

**EVALUACIÓN DE LA OPERACIÓN EN ISLA DE SISTEMAS ELÉCTRICOS
DE POTENCIA MEDIANTE TEORÍA DE GRAFOS**

**UNIVERSIDAD POLITÉCNICA SALESIANA
SEDE QUITO**

**CARRERA:
INGENIERÍA ELÉCTRICA**

**Trabajo de titulación previo a la obtención del título de
INGENIERO ELÉCTRICO**

**TEMA:
EVALUACIÓN DE LA OPERACIÓN EN ISLA DE SISTEMAS ELÉCTRICOS
DE POTENCIA MEDIANTE TEORÍA DE GRAFOS**

**AUTOR:
ERICK MARCELO HERRERA GARCÉS**

**DIRECTOR:
ALEX DAVID VALENZUELA SANTILLÁN**

Quito, Febrero 2020

DEDICATORIA

Dedico este proyecto de titulación en primer lugar a Dios, por bendecir cada uno de mis pasos, mostrándome el camino correcto para culminar una etapa más, a mi madre Irene, quien ha sido mi guía, amiga y confidente en todo momento y por siempre brindarme su amor y apoyo incondicional.

A mi padre Marcelo por haberme dado su ejemplo de vida, como profesional y ser humano.

A mi hermano Frank por siempre estar presente en los malos y buenos momentos que la vida nos ha puesto.

AGRADECIMIENTO

Agradezco a Dios por haberme dado la fuerza para cumplir cada uno de mis objetivos y ser la persona que hoy en día soy, a mis padres por siempre darme su bendición y apoyo para lograr concluir mis estudios a lo largo de mi vida.

A mi tutor Alex Valenzuela por su tiempo y completo apoyo en el desarrollo de este proyecto.

A la comunidad educativa de la Universidad Politécnica Salesiana por haberme formado con buenos valores, enseñanzas, y conocimiento.

Erick Marcelo Herrera Garcés

**EVALUACIÓN DE LA OPERACIÓN EN ISLA DE SISTEMAS ELÉCTRICOS
DE POTENCIA MEDIANTE TEORÍA DE GRAFOS**

Universidad Politécnica Salesiana, Quito – Ecuador 2020

Ingeniería Eléctrica

Breve reseña histórica e información de contacto.



Erick Marcelo Herrera Garcés (Y'1994 – M'12). Realizó sus estudios secundarios en el Colegio Técnico Experimental Salesiano Don Bosco en Quito, se graduó de Bachiller Técnico Industrial en Electricidad y Electrónica. Egresado de la carrera de Ingeniería Eléctrica en la Universidad Politécnica Salesiana. Su proyecto de investigación se basa en la evaluación de la operación en isla de sistemas eléctricos de potencia mediante teoría de grafos.
eherrerag@est.ups.edu.ec

Dirigido por:



Alex David Valenzuela Santillán (Y'1989 – M'12). Realizó sus estudios superiores en la Escuela Politécnica Nacional de Quito, donde se graduó de Ingeniero Eléctrico en diciembre 2013, Además realizó estudios de maestría en Newcastle University en el Reino Unido, donde obtuvo el título en Power Distribution Engineering MSc. Actualmente es profesor ocasional tiempo completo de la Universidad Politécnica Salesiana.
avalenzuela@ups.edu.com

Todos los derechos reservados:

Queda prohibida, salvo excepción prevista en la ley, cualquier forma de reproducción, distribución, comunicación pública y transformación de esta obra para fines comerciales, sin contar con la autorización de los titulares de propiedad intelectual. La infracción de los derechos mencionados puede ser constitutiva de delito contra la propiedad intelectual. Se permite la libre difusión de este texto con fines académicos o investigativos por cualquier medio, con la debida notificación a los autores.

DERECHOS RESERVADOS

©2020 Universidad Politécnica Salesiana

QUITO - ECUADOR

DECLARATORIA DE COAUTORÍA DEL DOCENTE TUTOR

Yo, Alex David Valenzuela Santillán declaro que bajo mi dirección y asesoría fue desarrollado el trabajo de titulación “Evaluación de la operación en isla de sistemas eléctricos de potencia mediante teoría de grafos” realizado por Erick Marcelo Herrera Garcés, obteniendo un producto que cumple con todos los requisitos estipulados por la Universidad Politécnica Salesiana para ser considerados como trabajo final de titulación.

Quito D.M., Febrero de 2020



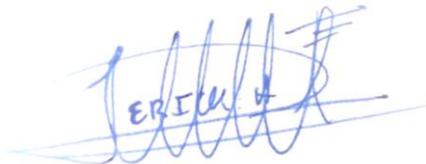
.....
Alex David Valenzuela Santillán
C.C.: 1721848644

CESIÓN DE DERECHOS DE AUTOR

Yo, Erick Marcelo Herrera Garcés, con documento de identificación N° 1725707424, manifiesto mi voluntad y cedo a la Universidad Politécnica Salesiana la titularidad sobre los derechos patrimoniales en virtud de que soy autor del trabajo de grado/titulación intitulado: “EVALUACIÓN DE LA OPERACIÓN EN ISLA DE SISTEMAS ELÉCTRICOS DE POTENCIA MEDIANTE TEORÍA DE GRAFOS”, mismo que ha sido desarrollado para optar por el título de: Ingeniero Eléctrico, en la Universidad Politécnica Salesiana, quedando la Universidad facultada para ejercer plenamente los derechos cedidos anteriormente.

En aplicación a lo determinado en la Ley de Propiedad Intelectual, en mi condición de autor me reservo los derechos morales de la obra antes citada. En concordancia, suscribo este documento en el momento que hago entrega del trabajo final en formato digital a la Biblioteca de la Universidad Politécnica Salesiana.

Quito, D.M., Febrero de 2020



.....

Erick Marcelo Herrera Garcés

C.C.: 1725707424

ÍNDICE GENERAL

Resumen.....	1
Abstract.....	1
1. Introducción	2
2. Marco Teórico.....	2
2.1. Causas Islas	2
2.1.1. Origen Eléctrico	3
2.1.2. Origen Mecánico.....	4
2.1.3. Falsas Maniobras.....	4
2.2. Tipos de consumidores.....	4
2.2.1. Grandes y medios consumidores.....	4
2.2.2. Pequeños consumidores	5
2.3. Esquema de alivio de carga.....	5
2.3.1. Esquema de alivio de carga por baja frecuencia.	5
2.3.2. Esquema de alivio de carga por bajo voltaje.....	5
2.4. Redespacho ante fallos en la red	6
3. Modelo matemático	6
3.1. Balance de energía en un sistema eléctrico.....	6
3.1.1. Disponibilidad de generación.....	6
3.1.2. Variación en la demanda.....	7
3.2. Teoría de grafos.....	7
3.2.1. Representación de grafos	7
3.2.2. BFS (Breadth First Search)	7
4. Aplicación de modelo matemático	9
4.1. Sistemas planteados para la evaluación de la operación en isla.....	9
4.1.1. Sistema IEEE 39 barras.....	9
4.1.2. Sistema IEEE 118 barras.....	10
4.1. Modelo para el análisis de islas.....	11
5. Análisis de resultados	12
5.1. Caso de estudio 1	13
5.2. Caso de estudio 2	14
5.3. Caso de estudio 3	16
6. Conclusiones.....	18

6.1. Trabajos Futuros	19
7. Referencias	19
7.1. Matriz del estado del arte	21
7.2. Resumen de indicadores.....	24

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Circuito Unifilar señalando la localización de cada tipo de consumidor.	4
Figura 2. Límites de operación de un generador.....	6
Figura 3. Ejemplo de grafo.....	8
Figura 4. Sistema IEEE 39 barras [28].....	9
Figura 5. Sistema IEEE 118 barras	11
Figura 6. Caso de estudio 1	13
Figura 7. Caso de estudio 2.....	14
Figura 8. Caso de estudio 3	17
Figura 9. Resumen e indicador de la temática – Estado del arte.....	24
Figura 10. Indicador de formulación del problema – Estado del arte	24
Figura 11. Indicador de solución – Estado de arte	25

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Esquema de alivio de carga por baja frecuencia.....	5
Tabla 2. Lista de Vecinos.....	8
Tabla 3. Proceso para aplicar el algoritmo BFS.....	8
Tabla 4. Datos de cargas del sistema de 39 Barras	10
Tabla 5. Datos de generadores del sistema de 39 Barras	10
Tabla 6. Datos de cargas del sistema de 118 Barras	10
Tabla 7. Datos de generadores del sistema de 118 Barras	11
Tabla 8. Elementos fuera de servicio en el caso 1.	13
Tabla 9. Características de generación presente en la isla 1 - caso 1	13
Tabla 10. Características de cargas presente en la isla 1 - caso 1	13
Tabla 11. Características de cada carga presente en la isla 1 después de la primera iteración. (Caso 1)	14
Tabla 12. Características de cada generador presente en la isla 1 después de la primera iteración (Caso 1)	14
Tabla 13. Características de generación presente en la isla 2 - caso 1	14
Tabla 14. Características de cargas presente en la isla 2 - caso 1	14

Tabla 15. Elementos fuera de servicio en el caso 2.	14
Tabla 16. Características de generación presente en la isla 1 - caso 2.....	15
Tabla 17. Características de cargas presente en la isla 1 - caso 2	15
Tabla 18. Características de cada carga presente en la isla 1 después de la séptima iteración. (Caso 2)	15
Tabla 19. Características de cada generador presente en la isla 1 después de la séptima iteración (Caso 2)	15
Tabla 20. Características de generación presente en la isla 2 - caso 2.....	15
Tabla 21. Características de cargas presente en la isla 2 - caso 2	15
Tabla 22. Características de cada carga presente en la isla 2 después de la cuarta iteración. (Caso 2)	15
Tabla 23. Características de cada generador presente en la isla 2 después de la cuarta iteración (Caso 2)	15
Tabla 24. Características de generación presente en la isla 3 - caso 2.....	15
Tabla 25. Características de cargas presentes en la isla 3 - caso 2.....	16
Tabla 26. Características de generación presente en la isla 4 - caso 2.....	16
Tabla 27. Características de cargas presentes en la isla 4 - caso 2.....	16
Tabla 28. Características de generación presente en la isla 5 - caso 2.....	16
Tabla 29. Características de cargas presentes en la isla 5 - caso 2.....	16
Tabla 30. Elementos fuera de servicio en el caso 3.	16
Tabla 31. Características de generación presente en la isla 1 - caso 3.....	16
Tabla 32. Características de cargas presente en la isla 1 - caso 3	16
Tabla 33. Características de generación presente en la isla 2 - caso 3.....	18
Tabla 34. Características de cargas presente en la isla 2 - caso 3	18
Tabla 35. Características de generación presente en la isla 3 - caso 3.....	18
Tabla 36. Características de cargas presente en la isla 3 - caso 3	18
Tabla 37. Características de cada generador presente en la isla 3 después de la segunda iteración Caso 3.....	18
Tabla 38. Características de cada carga presente en la isla 3 después de la segunda iteración Caso 3.....	18
Tabla 39. Matriz de estado del arte	21

EVALUACIÓN DE LA OPERACIÓN EN ISLA DE SISTEMAS ELÉCTRICOS DE POTENCIA MEDIANTE TEORÍA DE GRAFOS

Resumen

El presente artículo trata sobre el análisis de islas que se generan en un sistema eléctrico de potencia, debido a fallas que puedan existir en el mismo. Se utilizará la teoría de grafos a través de un algoritmo de búsqueda BFS (Breadth-first Search) con el objetivo de hallar la cantidad de zonas aisladas, mediante el recorrido de todo el circuito, siendo que algunos tramos serán radiales y en su mayoría mallados, debido a que su dificultad de análisis se acerca más a la realidad respecto a las redes de energía eléctrica que existen en la actualidad. Posterior al análisis del número de islas registradas, se procederá a definir las características de cada una y de esta manera considerar si cada una de ellas puede operar o no, tomando en cuenta los límites de operación de un generador sincrónico, como es la potencia activa respectivamente y mantener el equilibrio entre generación y demanda. Se realizará el intercambio de datos entre Digsilent PowerFactory y Matlab, los cuales van a definir los parámetros y variables más importantes para resolver los casos presentados en los modelos de 39 y 118 barras de la IEEE.

