

Universidad de Costa Rica
Facultad de Ingeniería
Escuela de Ingeniería Eléctrica

Ubicación óptima de monitores de tensión
para esquemas de control de tensión en redes
de distribución

Por:

Jorge Luis Acuña Espinoza

Ciudad Universitaria "Rodrigo Facio", Costa Rica

Diciembre del 2016

Ubicación óptima de monitores de tensión para esquemas de control de tensión en redes de distribución

Por:

Jorge Luis Acuña Espinoza

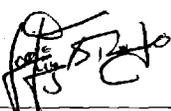
Sometida a la Escuela de Ingeniería Eléctrica
de la Facultad de Ingeniería
de la Universidad de Costa Rica
como requisito parcial para optar por el grado de:

LICENCIADO EN INGENIERÍA ELÉCTRICA

Aprobada por el Tribunal:

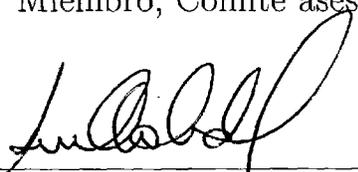


Dr. Gustavo Valverde Mora
Director, Comité asesor



Ing. Jorge Sánchez M.
Miembro, Comité asesor

Dr. Jorge Blanco R.
Miembro, Comité asesor



Ing. Luis Fernando Andrés J.
Director o su representante



Ing. Irene Víquez B.
Miembro, Tribunal

Resumen

En el presente trabajo se propone e implementa un nuevo algoritmo de ubicación de monitores de tensión en una red eléctrica de distribución. Este algoritmo se basa en análisis del sistema en distintas condiciones de falla. Lo que se pretende con el mismo es entregar al usuario la ubicación óptima de los monitores en su red, bajo un criterio determinado, ya sea un número específico de monitores o lograr una métrica específica con ellos. Una de las principales características de este método es que incorpora restricciones físicas, ya que se toma en cuenta ubicación de los posibles puntos de instalación de los monitores, en este caso en particular la ubicación de los postes. Además se incorporan métodos para expansión de la red, contemplando como punto de partida, la ubicación óptima inicial de los elementos. Este algoritmo pretende ser utilizado en distintas redes eléctricas para ubicar medidores de la mejor forma posible que permitan los controles de tensión del sistema, así como mejoras en el monitoreo y la información de la red en la que se encuentran. El algoritmo fue desarrollado con el uso conjunto de los programas Matlab R2015a, QGIS 2.16.3 y OpenDSS. Para utilizarlo adecuadamente se requiere un modelo del sistema eléctrico en el programa OpenDSS, así como las coordenadas de las barras del sistema y ubicaciones de los postes, las cuales son analizadas mediante QGIS. El procesamiento de los datos se realiza mediante el programa Matlab, el cual interactúa con OpenDSS para generar la información del sistema y finalmente otorga un archivo con las ubicaciones de los monitores.

Dedicatoria

Quiero dedicar este proyecto a mis padres, Hernán y Claudia, a mis hermanos, Alejandro y Eduardo que han sido un apoyo incondicional.

Felicitar a mi hermano Eduardo por su grado de Lic. en Ing. Civil.

Finalmente agradecer a mi novia Fabiola por su paciencia, apoyo y ejemplo a lo largo de este proceso. Sin ellos nada de esto hubiera sido posible. ¡Gracias!

Reconocimientos

Quiero hacer un reconocimiento especial al Dr. Gustavo Valverde Mora y al Dr. Jairo Quirós Tortós por su gran interés y aporte a el proyecto. Sin su ayuda y consejo esto no hubiera sido posible.

Índice general

Resumen	III
Dedicatoria	IV
Reconocimientos	V
Nomenclatura	X
1. Introducción	1
1.1. Alcances	1
1.2. Objetivos	2
1.2.1. Objetivo General	2
1.2.2. Objetivos Específicos	2
1.3. Justificación	2
1.4. Metodología	3
1.5. Procedimiento de evaluación	4
2. Marco Teórico	6
2.1. Situación energética a nivel mundial	6
2.2. Control de Tensión	12
2.3. Monitoreo de tensión para generación distribuida	18
2.4. Identificación de las zonas locales	20
2.5. Técnicas de agrupamiento “Clustering”	23
2.6. Métodos de particionamiento	32
2.7. Métodos para ubicación óptima de medidores	35

3. Desarrollo	41
3.1. Metodología Propuesta	41
3.2. Análisis de fallas	43
3.3. Agrupamiento jerárquico	44
3.4. Criterio de localización	45
3.4.1. Datos Requeridos	50
3.4.2. Etapa de Pre-Procesamiento	50
3.4.3. Etapa de procesamiento	51
3.5. Resultados del algoritmo de localización	54
3.5.1. Sub-Sistema de 10 barras	54
3.5.2. Sistema completo caso de 10 monitores	59
3.5.3. Sistema completo caso de 20 monitores	60
3.5.4. Comportamiento general de la ubicación óptima	61
3.6. Algoritmo de expansión	63
3.6.1. Resultados de expansión	63
3.6.2. Resultados de expansión	65
4. Conclusiones y recomendaciones	70
4.1. Conclusiones	70
4.2. Recomendaciones	71
Bibliografía	73

