 3, pp. 2560-2573, jun. 2021, doi: 10.1109/JESTPE.2020.3005588.
- [7] W. T. El-Sayed, E. F. El-Saadany, y H. H. Zeineldin, «Interharmonic Differential Relay With a Soft Current Limiter for the Protection of Inverter-Based Islanded Microgrids», IEEE Transactions on Power Delivery, vol. 36, n.o 3, pp. 1349-1359, jun. 2021, doi: 10.1109/TPWRD.2020.3006791.
- [8] S. F. Zarei, H. Mokhtari, y F. Blaabjerg, «Fault Detection and Protection Strategy for Islanded Inverter-Based Microgrids», IEEE Journal of Emerging and Selected Topics in Power Electronics, vol. 9, n.o 1, pp. 472-484, feb. 2021, doi: 10.1109/JESTPE.2019.2962245.

- [9] S. Ordoñez «Propuesta de parametrización de protecciones eléctricas en microrredes mediante análisis de cargas y generación distribuida».
- [10] S. Manson y E. McCullough, «Practical Microgrid Protection Solutions: Promises and Challenges», IEEE Power and Energy Magazine, vol. 19, n.o 3, Art. n.o 3, may 2021, doi: 10.1109/MPE.2021.3057953.
- [11] S. C. Vegunta et al., «AC Microgrid Protection System Design Challenges—A Practical Experience», Energies, vol. 14, n.o 7, Art. n.o 7, ene. 2021, doi: 10.3390/en14072016.
- [12] Asmus, P.; Lauderbaugh, A., Executive Summary : Microgrid Deployment Tracker 4Q12 and Community - Utility Microgrids : Project Tracking and Capacity Growth, 2012. Descargada: 20 Enero 2013.<http://www.navigantresearch.com/wordpress/wp-content/uploads/2012/11/MGDT-4Q12-Executive-Summary.pdf>
- [13] Suryanarayanan, S.; Rietz, S.; Mitra, J.; America, N., A Framework for Energy Management in Customer-Driven Microgrids, Power and Energy Society General Meeting IEEE, 2010, pp. 10–13
- [14] D. P. Kothari y I. J. Nagrath, Sistemas Eléctricos de Potencia, México, D.F.: McGraw-Hill, 2008.
- [15] C. Gallardo, Análisis de Sensitividad en SEP, Quito: Escuela Politécnica Nacional, 2013
- [16] R. Canelos, Diseño de Líneas de transmisión de Alta Tensión, Presentación de una LT, Quito: Escuela Politécnica Nacional, 2014.
- [17] D. P. Kothari y I. J. Nagrath, Sistemas Eléctricos de Potencia, México, D.F.: McGraw-Hill, 2008.
- [18] A. Gómez, J. Martínez, J. Rosendo, E. Romero y J. Riquelme, Sistemas Eléctricos de Potencia Problemas y Ejercicios Resueltos, Madrid: Prentice Hall, 2003.

- [19] J. Lewis Blackburn, Thomas J. Domin, "Protective Relaying: Principles and Applications", 3ra Edición, CRC Press, 2006.
- [20] IEEE Recommended Practice for Grounding of Industrial and Commercial Power Systems, IEEE Std. 142, 1991.
- [21] R. Canelos, Diseño de Líneas de transmisión de Alta Tensión, Presentación de una LT, Quito: Escuela Politécnica Nacional, 2014.
- [22] «Area Tecnología,» [En línea]. Available: https://areatecnologia.com/electricidad/transformador-de-corriente.html#Caracter%C3%ADsticas_de_los_Transformadores_de_Corriente_. [Último acceso: 05 11 2022].
- [23] «UTN,» [En línea]. Available: <http://www.frlp.utn.edu.ar/materias/tydee/modulooii.pdf>. [Último acceso: 07 11 2022].
- [24] ZOPPETTE JUDEZ GAUDENCIO, Transformadores de Medida, Estaciones transformadoras y de Distribución - Editorial Gustavo Gili S.A. Barcelona, España Cuarta Edición.
- [25] Billinton, R., and R. N. Allan, Reliability Analysis of Engineering Systems: Concepts and Techniques, Plenum Press, New York, 1983.
- [26]] IEEE Std-100-1992, IEEE Standard Dictionary of Electrical and Electronics Terms, IEEE, Piscataway, NJ, 1993.
- [27] Anderson, P. M., Analysis of Faulted Power Systems, IEEE Press, Piscataway, NJ, 1992
- [28] M. Holguin y G. David, "ANÁLISIS DE CALIDAD DE ENERGÍA ELÉCTRICA EN EL "NUEVO CAMPUS" DE LA UNIVERSIDAD POLITÉCNICA SALESIANA, Guayaquil: UNIVERSIDAD POLITÉCNICA SALESIANA, 2010.