Palabras Clave: Operación en isla, Teoría de grafos, Generador sincrónico, Demanda, topología.

Abstract

This article deals with the analysis of islands that are generated in an electrical power system, due to faults that may exist in it. Graph theory will be used through a BFS (Breadth First Search) search algorithm in order to find the number of isolated areas, through the route of the entire circuit, with some sections being radial and mostly meshed, because their difficulty of analysis is closer to reality respect to the electric power networks that currently exist. Following the analysis of the number of registered islands, the characteristics of each island will be defined and thus consider whether each island can operate or not, taking into account the operating limits of a synchronous generator, as is the active power respectively and maintain the balance between generation and demand. The data exchange will be carried out between Digsilent Powerfactory and Matlab, which will define the most important parameters and variables to resolve the cases presented in the 39 and 118 bar models of the IEEE.

Keywords: Island operation, Graph theory, Synchronous generator, Demand, topology.

1. Introducción

El fallo en las redes eléctricas durante mucho tiempo ha sido una problemática, tanto para los usuarios como para las empresas encargadas de distribuir, transmitir y generar energía, ya que existen diversos escenarios a los cuales deben enfrentarse y realizar una correcta operación para solventar un problema en específico [1], [2]. Los sistemas eléctricos de potencia pueden verse afectados por distintas circunstancias, las cuales son provocadas por el fallo de elementos inmersos en la red, en este tipo de eventos puede darse el surgimiento de islas, las cuales se definen como dos o más grupos de sistemas eléctricos que se encuentran separados entre sí, posterior a la identificación de las mismas, se procede a aplicar un esquema de alivio de carga en función de la priorización de cargas [3].

La teoría de grafos es una herramienta muy eficiente al momento de analizar redes eléctricas, más aún cuando se trata de manejar datos georreferenciados [4], como por ejemplo en la planificación de sistemas de distribución [5], transmisión y generación de energía, en la cual se consideran usuarios, generadores, y elementos que se encargan de transmitir electricidad. Para la búsqueda de islas existen varios procesos y algoritmos que pueden resolver este problema [6]. Un sistema aislado puede ser un gran inconveniente para los operadores y más aún cuando estos se encuentran débilmente conectados, arriesgando la seguridad de este, principalmente cuando se trata de realizar un redespacho económico, así como también lograr abastecer de energía eléctrica a la mayor cantidad de usuarios. [7]. En la

actualidad el cálculo de tiempo para poder abrir o cerrar las debidas protecciones después de ocurrir una falla, debe ser realizado inmediatamente después de analizar la situación actual del sistema y seguir una serie de pasos para aislar zonas defectuosas y poder operar ciertas islas, con la finalidad de restaurar el sistema a condiciones normales [8]. Este cálculo de tiempos va ligado directamente a la coordinación de protecciones de sobrecorriente, de esta manera se puede evitar el colapso total del sistema eléctrico [9]. La coordinación de protecciones es importante tanto en redes de distribución como en la transmisión de energía. Al considerar el redespacho de generadores después de un evento, se tiene mayor énfasis en el sistema de transmisión, ya que al existir perturbaciones se puede producir la desconexión de ciudades completas, donde es fundamental considerar una coordinación automática de protecciones de distancia, ya que alguna falla puede cambiar totalmente la topología del sistema [10].

El siguiente proyecto de investigación tiene como propósito detectar la cantidad de islas generadas mediante teoría de grafos específicamente por medio del algoritmo BFS (Breadth-first Search) [11] y de este modo verificar si cada una de estas pueden operar o no, tomando en cuenta ciertas restricciones que se definirán a lo largo del estudio.

2. Marco Teórico

2.1. Causas Islas

Existe una gran variedad de causas por las cuales se puede producir el fallo, por lo cual es fundamental tenerlas presentes,

principalmente con el objetivo de analizar la probabilidad de falla en tramos específicos [12], puesto que pueden ser las zonas más vulnerables, de esta forma se podrán realizar y ejecutar las adecuaciones correspondientes con el fin de evitar el colapso del sistema eléctrico. Generalmente estas fallas se dan a raíz de un cortocircuito, a partir del cual se derivan dos tipos [13], cortocircuitos por contacto directo y cortocircuitos por ruptura de aislamiento. Se puede dar un cortocircuito por contacto dependiendo de cómo ocurra el evento, este puede ser ocasionado por varios tipos de fallas las cuales se detallan a continuación.

- Cortocircuito trifásico: Tres fases hacen contacto mutuamente.
- Cortocircuito bifásico - tierra: Dos fases hacen contacto mutuamente con tierra.
- Cortocircuito línea – tierra: Una fase hace contacto a tierra.
- Cortocircuito trifásico – tierra: Tres fases hacen contacto mutuamente a tierra.

Por otro lado, un cortocircuito por ruptura de aislamiento es causado debido a un mal diseño o en su efecto, a el fin de la vida útil del elemento.

Un cortocircuito puede tener varias causas [13], las cuales se pueden derivar en:

2.1.1. Origen Eléctrico

Este tipo de falla es producida debido a los aislantes que se encuentran instalados en un elemento, ya sea en torres de transmisión o líneas de transmisión puesto que dichos aislantes no son capaces de soportar la sobretensión, y en ciertos casos podrían no haber sido

diseñados con ese fin, esto suele darse debido a corrientes excesivas o al mal diseño lo cual produce el deterioro y en el peor de los casos la destrucción del aislante. Las causas que pueden originar una falla de origen eléctrico pueden ser:

Origen Atmosférico

Las descargas atmosféricas son producidas debido a la interacción entre partículas negativas y positivas. Estas pueden caer directamente en líneas de transmisión, las mismas que suelen estar protegidas por un apantallamiento, el cual reduce la probabilidad de impacto directo de un rayo en cualquier parte del circuito o estructura. Este tipo de eventos provoca que se activen las protecciones respectivas, para evitar que esta energía excesiva se inyecte al sistema, sin embargo tiende a fragmentar la red dejando sin servicio a los usuarios que pertenecen a un circuito específico [14].

Sobretensiones por maniobra

Cuando existen maniobras principalmente de interruptores para realizar conexiones, desconexiones o pasar de un estado de interruptores de abierto a cerrados, pueden existir sobretensiones por maniobra. Cuando un interruptor normalmente cerrado opera, la energía pasa fácilmente cumpliendo los límites de corriente a la cual está sujeto el mismo, pero cuando cambian a un estado abierto estando energizado, pueden ocasionar sobretensiones, las cuales producen un aumento de voltajes. Algunos ejemplos de operaciones por maniobra son las siguientes [15].

- Energización de líneas.
- Energización de líneas con carga residual.
- Energización de una línea por el lado de la fuente.

- Energización de una línea la cual termina en un transformador en vacío.
- Rechazo de carga al final de la línea.
- Rechazo de carga al final de la línea seguido de una apertura en la misma.
- Interrupción de una línea en vacío
- Desconexión de un transformador en vacío.
- Desconexión de transformadores con reactores conectado en el devanado terciario.
- Desconexión de reactores.

2.1.2. Origen Mecánico

Las fallas de origen mecánico existen debido a la partición de conductores, cables que hagan contacto directo con objetos ajenos a la red, líneas aéreas que se crucen a causa de vientos fuertes o rotura de cables subterráneos [13].

2.1.3. Falsas Maniobras

Este tipo de fallo puede ser causado por la apertura de seccionadores o por la acción de elementos cuando no se necesita que intervengan, ya que estos pueden estar bajo carga y producir arcos eléctricos los cuales pueden extenderse e impactar contra otros elementos o aún peor alcanzar a personas que se encuentren cerca del lugar [13]. Cuando un sistema eléctrico de potencia se encuentra operando en condiciones normales donde la generación es suficiente para abastecer la demanda, corresponderá a situarse en una operación de régimen permanente. Al ocurrir alguna falla de cualquier tipo como las mencionadas anteriormente, conlleva a que existan eventos transitorios, que en consecuencia darán

paso a que se generen sobrevoltajes o sobrecorrientes que ayudará a que existan oscilaciones en máquinas sincrónicas. La duración de estos transitorios dependerá del tipo de falla que ocurra, y una vez detectada se procederá a actuar con las protecciones correspondientes [16].

2.2. Tipos de consumidores

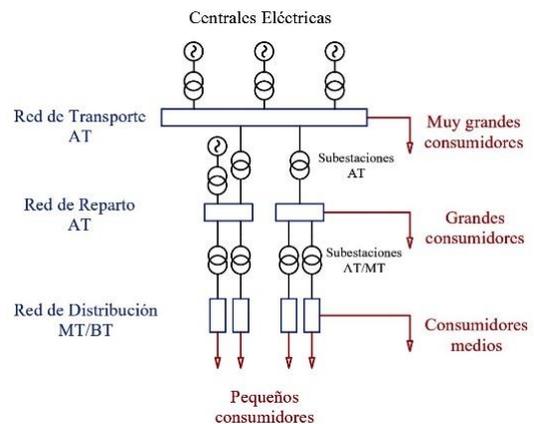


Figura 1. Circuito Unifilar señalando la localización de cada tipo de consumidor.