Índice de figuras

2.1.	Consumo de energía por fuente de generación a nivel mundial [1]	7
2.2.	Recursos utilizados para la producción de energía eléctrica a nivel mundial [1]	8
2.3.	Regiones del controlador [2]	15
2.4.	Comportamiento del controlador [2]	16
2.5.	Comportamiento MPC [2]	17
2.6.	Diagrama de flujo algoritmo de selección [3]	22
2.7.	Dendrograma	26
3.1.	Diagrama de flujo del algoritmo de localización	48
3.2.	Subsistema de 10 Barras	55
3.3.	Dendrograma Sub-Sistema de 10 Barras	56
3.4.	Ubicación y grupos para 10 monitores	60
3.5.	Ubicación y grupos para 20 monitores	61
3.6.	Tendencia de la métrica en localización óptima	62
3.7.	Ubicación inicial de 10 monitores y expansión a 20.	64
3.8.	Expansión de 10 a 20 monitores	65
3.9.	Comportamiento de la métrica del sistema	66
3.10.	Comportamiento de la métrica del sistema etapa inicial	67
3.11.	Comportamiento de la métrica del sistema 3D	68

Índice de cuadros

2.1. Tecnologías de Generación Distribuida [4]	10
2.2. Distancia euclidiana entre elementos, caso ejemplo	29
2.3. Resultados de enlazamiento simple, caso ejemplo	30
2.4. Resultados de enlazamiento completo, caso ejemplo	30
2.5. Resultados de enlazamiento promedio, caso ejemplo	31
2.6. Resultados de enlazamiento varianza mínima de Ward, caso ejemplo	32
2.7. Coeficientes de la ecuación Lance-Williams	34
2.8. Ejemplo Matriz de Observabilidad Temporal	37
2.9. Ejemplo Matriz de Observabilidad de Desepeño	37
3.1. Matrices de falla	44
3.2. Métrica caso de 10 barras	58

Nomenclatura

BTU:	British Thermal Unit. Cantidad de energía que se necesita para elevar en un grado Fahrenheit, la temperatura de una libra de agua en condiciones atmosféricas normales. Es equivalente a 1055.056 Jules.
GD:	Generación Distribuida
CPP:	Clean Power Plan. Regulación propuesta en los Estados Unidos para reducir el uso de carbón mineral.
LCZ:	Local Controlable Zone. Zona local controlable, es una subregión de la red eléctrica originada por el modelo de control propuesto por Piyadanai. Donde en cada zona el generador o generadores distribuidos tienen influencia importante sobre la tensión en barras, y fuera de la zona la influencia es baja.
LTC:	Load Tap Changer. Cambiador de derivaciones de un transformador que puede operar bajo carga, esto quiere decir sin interrumpir el flujo de energía.
Matlab R2015a:	Software de programación matricial
MPC:	Model Predictive Control. Modelo de control predictivo, es un esquema de control donde se hacen proyecciones en un horizonte definido para definir la secuencia de control.
P:	Potencia activa
Q:	Potencia Reactiva
OpenDSS:	Software de simulación de sistemas de potencia
QGIS:	Software de información geográfica
V:	Tensión eléctrica
δ :	Ángulo de desfase de la tensión eléctrica.

Capítulo 1

Introducción

1.1. Alcances

Para el proyecto se llevó a cabo revisión de distintos métodos que existen para ubicar monitores de tensión en una red eléctrica. En primera instancia se desarrolló un algoritmo que permite hacer una división del sistema en zonas de acuerdo a los patrones de comportamiento de sus distintas barras. El objetivo de esto es encontrar el número y ubicación óptima de monitores de acuerdo a criterios establecidos por el usuario. La ubicación debe ser tal que mediante esos monitores se pueda hacer una estimación adecuada y confiable de la evolución de las tensiones en la red.

Lo anterior se llevó a cabo mediante la implementación de un programa que incluye los distintos algoritmos y permite hacer la selección. Estos algoritmos incluyen procesos de simulación del sistema, mediante simuladores de potencia, controles con restricciones físicas mediante análisis geográficos, procesamiento de los datos para obtener las ubicaciones y finalmente visualización de los elementos del sistema en programas cartográficos para verificar el funcionamiento de acuerdo a la propuesta.

1.2. Objetivos

1.2.1. Objetivo General

Localizar de forma óptima monitores de tensión en redes de distribución.

1.2.2. Objetivos Específicos

1. Explorar y comparar técnicas de optimización que puedan ser aplicables a localización de monitores en la red.
2. Agrupar barras en el sistema que se comporten de manera similar que faciliten la decisión de la localización de monitores de tensión.
3. Implementar un algoritmo en Matlab R2015a que determine localización óptima de los monitores en la red.
4. Comprobar resultados del algoritmo propuesto mediante simulaciones en una red de distribución eléctrica.

1.3. Justificación

Actualmente, a raíz de la necesidad de la incorporación masiva de recursos renovables para la producción de energía eléctrica, se ha dado una alta penetración de la generación distribuida. Esto ha generado un concepto dinámico de la red y por ende su esquema de control debe variar.

En este proyecto se trabaja específicamente sobre un controlador de tensión centralizado desarrollado por Valverde y Van Cutsem [2]. Este controlador recibe mediciones de distintos puntos de la red para llevar a cabo sus controles. Lo que se pretende es utilizar el número de monitores mínimo pero suficiente y adecuado tal que se pueda hacer una estimación adecuada de la evolución de las tensiones en la red sin desperdiciar en más recursos. El algoritmo también pretende que en caso de que los recursos sean limitados,

se puedan ubicar de la mejor forma posible. Lo anterior ayuda también en caso de medidores para poder aproximar la tensión de distintas barras sin necesidad de tener monitores en ellas.