- [29] Estudio Protección Sistémica ante apertura intempestiva del circuito 2 de L/T Santo Domingo Quevedo 230 kV, CENACE 2011.
- [30] H. Montano, Transformadores de corriente TC, vol. II, Don Bosco, 2011, pp. 3-5.
- [31] H. Montano, Transformadores de corriente TC, vol. II, Don Bosco, 2011, pp. 21-22.
- [32] ARCERNNR, Resolución 002/20, 2020.
- [33] «ENEL Codensa,» 03 04 2018. [En línea]. Available: https://likinormas.micodensa.com/Norma/otros/niveles_tension_conexion_cargas_clientes#heading_8. [Último acceso: 03 01 2023].

Anexo b

		DigSILENT PowerFactory 15.1.7		Project:								
				Date: 1/16/2023								
Fault Locations with Feeders Short-Circuit Calculation / Method : IEC 60909												
			3-Phase Short-Circuit / Max. Short-Circuit Currents									
Asynchronous Motors Always Considered		Grid Identification Automatic		Short-Circuit Duration								
Decaying Aperiodic Component (idc) Using Method B		Conductor Temperature User Defined No		Break Time 0,10 s								
				Fault Clearing Time (Ith) 1,00 s								
				c-Voltage Factor User Defined No								
Grid: Grid		System Stage: Grid		Annex: / 1								
	rtd.V. [kV]	Voltage [kV]	c- [deg]	Factor	sk* [MVA/MVA]	Ik* [kA/kA]	[deg]	ip [kA/kA]	Ib [kA]	Sb [MVA]	Ik [kA]	Ith [kA]
Barra2	11,00	0,00	0,00	1,10	51,03 MVA	2,68 kA	-88,57	6,87 kA	2,00	38,10	2,68	2,73
Lineal_2	Barral				0,00 MVA	0,00 kA	0,00	0,00 kA				
Linea2_3	Barra3				0,00 MVA	0,00 kA	0,00	0,00 kA				
G1					51,03 MVA	2,68 kA	-88,57	6,87 kA				

Anexo c

		DIGSILENT PowerFactory 15.1.7		Project:								
				Date: 1/18/2023								
Fault Locations with Feeders Short-Circuit Calculation / Method : IEC 60909 3-Phase Short-Circuit / Max. Short-Circuit Currents												
Asynchronous Motors Always Considered		Grid Identification Automatic		Short-Circuit Duration								
Decaying Aperiodic Component (idc) Using Method B		Conductor Temperature User Defined No		Break Time 0,10 s								
				Fault Clearing Time (Ith) 1,00 s								
				c-Voltage Factor User Defined No								
Grid: Grid		System Stage: Grid		Annex: / 1								
	rtd.V. [kV]	Voltage [kV]	c- Factor [deg]	Sk* [MVA/MVA]	Ik* [kA/kA] [deg]	ip [kA/kA]	Ib [kA]	Sb [MVA]	Ik [kA]	Ith [kA]		
Barra6	11,00	0,00	0,00	1,10	39,66 MVA	2,08 kA	-76,93	4,30 kA	1,78	33,87	2,08	2,09
Linea4_6	Barra4				39,66 MVA	2,08 kA	103,07	4,30 kA				
Linea6_7	Barra7				0,00 MVA	0,00 kA	0,00	0,00 kA				
PV2					0,00 MVA	0,00 kA	0,00	0,00 kA				

Anexo d

		DigSILENT PowerFactory 15.1.7	Project:
			Date: 1/16/2023

Fault Locations with Feeders			
Short-Circuit Calculation / Method : IEC 60909		3-Phase Short-Circuit / Max. Short-Circuit Currents	
Asynchronous Motors Always Considered	Grid Identification Automatic	Short-Circuit Duration	
Decaying Aperiodic Component (idc) Using Method B	Conductor Temperature User Defined No	Break Time	0,10 s
		Fault Clearing Time (Ith)	1,00 s
		c-Voltage Factor User Defined	No

Grid: Grid	System Stage: Grid								Annex:	/ 1		
	rtd.V. [kV]	Voltage [kV]	c- [deg]	Factor	sk* [MVA/MVA]	ik* [kA/kA]	[deg]	ip [kA/kA]	Ib [kA]	Sb [MVA]	Ik [kA]	Ith [kA]
Barra5	11,00	0,00	0,00	1,10	41,80 MVA	2,19 kA	-77,01	4,53 kA	1,83	34,94	2,19	2,21
Lineal_5	Barral				14,12 MVA	0,74 kA	108,84	1,53 kA				
Linea5_4	Barra4				27,79 MVA	1,46 kA	100,03	3,01 kA				
Generador eolic					0,00 MVA	0,00 kA	0,00	0,00 kA				