2.2.1. Grandes y medios consumidores

Existe la necesidad de clasificar a los consumidores, puesto que la economía va creciendo al igual que la cantidad de potencia que se consume dependiendo de cada usuario. Grandes y medianos consumidores son aquellos que poseen acuerdos con generadores o a su vez, con empresas distribuidoras, como por ejemplo grandes fábricas, siderúrgicas, acerías, cementeras, industrias metalúrgicas, estaciones de bombeo de agua, entre otros [17]. Es importante señalar que estas empresas al tener un acuerdo directo con un generador o distribuidor, el abastecimiento de energía debe ser constante, puesto que, la falta de esta puede ocasionar la paralización de

toda la producción de una fábrica, y como consecuencia una gran pérdida.

2.2.2. *Pequeños consumidores*

Serán residencias y empresas a nivel comercial, siendo suministrados por medio de empresas distribuidoras [18].

2.3. Esquema de alivio de carga

Un esquema de alivio de carga se aplica cuando existen desbalances entre generación y demanda. El objetivo principal de estos esquemas es lograr que el sistema cumpla con los requerimientos de calidad y seguridad que cada sistema define, en este caso de estudio, el alivio de carga se basará en mantener el balance generación – carga, más no analizar conceptos referentes a estabilidad y contingencias. Sin embargo, se lo tomará en consideración, ya que cada esquema viene definido por pasos, donde cada caso especifica un porcentaje de carga el cual debe ser desconectado. Un esquema de alivio de carga puede clasificarse según su frecuencia y voltaje.

2.3.1. *Esquema de alivio de carga por baja frecuencia.*

La demanda siempre será constante en escenarios normales, de los cuales el 100% de usuarios están abastecidos con energía, cumpliendo todos los límites de operación de elementos que lo componen. Cuando existen fallas, planeamientos de despacho de energía erróneos, o falsas maniobras es necesario recurrir a este tipo de esquema ya que es necesario reducir la demanda en función de la cantidad de potencia que el sistema pueda inyectar.

Se conoce que una baja frecuencia es producida por un incremento no

planeado de la demanda, o a su vez la reducción de energía generada, dando como resultado que la demanda sea mayor en comparación con la generación. Esto producirá que la red eléctrica pierda sincronismo, es decir que la frecuencia de rotación de los generadores sea menor a la establecida como, por ejemplo, 60Hz para la mayor parte de países en América. Un esquema de alivio de carga viene definido por pasos, hasta que el sistema pueda entrar en sincronismo. Esto debe ser tomado en cuenta por todos los distribuidores y grandes consumidores [16].

Tabla 1. Esquema de alivio de carga por baja frecuencia

Paso	Frecuencia (Hz)	Tiempo de actuación (Ciclos)	Desconexión de carga (%)	Desconexión acumulada de carga (%)
1	59.20	11	8	8
2	59.00	11	8	16
3	58.80	11	7	23
4	58.60	11	7	30
5	58.40	11	7	37
6	58.20	11	6	43
7	58.00	11	7	50

En la Tabla 1 se muestra un ejemplo de esquema de alivio de carga el cual es realizado a partir de consideraciones técnicas dentro de lo que es despacho y operación. En este caso viene dado por 7 pasos donde se realiza la desconexión de cargas, tomando en cuenta que la frecuencia por ejemplo, 60Hz no debe ser inferior a 57.5 Hz para poder proteger a unidades térmicas y así alargar la vida útil de este tipo de central de generación de energía [19].

2.3.2. *Esquema de alivio de carga por bajo voltaje*

Cuando existen desbalances de potencia muy grandes en un sistema y este siga dentro del mismo sin quedar aislado, se puede ver afectado el voltaje, aún más que la frecuencia, en estos casos también

se requiere la desconexión de cargas para poder cumplir los límites de voltaje en el elemento que se necesite mantener dentro de un rango en específico. En este caso el esquema de alivio de carga no analiza el tipo de fallo, ya que la intervención de las protecciones para liberar cargas se realiza automáticamente, dependiendo de los rangos de nivel de voltaje en el cual se debe mantener en una barra específica [20].

2.4. Redespacho ante fallos en la red

Una contingencia se define como un acontecimiento que puede darse o no, o a su vez un evento que sucede de manera imprevista. Al existir un suceso de este tipo dentro del sistema eléctrico es necesario realizar un redespacho tomando en cuenta las condiciones en las que se encuentra el mismo [19], como por ejemplo la topología del sistema, la cantidad de potencia que se pueda inyectar, la capacidad del sistema para transportar electricidad a zonas específicas, entre otras. Sin embargo, cada una de estas dependerán mucho de la capacidad del elemento para actuar y estar dentro de sus límites de operación.

3. Modelo matemático

3.1. Balance de energía en un sistema eléctrico

Para poder asegurar la calidad, seguridad y confiabilidad de un sistema eléctrico es necesario mantenerlo dentro de un régimen permanente, teniendo una misma frecuencia de referencia en todas las máquinas rotativas y un voltaje que esté dentro de su tolerancia, tanto en condiciones normales como en

situaciones de emergencia [21]. Una de las restricciones más importantes que se debe considerar en cualquier sistema se detalla en la ecuación 1 respectivamente [22].

$$\sum_{i=1}^n P_{Gi} = \sum_{j=1}^m P_{Cj} + \sum P_L \quad (1)$$

Donde:

$\sum_{i=1}^n P_{Gi}$: Sumatoria de potencia activa generada desde $i=1$ hasta n generadores.

$\sum_{j=1}^m P_{Cj}$: Sumatoria de potencia activa consumida desde $j=1$ hasta n cargas.

$\sum P_L$: Sumatoria de pérdidas técnicas dentro de la red.

La ecuación señala que la sumatoria de la energía generada en el sistema debe ser igual a la sumatoria de cargas instaladas más las pérdidas que existan dentro del circuito. Después de una falla se debe realizar un control tanto en la frecuencia como el voltaje, para poder regresar a un régimen permanente.

3.1.1. Disponibilidad de generación

Antes de realizar un nuevo planeamiento para el redespacho, es necesario verificar la disponibilidad de unidades para aportar con energía, y considerar los límites de operación correspondiente a la Figura 2, para este estudio se tomará en cuenta la cantidad de potencia activa que puede generar cada máquina, la cual se detalla en la ecuación 2 [23].

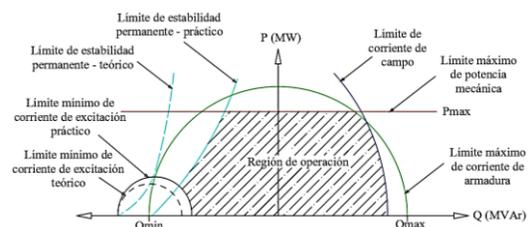


Figura 2. Límites de operación de un generador

$$|P_{gen}^{min}| \leq |P_{gen}| \leq |P_{gen}^{max}| \quad (2)$$

3.1.2. Variación en la demanda

La variación de la demanda prevista puede cambiar, ya sea que existan nuevas cargas importantes conectadas, o a su vez, la reducción de demanda debido a desconexiones en la red provocadas por fallas.

3.2. Teoría de grafos

En la actualidad la teoría de grafos es utilizada en muchas áreas de la ingeniería y la ciencia como por ejemplo en la administración de empresas, informática, electricidad, matemática aplicada, computación, sistemas, entre otras, ya que, gracias a diferentes algoritmos y rutinas, se pueden solucionar muchas complicaciones para poder cumplir un objetivo en específico.

Un grafo estará formado por vértices y aristas [24], estas son las características más importantes con las que se definen inicialmente para que posteriormente, estas puedan ser utilizadas en algoritmos y resolver problemas. Estos vértices y aristas se los representa mediante conjuntos, los cuales se definen a continuación:

$$G = (V, E) \quad (3)$$

$$V(G) = \{V_1, V_2, \dots, V_n\} \quad (4)$$

$$E(G) = \{e_1, e_2, \dots, e_n\} \quad (5)$$

Donde:

G : Título asignado para definir el gráfico en general.

$V(G)$: Conjunto finito de vértices en G .

$E(G)$: Conjunto de pares de vértices (aristas)

3.2.1. Representación de grafos

a. Matriz de adyacencia

La conexión entre dos vértices puede ser representada mediante la matriz de adyacencia [25], que se la puede manifestar de la siguiente manera:

$$D = (a_{ij})_{n \times n} \quad (6)$$

Donde:

D : Matriz de adyacencia.

a_{ij} : Conexiones entre vértices V_i y V_j .

$n \times n$: Orden de la matriz, definiéndose por concepto como matriz cuadrada.

Es importante señalar que, si existe conexión entre todos los vértices, la matriz D será simétrica, es decir todos los elementos de la diagonal ($i = j$) serán 1. En el caso de que alguno de los vértices no se conecte a otro, su valor equivalente en la matriz será 0.

b. Lista de vértices vecinos

Cada vértice tendrá uno o más vecinos a los cuales está conectado, y estos deben ser registrados en una lista para que posteriormente puedan ser utilizados en cualquier algoritmo.

3.2.2. BFS (Breadth First Search)

El algoritmo BFS [26], es aquel que se encarga de recorrer cada uno de los vértices por medio de las aristas, este proceso necesitará la siguiente estructura de datos:

Encolar (queue) será aquella donde el primer elemento en entrar será el primero en salir, sus tres operaciones básicas son:

- Colocar (Enqueue) ubica un elemento en la parte final de la cola.
- Primero (first) saca el primer elemento de la cola, pero no la mueve.
- Sacar (Dequeue) elimina el primer elemento de la cola.

Algoritmo 1: BFS (Breadth First Search)

While la cola tenga elementos

First sacamos el primer elemento de la cola llamado v1

For cada elemento z adyacente a v1

If z no ha sido visitado:
 agregar z como visitado

Enqueue elemento z

Dequeue el primer elemento el primer elemento de la cola llamado v1 para pasar al siguiente elemento de la cola.

Un ejemplo en donde se puede aplicar todos estos conceptos de teoría de grafos se muestra en la Figura 3.

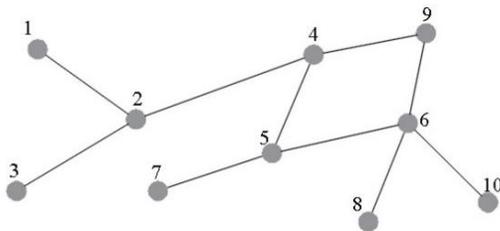


Figura 3. Ejemplo de grafo

El mismo que consta de 10 vértices y 10 aristas, las cuales se representan en el vector V y G, estos pueden ser obtenidos como:

$$V(G) = \{1,2,3,4,5,6,7,8,9,10\} \quad (7)$$

$$E(G) = \left\{ \begin{array}{l} (1,2), (2,3), \\ (2,4), (4,9), \\ (4,5), (9,6), \\ (7,5), (5,6), \\ (6,8), (6,10) \end{array} \right\} \quad (8)$$

A partir de la figura se puede obtener la siguiente matriz de adyacencia:

$$D = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 1 & 1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 1 & 1 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 1 & 0 & 1 & 1 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 1 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (9)$$

Una vez construida la matriz de adyacencia se puede realizar una lista con todos los vértices y sus vecinos que se detallan en la Tabla 2.