Lo que se desarrolló fue un algoritmo de selección de barras que tengan comportamientos similares de forma que se puedan aproximar las condiciones en todas las barras del sistema, sin contar con medidores en ellas. Con lo anterior se puede lograr una optimización de recursos en cuanto a la minimización de elementos de medición así como posibles expansiones, traslados o reubicaciones de los mismos, con el fin de reducir costos. De esta forma se puede tener un controlador funcionando de forma óptima, al menor costo posible y adecuado de acuerdo a la red en la que se trate. Una vez desarrollado el algoritmo se procedió a comprobar su funcionamiento con ayuda de los programas QGIS y OpenDSS que permiten la ubicación geográfica de la red y sus elementos, y simulaciones de flujos de potencia respectivamente para distintas condiciones y escenarios.

1.4. Metodología

El desarrollo del proyecto incluirá las siguientes etapas:

1. Estudiar de forma detallada el estado de la cuestión, distintos métodos de agrupamiento así como métodos de agrupamiento similares que han sido aplicados en redes eléctricas, que se puedan utilizar como punto de partida para desarrollar el trabajo. Elaborar un informe de lo anterior.
2. Estudiar métodos de localización óptima de medidores enfocados en control de tensión de redes de distribución.
3. Seleccionar el o los métodos de agrupamiento que mejor se acoplen al modelo en cuestión y posteriormente definir mediante diagramas de bloques el algoritmo a llevar a cabo.
4. Realizar un informe del mismo con la respectiva documentación.

5. Implementar el algoritmo de selección mediante el programa Matlab R2015a, para una red determinada.
6. Diseñar las pruebas a las que debe ser sometido el algoritmo para comprobar su adecuado funcionamiento en Matlab.
7. Diseñar pruebas de optimización del algoritmo en Matlab.
8. Realizar las pruebas al algoritmo y hacer un análisis con los resultados del mismo.
9. Realizar variaciones al algoritmo para permitir distintos tipos de entradas de datos por parte del usuario, tales como cantidad de medidores o métrica deseada.
10. Crear métodos que contemplen futuras expansiones de la cantidad de monitores por parte de la empresa distribuidora.
11. Completar el informe del trabajo realizado, incluir análisis de resultados, conclusiones y recomendaciones.
12. Preparar la presentación oral.

1.5. Procedimiento de evaluación

La evaluación de este proyecto se realiza mediante las diferentes pruebas llevadas a cabo en los simuladores y el análisis esquemático de la red en el programa QGIS. El programa desarrollado en Matlab R2015a con interacción con el programa OpenDSS debe ser capaz de recibir el modelo de un sistema en el software OpenDSS y QGIS, y generar una serie de matrices, de tensión, obtenida tras distintos flujos de potencia. La dimensión del sistema a utilizar será definida durante el desarrollo del proyecto. Con las matrices se diseñará un algoritmo de agrupamiento jerárquico que debe ser capaz de identificar primeramente grupos de barras que presenten un comportamiento similar. Una vez que se tengan los grupos se someterá a una segunda etapa de agrupamiento y filtrado, en donde se identificará en cada zona la barra que permita describir un comportamiento aproxima-

do de la totalidad de las barras de la zona. La propuesta implica definir un criterio que permita evaluar las ubicaciones propuestas para verificar la cantidad de información que no puede ser percibida. Se busca obtener suficiente información para que el controlador pueda llevar a cabo su función sin necesidad de contar con los datos de todas las barras del sistema. La idea es entonces minimizar la cantidad de barras cuya información es requerida. Una vez que se desarrolle el algoritmo de selección se visualizarán los resultados mediante el programa QGIS y se podrá ver el adecuado comportamiento del mismo. El algoritmo de agrupamiento funciona adecuadamente para aplicaciones de tipo descriptivas de la red.

Capítulo 2

Marco Teórico

2.1. Situación energética a nivel mundial

Uno de los dilemas más importantes que afronta la sociedad actual es el cómo satisfacer la creciente demanda energética. Desde tempranas etapas de la revolución industrial se ha incentivado a la sociedad a consumir y a producir. Esto aumenta la demanda de los recursos utilizados para la producción de energía, los cuales eran inicialmente considerados inagotables. Sin embargo su uso desmedido ha evidenciado que son agotables y esta conducta ha tenido efectos negativos en el planeta como lo son el calentamiento global, siendo esta una de las principales preocupaciones de la sociedad actual.

Entre las principales causas del cambio climático se encuentra el uso de combustibles fósiles, tanto para transporte como para la producción de energía. A pesar de esto, la demanda no se reduce, cada vez hay más medios de transporte circulando y la demanda energética se incrementa. Esto ha llevado a la necesidad de un replanteamiento del sistema energético mundial y la búsqueda de las llamadas tecnologías limpias que puedan ayudar a reducir significativamente el efecto del calentamiento global. A continuación se muestran gráficas del año 2016 que pronostican la distribución de energía a nivel mundial.

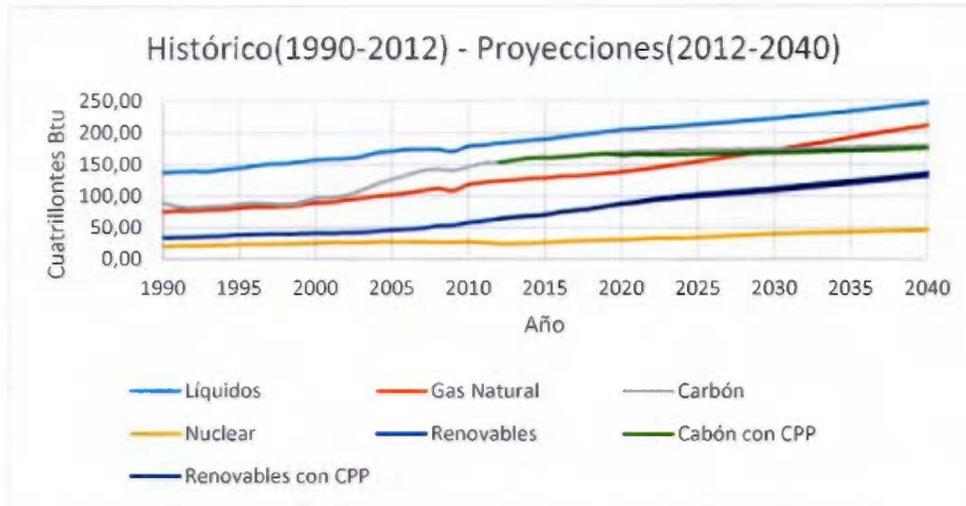


Figura 2.1: Consumo de energía por fuente de generación a nivel mundial [1]

Esto apunta a que va a tener que darse un cambio en el uso de la energía siendo uno de los principales candidatos la energía eléctrica. Sin embargo no tiene sentido seguir utilizando combustibles fósiles para producir esta energía eléctrica y por ello se apunta a aprovechar los recursos renovables. A continuación se muestra la distribución de los recursos utilizados en este caso para producir energía eléctrica.

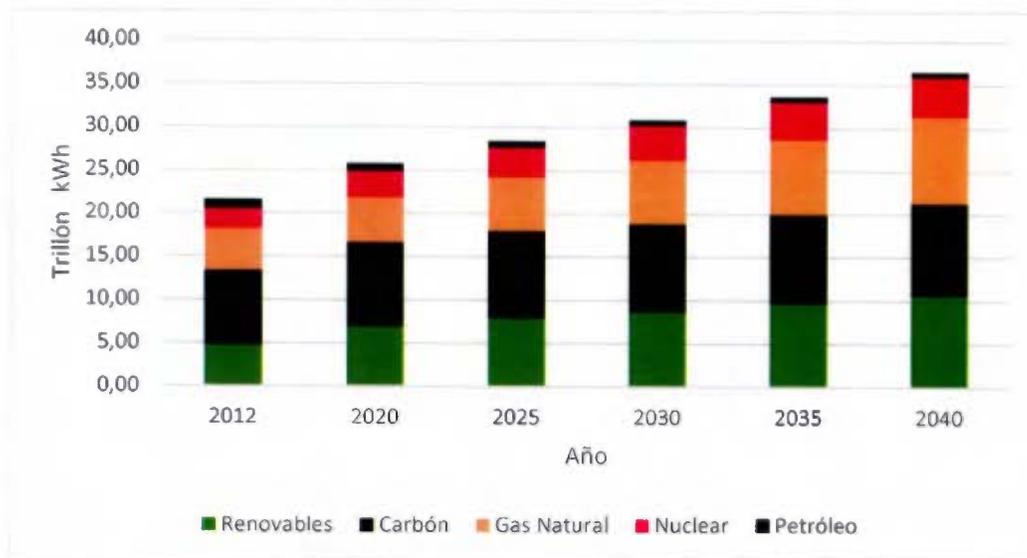


Figura 2.2: Recursos utilizados para la producción de energía eléctrica a nivel mundial [1]

Tal y como se muestra en la figura 2.2, el principal recurso para producir energía eléctrica ha sido el carbón mineral, sin embargo las proyecciones estiman un aumento significativo de los recursos renovables. El carbón es un combustible fósil genera gases de invernadero por lo cual debe, dentro de lo posible, irse cambiando la estructura de generación para utilizar en mayor manera los recursos renovables. El problema es que muchos de ellos son difíciles de incorporar por si solos de manera convencional al sistema, debido a que no son fuentes constantes y presentan grandes oscilaciones debido a su dependencia de factores climáticos.

Debido a la situación mencionada se ha ido propiciando una transformación del sistema energético a nivel mundial, principalmente en los países desarrollados. La idea es la creación de una Red eléctrica inteligente y autosuficiente, conocida en inglés como “Smart Grid”. Este concepto es muy

y frecuencia son primordiales. Por ende todos los sistemas deben ser dinámicos debido a que tanto las cargas en el sistema como las características propias de este tipo de generación son variables. A continuación se presenta una tabla donde se indican ejemplos de tecnologías que se utilizan en redes de generación distribuida y se muestran características de las mismas en su impacto en la red.