Tabla 2. Lista de Vecinos

Vértice	Vecinos
1	2
2	1,3,4
3	2
4	2,5,9
5	4,6,7
6	8,9,10
7	5
8	6
9	4,6
10	6

Donde se puede aplicar el algoritmo BFS [27]. En la Tabla 3 se puede apreciar el proceso mediante el cual se detalla el recorrido de este, cuando se tiene como nodo inicial el vértice “1”.

Tabla 3. Proceso para aplicar el algoritmo BFS

Evento	Nodo Actual	Cola	Nodos no visitados	Nodos visitados
Nodo inicial: “1”		1	2,3,4,5,6,7,8,9,10	1
Descolar nodo “1”	1	-	2,3,4,5,6,7,8,9,10	1

Encolar elementos conectados a 1	1	2	3,4,5,6,7,8,9,10	1,2
Descolar 2 y agregar elementos conectados a 2	2	3,4	5,6,7,8,9,10	1,2,3,4
Descolar 3 y agregar elementos conectados a 3	3	4	5,6,7,8,9,10	1,2,3,4
Descolar 4 y agregar elementos conectados a 4	4	5,9	6,7,8,10	1,2,3,4,5,9
Descolar 5 y agregar elementos conectados a 5	5	6,7	8,10	1,2,3,4,5,6,7,9
Descolar 6 y agregar elementos conectados a 6	6	7,8,10	-	1,2,3,4,5,6,7,8,9,10
Descolar 7 y agregar elementos conectados a 7	7	8,10	-	1,2,3,4,5,6,7,8,9,10
Descolar 8 y agregar elementos conectados a 8	8	10	-	1,2,3,4,5,6,7,8,9,10
Descolar 10 y agregar elementos conectados a 10	10	-	-	1,2,3,4,5,6,7,8,9,10

4. Aplicación de modelo matemático

Las fallas y eventos imprevistos dentro de una red, provocadas por las causas mencionadas, se pueden resolver enfocándose en asegurar el servicio eléctrico, sin comprometer la seguridad y la calidad de este. A partir de una matriz de adyacencia se podrá observar cuales elementos están conectados a cada vértice considerado como otro elemento, para después utilizar esta matriz y poder detectar la cantidad de islas por medio del algoritmo BFS.

Finalmente se detectará las características de potencia activa generada y consumida para luego buscar soluciones y mantener a la mayor parte de usuarios con energía eléctrica,

aplicando un redespacho y alivio de carga para mantener al sistema en un estado aceptable. Los modelos a los cuales se recurrirá para efectuar este análisis son los sistemas de 39 y 118 barras de la IEEE.

Para resolver los flujos de potencia se utilizará el software DIgSILENT PowerFactory a más de añadir programación mediante comandos DPL (DIgSILENT Programming Language), para luego enviar esta información a Matlab y realizar la cantidad de iteraciones necesarias, hasta que el algoritmo pueda ser completado.

4.1. Sistemas planteados para la evaluación de la operación en isla.

4.1.1. Sistema IEEE 39 barras

El sistema que se muestra en la Figura 4 es el modelo que se utilizará en el caso 1 y 2, donde se tiene un total de 39 barras, 19 cargas, 10 generadores, 34 líneas de transmisión y 12 transformadores. Los datos, a considerarse para nuestro estudio se muestran en las Tablas 4 y 5.

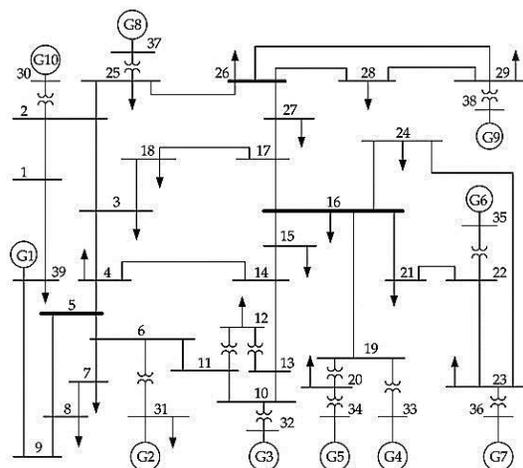


Figura 4. Sistema IEEE 39 barras [28]

Tabla 4. Datos de cargas del sistema de 39 Barras

Carga	P (MW)	Tipo
Load 03	350	Comercial
Load 04	400	Industrial
Load 07	233.8	Comercial
Load 08	522	Industrial
Load 12	100	Residencial
Load 15	320	Industrial
Load 16	300	Industrial
Load 18	158	Residencial
Load 20	628	Residencial
Load 21	100	Residencial
Load 23	247.5	Comercial
Load 24	308.6	Industrial
Load 25	224	Comercial
Load 26	139	Residencial
Load 27	281	Comercial
Load 28	206	Comercial
Load 29	283.5	Residencial
Load 31	100	Residencial
Load 39	1104	Industrial

Tabla 5. Datos de generadores del sistema de 39 Barras

Generador	Pmin (MW)	Pmax (MW)
G 01	0	8500
G 02	150	595
G 03	50	680
G 04	200	680
G 05	70	510
G 06	200	680
G 07	150	595
G 08	150	595
G 09	250	850
G10	0	850

4.1.2. Sistema IEEE 118 barras

La Figura 5 [29], pertenece a un sistema de 118 barras donde se tiene un total de 91 cargas, 19 máquinas sincrónicas, 186 líneas de transmisión y 28 transformadores. Los datos de cada generador a considerarse se especifican en las Tablas 6 y 7.

Tabla 6. Datos de cargas del sistema de 118 Barras

Carga	P (MW)	Tipo
Load 1	51	Comercial
Load 2	20	Residencial
Load 3	39	Residencial
Load 4	30	Residencial
Load 6	52	Comercial
Load 7	19	Residencial
Load 11	70	Comercial
Load 12	47	Comercial
Load 13	34	Residencial
Load 14	14	Residencial

Load 15	90	Industrial
Load 16	25	Residencial
Load 17	11	Residencial
Load 18	60	Comercial
Load 19	45	Comercial
Load 20	18	Residencial
Load 21	14	Residencial
Load 22	10	Residencial
Load 23	7	Residencial
Load 27	62	Comercial
Load 28	17	Residencial
Load 29	24	Residencial
Load 31	43	Comercial
Load 32	59	Comercial
Load 33	23	Residencial
Load 34	59	Comercial
Load 35	33	Residencial
Load 36	31	Residencial
Load 39	27	Residencial
Load 40	20	Residencial
Load 41	37	Residencial
Load 42	37	Residencial
Load 43	18	Residencial
Load 44	16	Residencial
Load 45	53	Comercial
Load 46	28	Residencial
Load 47	34	Residencial
Load 48	20	Residencial
Load 49	87	Industrial
Load 50	17	Residencial
Load 51	17	Residencial
Load 52	18	Residencial
Load 53	23	Residencial
Load 54	113	Industrial
Load 55	63	Comercial
Load 56	84	Industrial
Load 57	12	Residencial
Load 58	12	Residencial
Load 59	277	Industrial
Load 60	78	Industrial
Load 62	77	Industrial
Load 66	39	Residencial
Load 67	28	Residencial
Load 70	66	Comercial
Load 74	68	Comercial
Load 75	47	Comercial
Load 76	68	Comercial
Load 77	61	Comercial
Load 78	71	Comercial
Load 79	39	Residencial
Load 80	130	Industrial
Load 82	54	Comercial
Load 83	20	Residencial
Load 84	11	Residencial
Load 85	24	Residencial
Load 86	21	Residencial
Load 88	48	Comercial
Load 90	78	Industrial
Load 92	65	Comercial
Load 93	12	Residencial
Load 94	30	Residencial
Load 95	42	Comercial
Load 96	38	Residencial
Load 97	15	Residencial
Load 98	34	Residencial
Load 100	37	Residencial
Load 101	22	Residencial
Load 102	5	Residencial
Load 103	23	Residencial
Load 104	38	Residencial

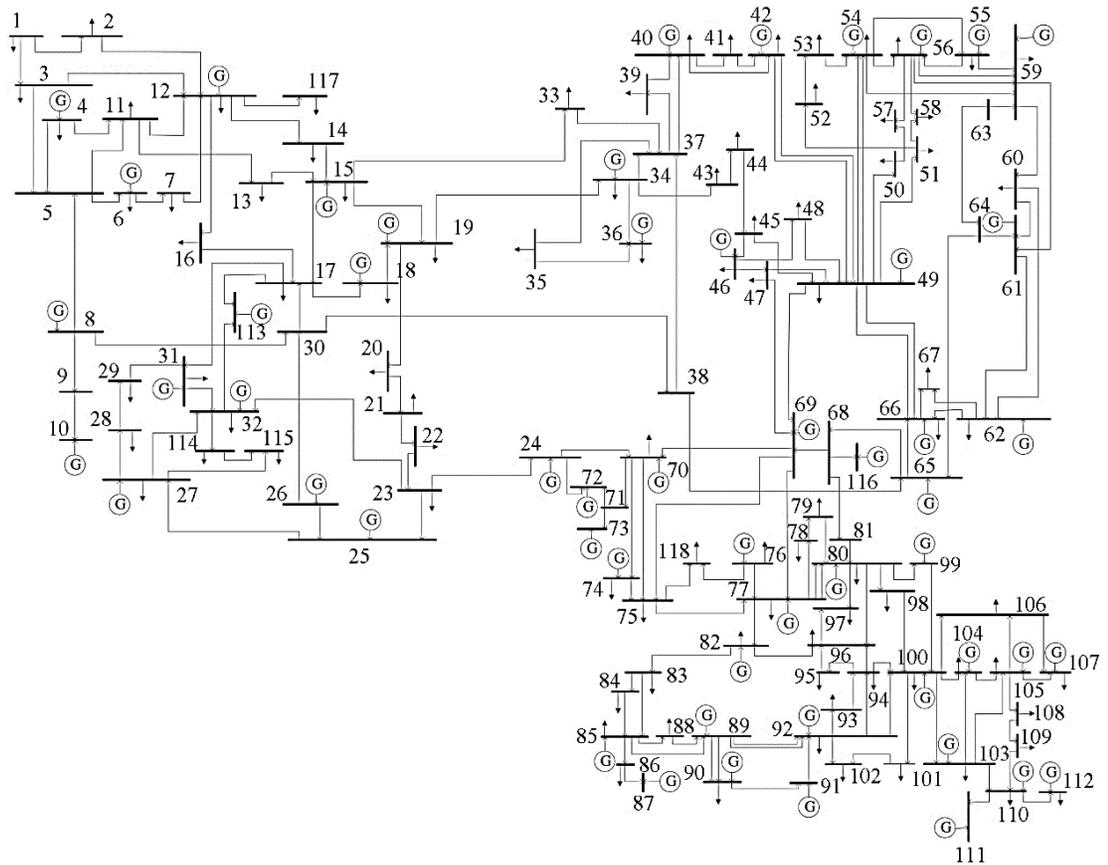


Figura 5. Sistema IEEE 118 barras

Load 105	31	Residencial
Load 106	43	Comercial
Load 107	28	Residencial
Load 108	2	Residencial
Load 109	8	Residencial
Load 110	39	Residencial
Load 112	25	Residencial
Load 114	8	Residencial
Load 115	22	Residencial
Load 117	20	Residencial
Load 118	33	Residencial

Gen 80	0	577	Máquina sincrónica
Gen 87	0	104	Máquina sincrónica
Gen 89	0	707	Máquina sincrónica
Gen 100	0	352	Máquina sincrónica
Gen 103	0	200	Máquina sincrónica
Gen 111	0	136	Máquina sincrónica

4.1. Modelo para el análisis de islas

La aplicación del algoritmo que se utiliza en [22] será de gran importancia para hallar la cantidad de islas que existen dentro de un sistema, a este se le ha agregado otros procesos los cuales sirven para identificar los elementos conectados y fuera de servicio, mantener el equilibrio entre demanda y generación además de estar dentro de los límites de operación de generadores, para después aplicar un alivio de carga en caso de ser necesario.

Tabla 7. Datos de generadores del sistema de 118 Barras

Generador	Pmin (MW)	Pmax (MW)	Tipo
Gen 10	0	550	Máquina sincrónica
Gen 12	0	185	Máquina sincrónica
Gen 25	0	320	Máquina sincrónica
Gen 26	0	414	Máquina sincrónica
Gen 31	0	107	Máquina sincrónica
Gen 46	0	60	Máquina sincrónica
Gen 49	0	304	Máquina sincrónica
Gen 54	0	148	Máquina sincrónica
Gen 59	0	255	Máquina sincrónica
Gen 61	0	260	Máquina sincrónica
Gen 65	0	491	Máquina sincrónica
Gen 66	0	492	Máquina sincrónica
Gen 69	0	805	Máquina sincrónica

Algoritmo 2: Evaluación de la operación en isla de sistemas eléctricos de potencia mediante teoría de grafos.

Paso 1: Ingreso de datos: Potencias consumida por cada carga y definición de tipo de carga (Residencial, Comercial, Residencial).

Paso 2: Construcción de matriz de adyacencia. Analizar qué elementos están conectados al elemento actual.

$$D = (a_{ij})_{n \times n}$$

Para i diferentes a j de la matriz de adyacencia.

If elemento está conectado a otro ingresar $(i,j) = 1$
Else $(i,j) = 0$

Para $i = j$

If elemento está energizado agregar como 1 a la diagonal de la matriz de adyacencia.
Else elemento desenergizado agregar como 0 a diagonal de la matriz de adyacencia.

Paso 3: Aplicación de método BFS a partir de matriz de adyacencia.

While la cola tenga elementos

First sacamos el primer elemento aleatorio de partida llamado $v1$.

For cada elemento z adyacente a $v1$

If z no ha sido visitado:
agregar z a vector de elementos visitados

Enqueue elemento z

Dequeue el primer elemento el primer elemento de la cola llamado $v1$ para pasar al siguiente elemento de la cola.

Paso 4: Construcción de matriz - islas.

Filas: Cantidad de islas.

Columnas: Elementos que pertenecen a cada isla.

If método BFS detecta fin de seguimiento de elementos conectados,
Verificar si existen elementos no visitados, si encuentra alguno, será considerado como una nueva isla.

Else

Fin de búsqueda de islas.

End

Paso 5: Transferencia de datos relevantes para el caso de estudio a Matlab.

Datos:

- Potencia activa despachada por cada generador.

- Límites de operación de cada generador
- Potencia activa solicitada por cada carga – consumidor.
- Matriz – Islas

Paso 6: Recepción de datos relevantes en Matlab.

Paso 7: Cálculo de cantidad de islas generadas.

For desde 1 hasta N de filas de la matriz islas.

For desde 1 hasta número de elementos existentes en la red

If Elemento es detectado como generador agregar como tal a N isla y sumar su potencia, a potencia total generada en la isla.

If Elemento es detectado como carga agregar como tal a N isla y sumar su potencia, a la potencia total consumida en la isla.

If Carga es de tipo Residencial

Sumar potencia a la carga total consumida del mismo tipo.

If Carga es de tipo Comercial

Sumar potencia a la carga total consumida del mismo tipo

If Carga es de tipo Industrial

Sumar potencia a la carga total consumida del mismo tipo

End

If $\sum_{i=1}^n P_{Gi} \geq \sum_{j=1}^m P_{Cj}$ and

$$|P_{gen}^{min}| \leq |P_{gen}| \leq |P_{gen}^{max}|$$

La isla N puede operar

Else

Esquema de alivio de carga de un 8 % de la demanda actual consumida en la isla N .

Liberar 2 % de cargas residenciales

Liberar 3 % de cargas residenciales

Liberar 3 % de cargas residenciales

End

End

Paso 8: Transferencias de información a DIGSILENT PowerFactory de nueva potencia consumida (MW) en cada carga sea residencial, comercial o industrial.

GO to Paso 1

Paso 9:

If Todas las islas registradas pueden operar.

END Algoritmo finalizado

5. Análisis de resultados

Se realizará el análisis de 3 casos de estudio, los dos primeros se enfocarán en el sistema de 39 barras de la IEEE, realizando diferentes desconexiones de

elementos, para variar el número de islas que se detectarán. Al igual que en el sistema de 118 barras de la IEEE, se tomará como vértice a cada elemento existente en el sistema, principalmente, barras, líneas de transmisión, transformadores, generadores y cargas.

5.1. Caso de estudio 1

Como primer caso se analizará el sistema de 39 barras, donde los elementos que van a desconectarse para poder sectorizar zonas son los siguientes.

Tabla 8. Elementos fuera de servicio en el caso 1.

Elemento
Line 25 - 26
Line 26 - 27

Después de que los elementos indicados en la tabla estén fuera de servicio, el comportamiento de sistema cambiará, sectorizando zonas y dando nuevas características a cada sistema, tanto de generación disponible como cargas que deben ser suministradas con servicio eléctrico. Al correr el programa tenemos como resultado que existen dos islas representadas en la Figura 6, donde cada isla está compuesta por una cantidad de generadores y cargas.

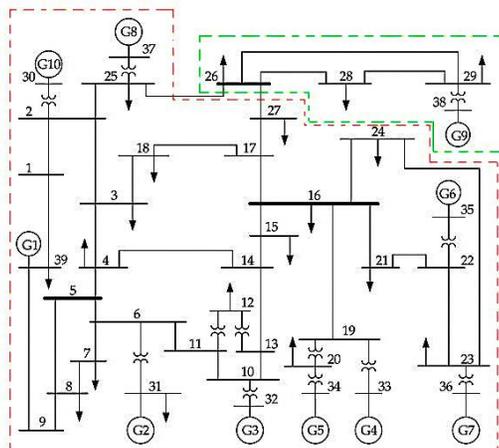


Figura 6. Caso de estudio 1

Al realizar la primera iteración se puede apreciar las características de cada isla, de esta manera se podrá saber si la isla puede operar o no.

a. Isla 1

Tabla 9. Características de generación presente en la isla 1 - caso 1

Generador	Pmin (MW)	Pmax (MW)	P (MW)
G 01	0	8500	1000
G 02	150	595	625.95
G 03	50	680	650
G 04	200	680	632
G 05	140	510	508
G 06	200	680	650
G 07	150	595	560
G 08	150	595	540
G10	0	850	250
<i>P(MW) Total Despachada:</i>			5415.95

Tabla 10. Características de cargas presente en la isla 1 - caso 1

Carga	Consumo Inicial (MW)
Load 23	247.50
Load 27	281.00
Load 25	224.00
Load 18	158.00
Load 03	350.00
Load 04	400.00
Load 39	1104.00
Load 07	233.80
Load 08	522.00
Load 31	100.00
Load 12	100.00
Load 20	628.00
Load 21	100.00
Load 16	300.00
Load 24	308.60
Load 15	320.00
<i>Demanda Total (MW):</i>	
5376.9	

Observando la Tabla 9, la potencia despachada por el generador 2 sobrepasa los límites de potencia activa, por lo tanto, se requiere realizar un alivio de carga, reduciendo la potencia requerida por cada tipo de consumidor que se detalla en la Tabla 11, donde constan la nueva carga que se conectará al sistema, para luego comprobar si el problema se ha solucionado y así la isla 1 pueda operar.

Tabla 11. Características de cada carga presente en la isla 1 después de la primera iteración. (Caso 1)

Carga	Consumo Inicial (MW)	Nueva Carga (MW)
Load 23	247.5	240.075
Load 27	281	272.57
Load 25	224	217.28
Load 18	158	154.84
Load 03	350	339.5
Load 04	400	388
Load 39	1104	1070.88
Load 07	233.8	226.78
Load 08	522	506.34
Load 31	100	98
Load 12	100	98
Load 20	628	615.44
Load 21	100	98
Load 16	300	291
Load 24	308.6	299.3
Load 15	320	310.4
Demanda Total (MW):	5226.45	

Todas las cargas que pertenecen a la isla 1 se han liberado potencia activa en función del tipo de consumidor que sea, siendo un 2 % Residencial, 3 % Industrial y 3 % Comercial. Con esta nueva potencia consumida se corre de nuevo el programa para verificar si la isla puede operar después de haber liberado el 8 % de carga total.

Tabla 12. Características de cada generador presente en la isla 1 después de la primera iteración (Caso 1)

Generador	Pmin (MW)	Pmax (MW)	P (MW)
G 01	0	8500	1000
G 02	150	595	476.08
G 03	50	680	650
G 04	200	680	632
G 05	140	510	508
G 06	200	680	650
G 07	150	595	560
G 08	150	595	540
G10	0	850	250
P(MW) Total Despachada:	5266.08		

Después de la primera iteración se ha logrado dejar en funcionamiento la isla 1 la cual no estaba operando correctamente.

a. Isla 2

Tabla 13. Características de generación presente en la isla 2 - caso 1

Generador	Pmin (MW)	Pmax (MW)	P (MW)
G09	250	850	633.11
P(MW) Total Despachada:	633.11		

Tabla 14. Características de cargas presente en la isla 2 - caso 1

Carga	Consumo Inicial (MW)
Load 29	283.5
Load 28	206
Load 26	139
Demanda Total (MW):	628.5

La isla 2 cumple con las restricciones indicadas en las ecuaciones 1 y 2, por lo tanto, esta puede operar.