Tecnologías Basadas en energías no renovables y renovables						
Tipo de tecnología	Combustible utilizado	Tamaño(kW)	Eficiencia Eléctrica (%)	Eficiencia Promedio (%)	Costo instalado (\$/kW)	
Motores Reciprocantes	Diesel, gas o gas natural	3-6000+	30-43	80-85	600-1200	
Turbina de combustión de gas	Gas o diesel	0.5-30000+	21-40	80-90	400-300	
Micro-turbina	Bio-gas, propano o gas natural	30-1000	14-30	80-85	1200-1700	
Célula híbrida de combustible	Ethanol, H ₂ , N ₂ , gas natural	400-20000	35-55	80-85	4000-5000	
Célula híbrida de combustible	ácido fosfórico o propano	400-20000	35-55	80-85	4000-5000	
Célula de combustible pequeña	Ethanol, H ₂ , N ₂ , gas natural	1-300	30-50	80-90	4000-5000	
Célula de combustible pequeña	o propano.	1-300	30-50	80-90	4000-5000	
Micro CHP	Agua o Calor	1-10	30-50	75-89	500-845	
Célula de combustible automotriz	Ethanol, H ₂ , N ₂ , gas natural, PEM,	30-60	30-55	80-90	4000-5000	
Célula de combustible automotriz	ácido fosfórico, propano.	30-60	30-55	80-90	4000-5000	
Eólica	Viento	0.2-3000	NA	50-80	-	
Sistema Fotovoltaico	Sol	0.02-1000	NA	40-45	4500-6000	
Gasificación Biomasa	Biomasa	100-20000	15-25	60-75	15000-3000	
Hidroeléctrica Pequeña	Agua	5-100000	NA	90-98	10000-13000	
Geotérmica	Agua caliente	5000-100000	10-32	35-50	-	
Maremotriz	Olas del océano	100-1000	-	-	-	
Solar, térmica	Sol y agua	1000-80000	30-40	50-75	-	
Almacenamiento de baterías	-	500-5000	NA	70-75	100-200	
Tipo de tecnología	Costo mantenimiento (\$/kW)	Cobertura en Picos	Confiabilidad	Calidad de la energía	Energía Limpia	
Motores Reciprocantes	0.005-0.015	SI	SI	SI	No	
Turbina de combustión de gas	0.004-0.010	SI	SI	SI	No	
Micro-turbina	0.0018-0.015	SI	SI	SI	No	
Célula híbrida de combustible	0.0019-0.0153	SI	SI	SI	No	
Célula híbrida de combustible	0.0019-0.0153	SI	SI	SI	No	
Célula de combustible pequeña	0.0019-0.0153	SI	SI	SI	No	
Célula de combustible pequeña	0.0019-0.0153	SI	SI	SI	No	
Micro CHP	-	SI	SI	SI	No	
Célula de combustible automotriz	0.0019-0.0153	SI	SI	SI	No	
Célula de combustible automotriz	0.0019-0.0153	SI	SI	SI	No	
Eólica	-	NO	NO	NO	SI	
Sistema Fotovoltaico	-	NO	NO	NO	SI	
Gasificación Biomasa	-	NO	NO	NO	SI	
Hidroeléctrica Pequeña	-	NO	SI	SI	SI	
Geotérmica	-	NO	NO	NO	SI	
Maremotriz	-	NO	NO	NO	SI	
Solar, térmica	-	NO	NO	NO	SI	
Almacenamiento de baterías	-	SI	SI	SI	SI	

Cuadro 2.1: Tecnologías de Generación Distribuida [4]

Según el documento [5] existen una serie de ventajas con la incorporación de estos elementos a la red, entre ellas se pueden mencionar:

- Reducción en las pérdidas en las líneas.
- Mejora de perfiles de tensión.
- Incremento en la eficiencia del sistema.
- Aumento en la confiabilidad y seguridad del sistema.
- Mayor calidad de la energía.

- Disminución en las congestiones de las líneas de transmisión y distribución.

Por otro lado la utilización de estas tecnologías tiene una serie de implicaciones y limitaciones que deben ser tomadas en cuenta para una adecuada incorporación de las mismas al sistema:

- Flujos de potencia bidireccionales: esto debido a la incorporación de los elementos de generación distribuida a la red, ocasionando el mal funcionamiento de las protecciones por su configuración actual.
- Potencia reactiva: debido a que muchos de los generadores distribuidos usan generadores asincrónicos que no proveen reactivo a la red.
- Frecuencia del sistema: debido a que en algunas tecnologías la generación depende de factores climáticos en algunos casos se torna complicado lograr un balance adecuado entre la generación y la demanda, lo cual genera una desviación en la frecuencia nominal del sistema.
- Niveles de tensión: debido a los cambios en las magnitudes de los flujos de potencia por las características de la generación renovable se generan cambios constantes en los perfiles de tensión.
- Esquema de protección: estos problemas se dan debido a los flujos bidireccionales de potencia en las líneas. Por ello deben hacerse las adaptaciones en la red necesarias para disminuir este tipo de inconvenientes.
- Protección de islas: esto se da a que debido a que en un sector de la red puede existir tanto carga como generación por ello es prácticamente un sistema aislado. El problema se da cuando en otra parte del sistema ocurre un fallo y esta generación puede alimentar la falla y ocasionar mayores problemas. Por ello debe haber una protección que aisle los diferentes sectores en este tipo de situaciones.
- Inyección de armónicos en el sistema debido a la utilización de los generadores asíncronos, los cuales requieren de inversores para su interconexión.

- Aumento en las corrientes de cortocircuito en las zonas de cercanas a los generadores distribuidos.

2.2. Control de Tensión

En las redes de generación distribuida, el control de tensión es uno de los temas más sensibles y de mayor complejidad para una adecuada incorporación de los diversos recursos existentes al sistema. El objetivo del mismo es mantener la tensión cerca de valores nominales y la optimización de los flujos de potencia reactiva en la red [4]. Algunos de los elementos de la red que se utilizan para el control de tensión son los transformadores, generadores, capacitores y reactancias. A continuación se va a tratar a grandes rasgos la función de los distintos elementos de control:

- Generadores: estos aportan un control dinámico en las tensiones. Los generadores sincrónicos son capaces tanto de generar como absorber potencia reactiva de la red. En el caso de generadores asíncronos, ahora muchos de ellos cuentan con rectificadores que permiten que también ellos aporten reactivo para el control de tensión. También en el caso de generadores fotovoltaicos que trabajan con inversores, ellos son capaces de generar y absorber reactivo.
- Compensación pasiva/estática: En este caso se incorporan elementos pasivos como bancos de capacitores o reactores en las líneas que permiten un control estático en el sistema. Con ellos se puede disminuir o aumentar la tensión en su punto de conexión con el sistema. Estos están regidos por las relaciones entre sus reactancias y los perfiles momentáneos de corriente y tensión en el punto de conexión.
- Líneas eléctricas: el modelo de las líneas tiene carácter inductivo, debido a la distancia de las mismas y por ello consumen reactivo. Por otro entre las líneas se tiene un espacio vacío con dos líneas cargadas y por ello esto tiene un comportamiento capacitivo. Este comportamiento capacitivo también se da en condiciones de baja carga.

- Transformadores: el papel de los transformadores en el control de tensión mediante la regulación de las derivaciones. Algunos transformadores cuentan con cambiadores de derivación bajo carga (LTC) que permiten una regulación dinámica e ininterrumpida de la tensión.

Existen controladores de tensión que utilizan el modelo de control predictivo, tal es el caso del desarrollado por Valverde y Van Cutsem [2]. Este controlador presenta un esquema de control centralizado para regular voltajes en la red de distribución, esto para casos donde hay una alta penetración de la generación distribuida. En este caso se utiliza un modelo lineal que predice el comportamiento del sistema así como su optimización utilizando programación cuadrática. El control centralizado consiste en la corrección del punto de operación de la potencia reactiva en cada una de las barras de referencia, para de esta forma realizar la regulación de tensión.

Actualmente los generadores distribuidos funcionan en pocas ocasiones como reguladores de tensión, lo anterior se da porque los operadores de la red los operan con factores de potencia definidos. Esto debido principalmente a que pueden desestabilizar el controlador del cambiador de derivaciones automático (LTC) y por otro lado, en el caso de la regulación de tensión, se pueden requerir altas corrientes reactivas que pueden sobrecargar los equipos [2]. El controlador también procura optimizar tanto en el tema de la menor cantidad de variaciones posibles para corregir el problema como minimizar costos y requerir al mínimo de variaciones en la potencia activa de las unidades generadoras, debido a que esto implica un mayor costo económico.

El controlador utiliza matrices de sensibilidad que aproximan los cambios en la tensión y los flujos de potencia con respecto a los cambios en las variables de control. Entre las novedades de este modelo conforme a sus predecesores está que incorpora la variación en el consumo de las cargas con respecto a los cambios en la tensión y también procura que haya una transición dinámica desde los valores medidos hasta los valores deseados. Entre las principales características del nuevo controlador se encuentran:

- El controlador trabaja con rangos de operación aceptables y no actúa

a menos que los límites de dichos rangos sean violados.

- El controlador tiene una selectividad entre acciones de control de alto o bajo costo, para seleccionar la secuencia de control más apropiada.
- Debido a que el controlador utiliza optimización de múltiples pasos, este es capaz de llevar suavemente al sistema de su punto actual a la región deseada.
- Por la naturaleza de lazo cerrado del Modelo de Control Predictivo (MPC) el sistema corrige sus desviaciones e inexactitudes.
- Debido a que el control tiene capacidades anticipativas y también a sus modelos de optimización, este logra evitar acciones prematuras de los actuadores así como su acción innecesaria.

Este controlador funciona en un sistema de bandas de tensión debido a que no es físicamente logable o factible buscar un valor determinado, por ello se trabaja en tres bandas distintas. Primeramente se tienen el valor deseado y una tolerancia, que está definida por los límites normales de operación. Si por alguna razón la tensión se sale de esos límites llega a la región indeseable, y en este punto el controlador empieza a trabajar y realizar acciones correctivas para llevar la tensión nuevamente a la región deseada. Si la condición persiste el controlador sigue tomando acciones correctivas hasta que se normalice la situación y en caso de que la condición empeore y sobrepase el límite definido como límite de emergencia y entre en la llamada región inaceptable el controlador toma medidas adicionales. Estas regiones anteriormente mencionadas definen el comportamiento del controlador, el cual ya está previamente delimitado mas no definido.

En el controlador se tienen categorizadas las acciones a tomar de acuerdo al costo económico que ellas implican, siendo la de mayor costo la modificación de la potencia activa en los distintos puntos de generación. De esta forma dicha acción solo se toma en cuenta en casos de emergencia. A continuación se presenta un diagrama del funcionamiento lógico del controlador propuesto con el fin de lograr una mejor comprensión de lo explicado anteriormente.