5.2. Caso de estudio 2

El caso dos utilizará el mismo sistema de 39 barras, donde los elementos a dejar fuera de servicio son:

Tabla 15. Elementos fuera de servicio en el caso 2.

Elemento
Line 04 - 05
Line 06 - 11
Line 13 - 14
Line 25 - 26
Line 17 - 18
Line 26 - 27
Line 03 - 04

Después de aplicar el algoritmo se han registrado 5 islas representadas en la Figura 7.

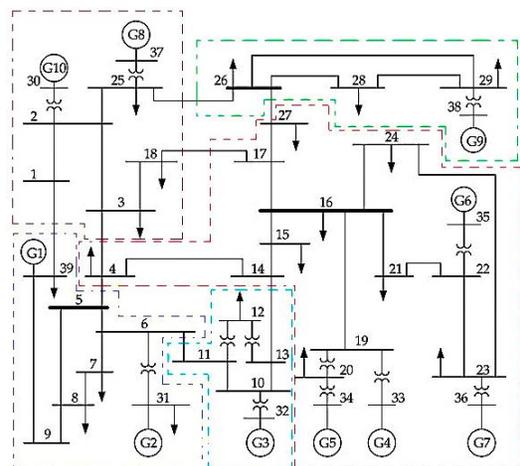


Figura 7. Caso de estudio 2

a. Isla 1

Tabla 16. Características de generación presente en la isla 1 - caso 2

Generador	Pmin (MW)	Pmax (MW)	P (MW)
G 01	0	8500	1000
G 02	150	595	963.87
<i>P(MW) Total Despachada:</i>			<i>1963.87</i>

Tabla 17. Características de cargas presente en la isla 1 - caso 2

Carga	Consumo Inicial (MW)	
Load 39	1104.00	
Load 07	233.80	
Load 08	522.00	
Load 31	100.00	
<i>Demanda Total (MW):</i>		<i>1959.8</i>

La Tabla 16 indica que el generador 2 sobrepasa sus límites de potencia activa. Por lo tanto, requiere alivio de carga en la isla 1. Para poder lograr que opere la isla, han sido necesarias siete iteraciones. Donde los resultados finales asignados a las cargas son los que se especifican en la Tabla 18.

Tabla 18. Características de cada carga presente en la isla 1 después de la séptima iteración. (Caso 2)

Carga	Consumo Inicial (MW)	Nueva Carga (MW)
Load 39	1104.00	892.01
Load 07	233.80	188.90
Load 08	522.00	421.77
Load 31	100.00	86.81
<i>Demanda Total (MW):</i>		<i>1589.5</i>

Tabla 19. Características de cada generador presente en la isla 1 después de la séptima iteración (Caso 2)

Generador	Pmin (MW)	Pmax (MW)	P (MW)
G 01	0	8500	1000
G 02	150	595	591.13
<i>P(MW) Total Despachada:</i>			<i>1591.13</i>

b. Isla 2

Tabla 20. Características de generación presente en la isla 2 - caso 2

Generador	Pmin (MW)	Pmax (MW)	P (MW)
G 04	200	680	916.79
G 05	140	510	508
G 06	200	680	650
G 07	150	595	560
<i>P(MW) Total Despachada:</i>			<i>2634.78</i>

Tabla 21. Características de cargas presente en la isla 2 - caso 2

Carga	Consumo Inicial (MW)	
Load 23	247.50	
Load 27	281.00	
Load 04	400.00	
Load 20	628.00	
Load 21	100.00	
Load 16	300.00	
Load 24	308.60	
Load 15	320.00	
<i>Demanda Total (MW):</i>		<i>2585.1</i>

Según la Tabla 20, el generador 4 sobrepasa sus límites de potencia activa. Por lo tanto, requiere alivio de carga. Para poder lograr que opere la isla 2 han sido necesarias, cuatro iteraciones.

Los resultados finales asignados a las cargas son los que se especifican en la tabla.

Tabla 22. Características de cada carga presente en la isla 2 después de la cuarta iteración. (Caso 2)

Carga	Consumo Inicial (MW)	Nueva Carga (MW)
Load 23	247.50	219.11
Load 27	281.00	248.77
Load 04	400.00	354.12
Load 20	628.00	579.25
Load 21	100.00	92.24
Load 16	300.00	265.59
Load 24	308.60	273.20
Load 15	320.00	283.29
<i>Demanda Total (MW):</i>		<i>2315.56</i>

Tabla 23. Características de cada generador presente en la isla 2 después de la cuarta iteración (Caso 2)

Generador	Pmin (MW)	Pmax (MW)	P (MW)
G 04	200	680	633.42
G 05	140	510	508
G 06	200	680	650
G 07	150	595	560
<i>P(MW) Total Despachada:</i>			<i>2634.78</i>

c. Isla 3

Tabla 24. Características de generación presente en la isla 3 - caso 2

Generador	Pmin (MW)	Pmax (MW)	P (MW)
G 03	50	680	100.17
<i>P(MW) Total Despachada:</i>			<i>100.17</i>

Tabla 25. Características de cargas presentes en la isla 3 - caso 2

Carga	Consumo Inicial (MW)
Load 12	100.00
<i>Demanda Total (MW):</i>	<i>100</i>

La isla 3 cumple con las restricciones indicadas en las ecuaciones 1 y 2, por lo tanto, esta puede operar.

d. Isla 4

Tabla 26. Características de generación presente en la isla 4 - caso 2

Generador	Pmin (MW)	Pmax (MW)	P (MW)
G 08	150	595	540
G10	0	850	204.34
<i>P(MW) Total Despachada:</i>	<i>744.34290</i>		

Tabla 27. Características de cargas presentes en la isla 4 - caso 2

Carga	Consumo Inicial (MW)
Load 25	224.00
Load 18	158.00
Load 03	350.00
<i>Demanda Total (MW):</i>	<i>732</i>

La isla 4 cumple con las restricciones indicadas en las ecuaciones 1 y 2, por lo tanto, esta puede operar.

e. Isla 5

Tabla 28. Características de generación presente en la isla 5 - caso 2

Generador	Pmin (MW)	Pmax (MW)	P (MW)
G 09	250	850	633.11
<i>P(MW) Total Despachada:</i>	<i>633.11</i>		

Tabla 29. Características de cargas presentes en la isla 5 - caso 2

Carga	Consumo Inicial (MW)
Load 29	283.5
Load 28	206
Load 26	139
<i>Demanda Total (MW):</i>	<i>628.5</i>

La isla 5 cumple con las restricciones indicadas en las ecuaciones 1 y 2, por lo tanto, esta puede operar.

5.3. Caso de estudio 3

El caso tres utiliza el sistema de 118 barras, donde los elementos a dejar fuera de servicio son los indicados en la Tabla 30, y después de aplicar el algoritmo se puede localizar 3 islas representadas en la Figura 8.

Tabla 30. Elementos fuera de servicio en el caso 3.

Elemento
Line 19 - 34
Line 23 - 24
Line 30 - 38
Line 33 - 37
Line 45 - 56
Line 46 - 48
Line 47 - 49

a. Isla 1

Tabla 31. Características de generación presente en la isla 1 - caso 3

Generador	Pmin (MW)	Pmax (MW)	P (MW)
Gen 49	0	304	204
Gen 54	0	148	48
Gen 59	0	255	155
Gen 61	0	260	160
Gen 65	0	491	391
Gen 66	0	492	392
Gen 69	0	805	525
Gen 80	0	577	477
Gen 87	0	104	4
Gen 89	0	707	607
Gen 100	0	352	252
Gen 103	0	200	40
Gen 111	0	136	36
<i>P(MW) Total Despachada:</i>	<i>3291.59</i>		

Tabla 32. Características de cargas presente en la isla 1 - caso 3

Carga	P (MW)
Load 34	59
Load 35	33
Load 36	31
Load 39	27
Load 40	20
Load 41	37
Load 42	37
Load 43	18
Load 44	16
Load 45	53
Load 48	20
Load 49	87
Load 50	17
Load 51	17
Load 52	18
Load 53	23

Load 54	113
Load 55	63
Load 56	84
Load 57	12
Load 58	12
Load 59	277
Load 60	78
Load 62	77
Load 66	39
Load 67	28
Load 70	66
Load 74	68
Load 75	47
Load 76	68
Load 77	61
Load 78	71
Load 79	39
Load 80	130
Load 82	54
Load 83	20
Load 84	11
Load 85	24
Load 86	21
Load 88	48
Load 90	78
Load 92	65
Load 93	12

Load 94	30
Load 95	42
Load 96	38
Load 97	15
Load 98	34
Load 100	37
Load 101	22
Load 102	5
Load 103	23
Load 104	38
Load 105	31
Load 106	43
Load 107	28
Load 108	2
Load 109	8
Load 110	39
Load 112	25
Load 118	33

Demanda Total (MW): **2672**

La isla 1 cumple con las restricciones indicadas en las ecuaciones 1 y 2, por lo tanto, esta puede operar.