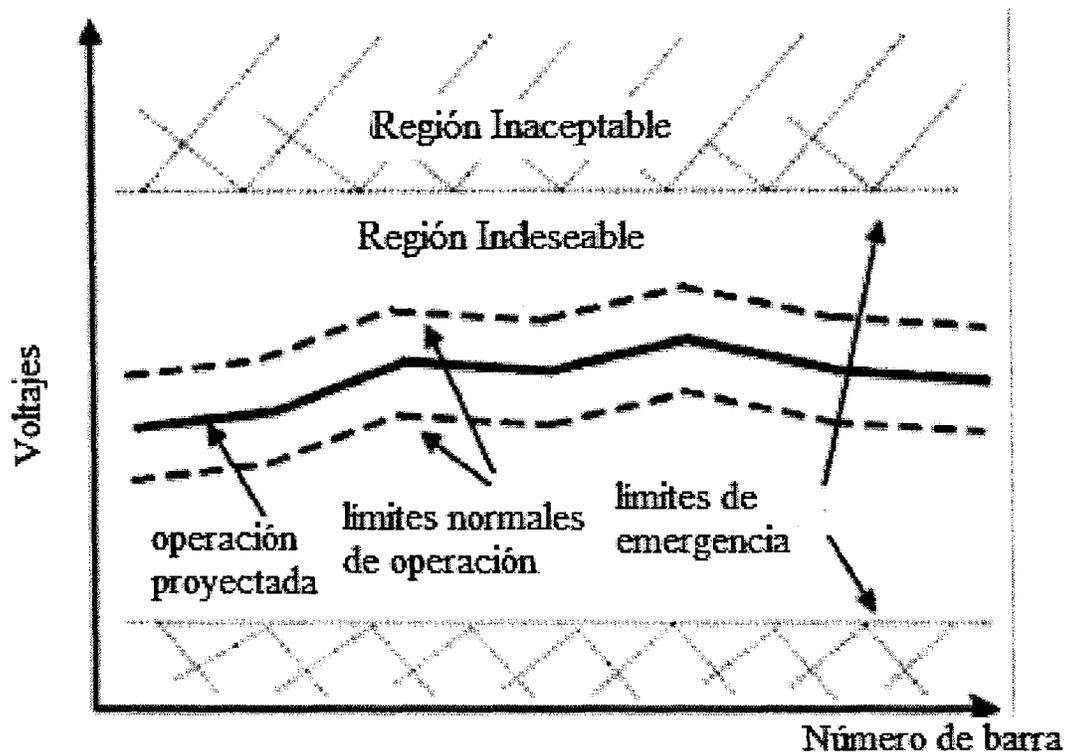


Figura 2.3: Regiones del controlador [2]

En la figura 2.3 se puede ver claramente la definición de las distintas regiones de operación del controlador. En la siguiente se pueden comprender de forma más intuitiva el comportamiento del controlador en las distintas zonas.

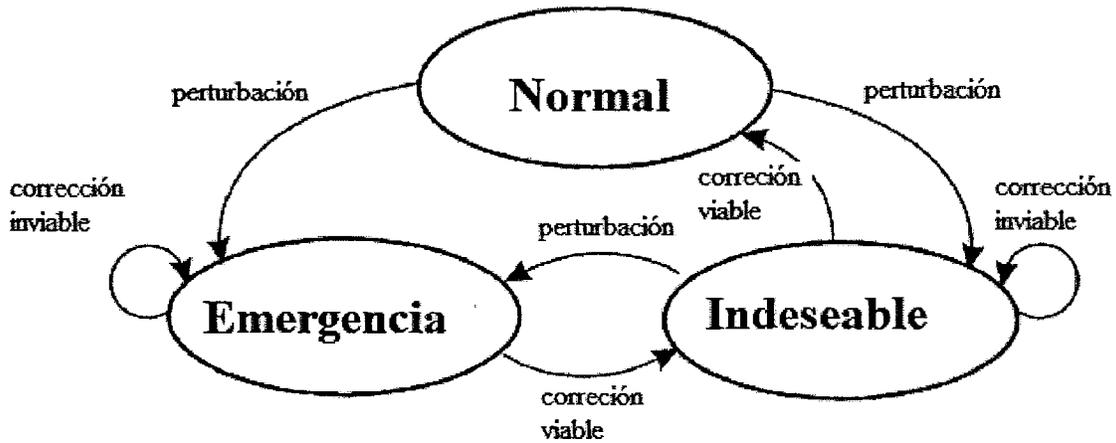


Figura 2.4: Comportamiento del controlador [2]

En la figura 2.4 se ilustra perfectamente el comportamiento del controlador en las distintas situaciones. Se ve como el controlador busca las distintas soluciones y las valora como viables o inviables, de esa forma no sale de su estado actual hasta encontrar una solución al problema.