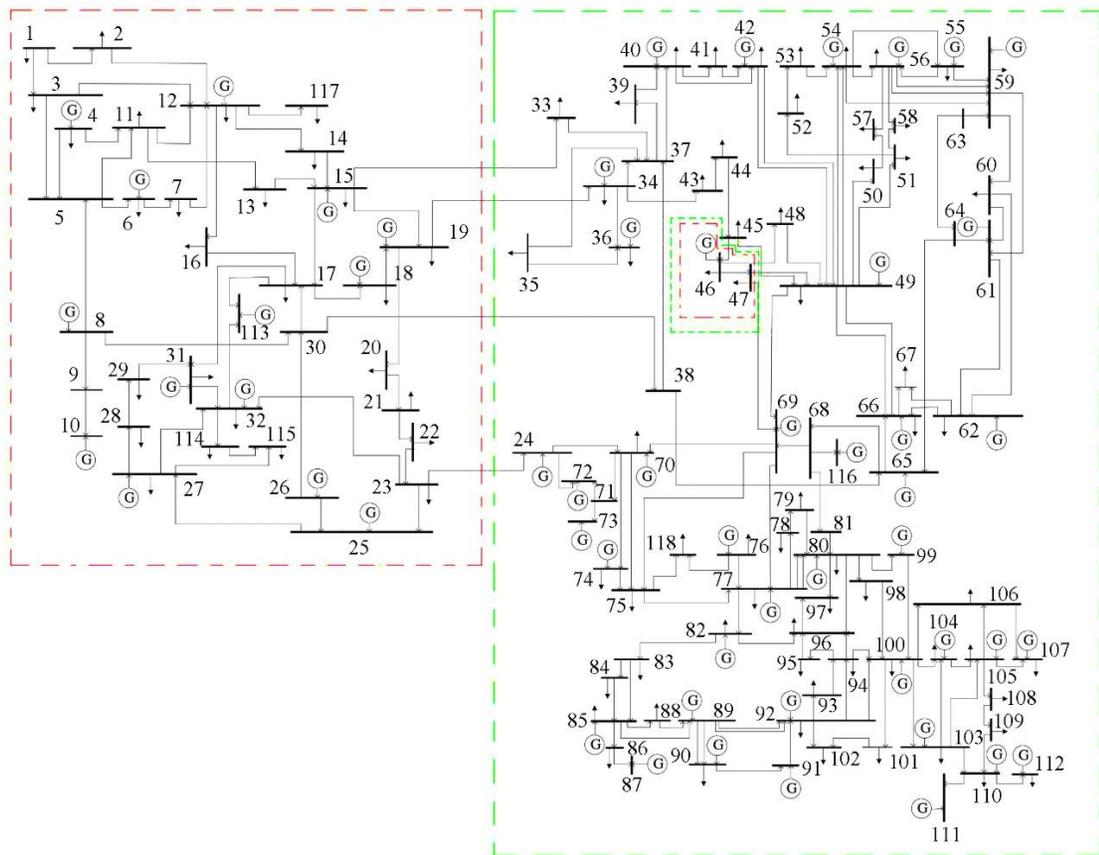


Figura 8. Caso de estudio 3

a. Isla 2

Tabla 33. Características de generación presente en la isla 2 - caso 3

Generador	Pmin (MW)	Pmax (MW)	P (MW)
Gen 10	0	550	397.4
Gen 12	0	185	85
Gen 25	0	320	220
Gen 26	0	414	314
Gen 31	0	107	7
<i>P(MW) Total Despachada:</i>			1023.4

Tabla 34. Características de cargas presente en la isla 2 - caso 3

Carga	P (MW)	
Load 1	51	
Load 2	20	
Load 3	39	
Load 4	30	
Load 6	52	
Load 7	19	
Load 11	70	
Load 12	47	
Load 13	34	
Load 14	14	
Load 15	90	
Load 16	25	
Load 17	11	
Load 18	60	
Load 19	45	
Load 20	18	
Load 21	14	
Load 22	10	
Load 23	7	
Load 27	62	
Load 28	17	
Load 29	24	
Load 31	43	
Load 32	59	
Load 33	23	
Load 114	8	
Load 115	22	
Load 117	20	
<i>Demanda Total (MW):</i>		934

La isla 2 cumple con las restricciones indicadas en las ecuaciones 1 y 2, por lo tanto, esta puede operar.

b. Isla 3

Tabla 35. Características de generación presente en la isla 3 - caso 3

Generador	Pmin (MW)	Pmax (MW)	P (MW)
G 46	0	60	62.45
<i>P(MW) Total Despachada:</i>			62.45

Tabla 36. Características de cargas presente en la isla 3 - caso 3

Carga	Consumo Inicial (MW)	
Load 46	28	
Load 47	34	
<i>Demanda Total (MW):</i>		62

Después de dos iteraciones la isla puede operar, teniendo como resultado final los datos de cargas y el generador 46.

Tabla 37. Características de cada generador presente en la isla 3 después de la segunda iteración Caso 3

Generador	Pmin (MW)	Pmax (MW)	P (MW)
G 46	0	60	59.8
<i>P(MW) Total Despachada:</i>			59.8

Tabla 38. Características de cada carga presente en la isla 3 después de la segunda iteración Caso 3

Carga	Consumo Inicial (MW)	Nueva Carga (MW)
Load 46	28	26.9
Load 47	34	32.66
<i>Demanda Total (MW):</i>		59.56

6. Conclusiones

El artículo de investigación presentado utiliza la teoría de grafos, específicamente el algoritmo BFS (Breadth-first Search), para poder hallar el número de islas que se generan después de que exista una falla. Los tramos más importantes de la red serán aquellos que unen uno o más sistemas como por ejemplo la unión de varios elementos y su conexión a la misma barra, o en su defecto cuando la topología de ciertas zonas es de tipo radial. Se ha tomado en cuenta 3 diferentes casos, y la necesidad de hallar la cantidad de islas que quedan después de darse alguna falla o maniobra es muy importante, ya que este dato puede ser utilizado en procesos automáticos y posteriormente liberar carga de acuerdo con las características de cada isla. Este estudio de islas ha sido

enfocado principalmente a la capacidad de potencia que puede o no despachar un generador, más no de características de estabilidad y contingencias. El procedimiento que se realiza para poder cumplir los límites de despacho de potencia activa y el equilibrio entre demanda y generación, en consecuencia, mantendrá al sistema estable. Un esquema de alivio de carga debe considerar qué tipo de usuario es, ya sea residencial, comercial, o industrial, cuidando los porcentajes de carga que se liberan ya que algunos elementos son importantes para la red, o tienen acuerdos directos con los generadores.

6.1 Trabajos Futuros

Los logros obtenidos en este documento pueden ser tomados como punto de partida para investigaciones como:

- Evaluación de la operación en isla de sistemas eléctricos de potencia mediante teoría de grafos, considerando la estabilidad del sistema.
- Evaluación de la operación en isla de sistemas eléctricos de potencia mediante teoría de grafos, frente a cortocircuitos en tiempo real.

7. Referencias

- [1] A. Bedoya, J. Mora, and S. Perez, "Estrategia de reducción para la aplicación generalizada de localización de fallas en sistemas de distribución de energía eléctrica," pp. 2–15, 2012.
- [2] J. Hernandez, G. Idárraga, and R. Valencia, "Algoritmos para localización de fallas en líneas de transmisión, análisis para el caso colombiano," 2004.
- [3] G. Leiva and A. Valenzuela, "Esquema de alivio de carga por subfrecuencia ocasionado por desastres naturales basado en segmentación óptima de cargas," 2019.
- [4] A. Valenzuela, E. Inga, and S. Simani, "Planning of a resilient underground distribution network using georeferenced data," pp. 1–19, 2019.
- [5] A. Valenzuela, I. Montalvo, and E. Inga, "A decision-making tool for electric distribution network planning based on heuristics and georeferenced data," 2019.
- [6] T. Amraee and H. Saberi, "Controlled islanding using transmission switching and load shedding for enhancing power grid resilience," *Int. J. Electr. Power Energy Syst.*, vol. 91, pp. 135–143, 2017.
- [7] N. Hatzargyriou *et al.*, "Energy management and control of island power systems with increased penetration from renewable sources," pp. 335–339, 2002.
- [8] A. Botero and M. Rios, "Procedure of fault management in distribution networks with distributed generation," 2013.
- [9] S. Caviedes and A. Valenzuela, "Coordinación automática de protecciones de sobrecorriente para un sistema de distribución ante desastres naturales," 2018.
- [10] R. Pelaez and A. Valenzuela, "Coordinación automática de protecciones de distancia en líneas de transmisión frente a una contingencia extrema," 2019.
- [11] H. Shi, "Searching algorithms implementation and comparison of eight-puzzle problem," pp. 1203–1206, 2011.

- [12] C. Liang, H. Dai, T. Liu, and L. Ma, "Power system cascading failure path searching under multiple failures based on probability estimation," pp. 4–6, 2015.
- [13] F. Gonzales, "Anormalidades en Sistemas de Potencia," pp. 1–22, 2007.
- [14] F. Castro-aranda and J. A. M. Velasco, "Análisis de sobretensiones de origen atmosférico en líneas aéreas de transporte," 2016.
- [15] E. Estuardo and C. Morán, "Análisis de sobretensiones debido a transitorios por maniobras en sistemas eléctricos de potencia mayores de 300 kv," pp. 113–115, 2008.
- [16] F. Chimarro and V. Hinojosa, "Análisis y determinación de tiempos de recierre para líneas del sistema nacional de transmisión del Ecuador en 138 kv," p. 2, 2007.
- [17] CONELEC, *Plan maestro de electrificación 2013 - 2022*. .
- [18] F. Barrero, *Sistemas de energía eléctrica*, Thomson. 2004.
- [19] CONELEC, *Procedimientos de despacho y operación (versión 2.0)*. 2000.
- [20] D. Aguas, J. Tamayo, J. Játiva, and W. Vargas, "Esquema de alivio de carga óptimo por bajo voltaje para el SNI mediante power factory de digsilent y programación en matlab," p. 16, 2014.
- [21] P. Ledesma, "Regulación de frecuencia y potencia," p. 2, 2008.
- [22] H. Hui, M. Zhao, W. Zhang, L. Yu, Y. Sun, and M. Wang, "Identification of active distribution network islan based on graph theory," in *IEEE PES Asia-Pacific Power and Energy Conference*, 2016, pp. 1767–1771.
- [23] D. Zocimo and M. Bredriñana, "Evaluación de la operación del generador sincrónico basado en la formulación matemática de la curva de capacidad," vol. 1, pp. 5–9, 2011.
- [24] K. Ruohonen, "Graph theory," pp. 31–40, 2013.
- [25] P. Van Dooren, "Graph theory and applications," 2009.
- [26] G. Durán, "Teoría de grafos," 2008.
- [27] E. Žunić, A. Djedović, and B. Žunić, "Software solution for optimal planning of sales persons work based on depth-first search and breadth-first search algorithms," pp. 1248–1253, 2016.
- [28] D. Sanchez and C. Barrera, "Estabilidad de voltaje en sistemas eléctricos de potencia incluyendo curvas de capacidad para líneas de transmisión basado en el método cpf," p. 9, 2018.
- [29] I. P. Group, *Diagram of IEEE 118 - bus Test System*. 2003, p. 112.

7.1. Matriz del estado del arte

Tabla 39. Matriz de estado del arte

EVALUACIÓN DE LA OPERACIÓN EN ISLA DE SISTEMAS ELÉCTRICOS DE POTENCIA MEDIANTE TEORÍA DE GRAFOS.																					
ITEM	DATOS			TEMÁTICA				FORMULACIÓN DEL PROBLEMA				RESTRICCIONES DEL PROBLEMA			MODELO MATEMÁTICO			SOLUCIÓN PROPUESTA			
	AÑO	TÍTULO DEL ARTÍCULO	CITAS	Causas islas	Tipos de consumidores	Esquema de alivio de carga	Redespacho ante fallos en la red	Detección de islas	Cambio de topología	Operación en isla	Régimen Permanente	Potencia Activa despacha por generadores	Equilibrio entre demanda y generación	Recorrido de todos los vértices para definir islas.	Teoría de grafos	Representación de grafos	Algoritmo Breadth First Search	Simulación de flujo de potencia después de que algunos elementos quedaron fuera de servicio a causa de un fallo.	Registro de cantidad de islas existentes	Estado de operación de cada isla	Operación de islas indispuestas
1	2012	Estrategia de reducción para la aplicación generalizada de localización de fallas en sistemas de distribución de energía eléctrica	1				☒	☒	☒										☒	☒	
2	2004	Algoritmos para localización de fallas en líneas de transmisión, análisis para el caso colombiano	1	☒			☒				☒	☒						☒			
3	2019	Esquema de alivio de carga por subfrecuencia ocasionado por desastres naturales basado en segmentación óptima de cargas	1	☒	☒	☒			☒				☒					☒			
4	2019	Planning of a Resilient Underground Distribution Network Using Georeferenced Data	1						☒				☒	☒	☒						
5	2019	A decision-making tool for electric distribution network planning based on heuristics and georeferenced data	1						☒				☒	☒	☒						
6	2017	Controlled islanding using transmission switching and load shedding for enhancing power grid resilience	1	☒				☒	☒	☒	☒	☒	☒					☒	☒	☒	

7	2002	Energy management and control of island power systems with increased penetration from renewable sources	1		☒		☒			☒		☒							☒	☒	
8	2013	Procedure of Fault Management in Distribution Networks with Distributed Generation	1			☒	☒	☒	☒	☒		☒	☒					☒	☒	☒	
9	2018	Coordinación automática de protecciones de sobrecorriente para un sistema de distribución ante desastres naturales	1	☒		☒	☒		☒		☒									☒	
10	2019	Coordinación automática de protecciones de distancia en líneas de transmisión frente a una contingencia extrema	1	☒		☒	☒		☒		☒									☒	
11	2011	Searching Algorithms Implementation and Comparison of Eight-puzzle Problem	1											☒	☒	☒	☒				
12	2015	Power System Cascading Failure Path Searching under Multiple Failures Based on Probability Estimation	1	☒				☒		☒											☒
13	2007	Anormalidades en Sistemas de Potencia	4	☒		☒													☒		
14	2016	Análisis de sobretensiones de origen atmosférico en líneas aéreas de transporte	1	☒				☒		☒		☒							☒		
15	2008	Análisis de sobretensiones debido a transitorios por maniobras en sistemas eléctricos de potencia	1	☒				☒				☒							☒		
16	2007	Análisis y determinación de tiempos de recierre para líneas del sistema nacional de transmisión del Ecuador en 138 kv	2	☒	☒	☒	☒			☒		☒							☒		
17	2013	Plan Maestro de Electrificación	1	☒	☒	☒	☒			☒	☒	☒	☒								
18	2004	Sistemas de energía eléctrica	1	☒	☒	☒	☒		☒	☒	☒	☒									
19	2000	Procedimientos de despacho y operación	2	☒	☒		☒			☒	☒	☒	☒						☒		☒
20	2014	Esquema de alivio de carga óptimo por bajo voltaje para el SNI mediante power factory de dgsilent y programación en matlab	1		☒	☒					☒	☒	☒						☒		☒
21	2008	Regulación de frecuencia y potencia	1	☒		☒	☒			☒	☒	☒	☒						☒		
22	2016	Identification of Active Distribution Network Island Based on Graph Theory	2					☒	☒					☒	☒	☒	☒		☒	☒	
23	2011	Evaluación de la operación del generador sincrónico basado en la formulación matemática de la curva de capacidad	1		☒		☒				☒	☒	☒						☒		☒

24	2013	Graph theory	1										✗	✗	✗	✗			✗	✗	
25	2009	Graph Theory and Applications	1											✗	✗	✗	✗				
26	2008	Teoría de grafos	1					✗	✗					✗	✗						
27	2016	Software Solution for Optimal Planning of Salesperson Work based on Depth-First Search and Breadth-First Search Algorithms	1	✗										✗	✗	✗					
28	2018	Estabilidad de voltaje en sistemas eléctricos de potencia incluyendo curvas de capacidad para líneas de transmisión basado en el método cpf	1	✗	✗		✗				✗	✗									✗
29	2003	Diagram of IEEE 118 - bus Test System	1													✗					
			CANTIDAD:	16	9	10	13	8	11	7	14	11	12	8	8	8	3	12	5	8	6

7.2. Resumen de indicadores

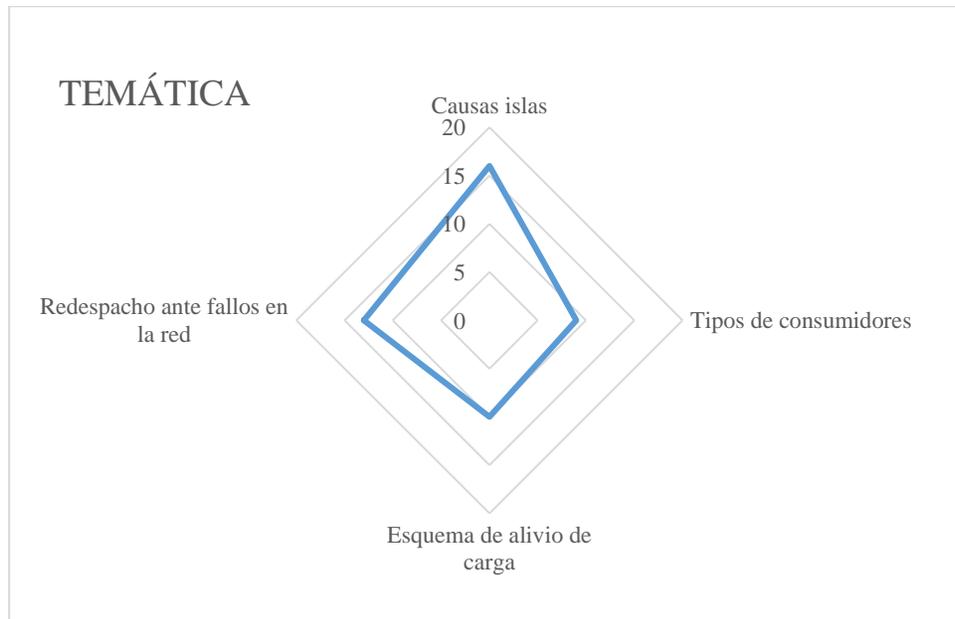


Figura 9. Resumen e indicador de la temática – Estado del arte

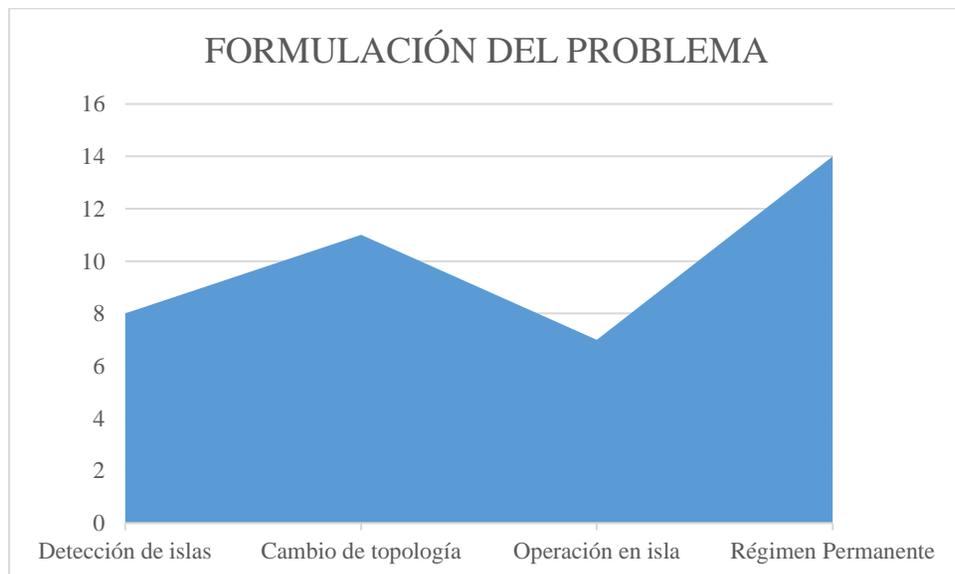


Figura 10. Indicador de formulación del problema – Estado del arte

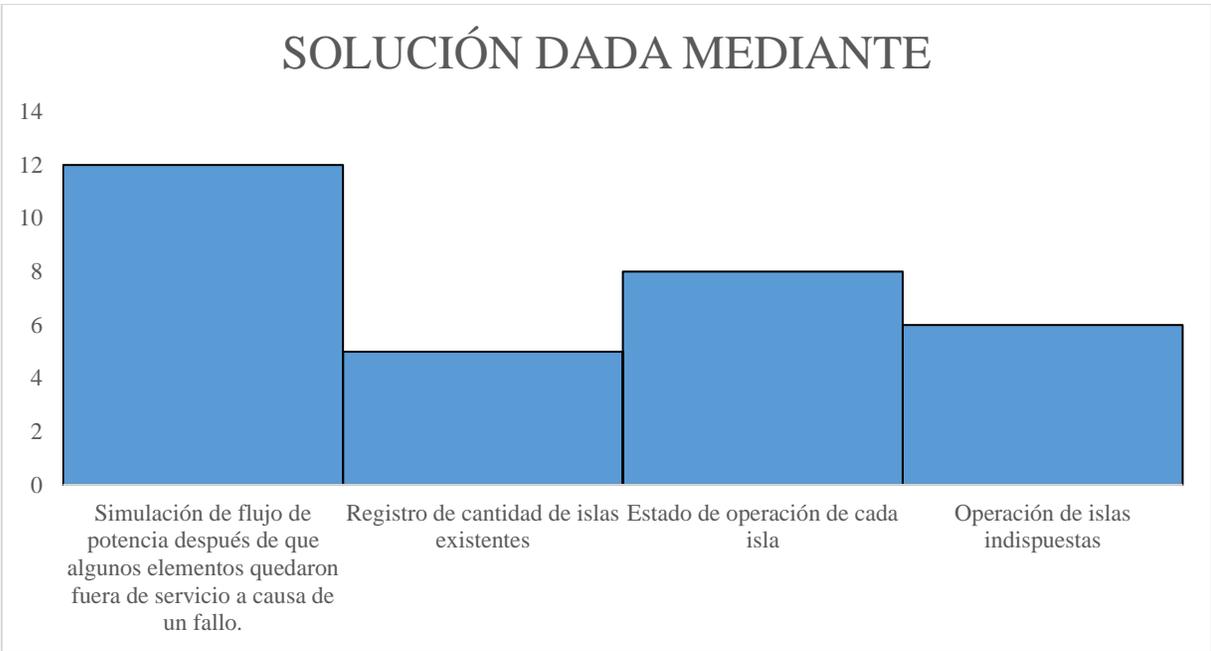


Figura 11. Indicador de solución – Estado de arte