En cuanto al tema del sistema de optimización multipaso, el controlador determina una secuencia de control en N_c pasos y predice la respuesta a las acciones en N_p pasos. Se hace entonces una proyección a futuro de acuerdo a las N_c acciones tomadas por el controlador. A continuación se ilustran los comportamientos del MPC:

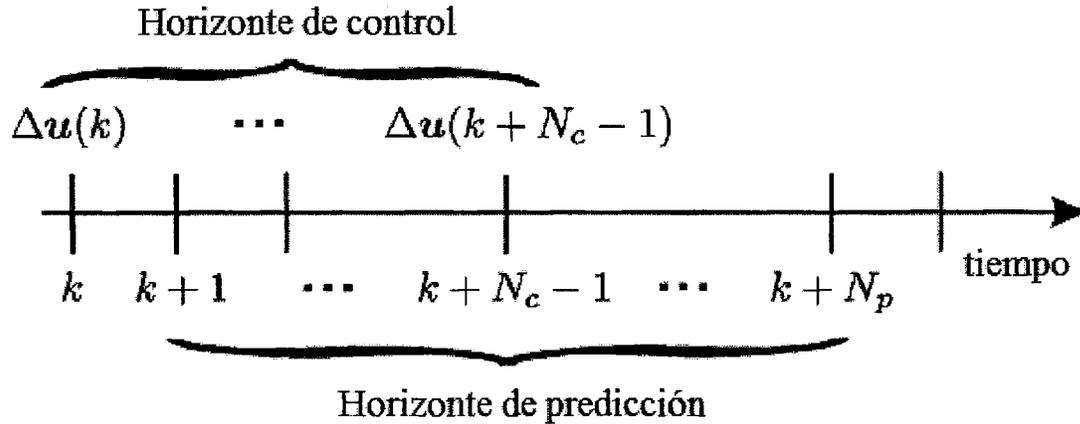


Figura 2.5: Comportamiento MPC [2]

El momento presente es el momento k , en este se utilizan los últimos datos medidos y el controlador determinan los cambios óptimos en las variables de control desde k hasta $k + N_c - 1$ para lograr el objetivo en el tiempo $k + N_p$. Solo se aplica en ese momento una pequeña variación que está representada por $\Delta(k)$. Luego de ese momento el controlador pasa al tiempo $k+1$, se recalculan todas las variables y se expanden en uno tanto el horizonte de control como el de predicción, cual si fuera una ventana.

Lo anterior se aplica de la siguiente forma, primeramente el controlador calcula el cambio en las salidas de potencia tanto reactiva como activa de los generadores distribuidos y también el punto de operación de la tensión del LTC del transformador en el punto principal de suministro, con el fin de mantener las tensiones dentro de los límites permitidos.

En estos puntos se asignan pesos a las distintas acciones a tomar y se utilizan la programación cuadrática para minimizar las acciones a ejecutar. Los pesos mencionados están directamente relacionados a los costos de los elementos para proveer servicios de respaldo. Para ejemplificar esto se puede ver el caso de cambios en el LTC, lo cual es considerado barato en contraste con el uso de la potencia activa, lo cual es caro y por ello solo se utiliza en condiciones de emergencia.

Otro aspecto de vital importancia para el controlador son los límites en

las variables de control. La potencia activa de las unidades de generación distribuida está limitada por su capacidad. En algunos casos puede ser la capacidad de la turbina, como los generadores sincrónicos y en otros casos, como las energías renovables, las condiciones atmosféricas son las que determinan la generación. La potencia activa en este tipo de generadores no puede ser aumentada en caso de necesidad, sin embargo si puede ser reducida parcialmente. Por otro lado la potencia reactiva si es completamente controlable, sin embargo sujeta a las capacidades físicas del generador.

Lo que se pretende ahora es crear un algoritmo que permita definir la ubicación óptima de monitores de tensión en las barras, de forma que se pueda aproximar el comportamiento de la totalidad del sistema con la menor cantidad de puntos de medición posible. De esta forma se puede presentar un gran ahorro en el sistema eléctrico y se puede implementar de forma más sencilla la redundancia en caso de que alguno de los medidores falle, ya que por el comportamiento de una barra se puede predecir el comportamiento de otras y de esta manera generar un sistema más eficiente y seguro tanto para el usuario como para la empresa de distribución.

2.3. Monitoreo de tensión para generación distribuida

Actualmente entre los principales esquemas de control que se utilizan para el control de tensión en sistemas de generación distribuida es el descentralizado. Estos esquemas de control han sido propuestos principalmente para colaborar con la regulación en estado estable, la cual se da en lapsos de tiempo más prolongados [3].

En este esquema de monitoreo específicamente propuesto por Piyadanai [3] se propone una estructura de control jerárquica que divide la red en regiones más pequeñas denominadas zonas locales controlables (LCZs). Las unidades de generación distribuida dentro de una zona deben ser capaces de llevar a cabo las compensaciones de tensión en su área sin afectar las barras externas a ella. También se ha demostrado con este esquema que

tanto el tamaño como el número de zonas de control pueden ser adaptados de acuerdo a los cambios en la topología de la red. Gracias a esta naturaleza adaptable del esquema propuesto, se garantiza el aprovechamiento óptimo de los recursos disponibles.

Este esquema de control integra no solo los elementos de generación distribuida sino también controles más estáticos como los cambiadores de derivaciones de los transformadores en las subestaciones, que entran a operar cuando las unidades de generación distribuida son insuficientes para mantener la tensión dentro de los rangos deseados. Con esta técnica también es posible seleccionar en cuales puntos de la red deben de ir conectadas las unidades de generación distribuida para una mayor estabilidad de la tensión del sistema.

Existen una serie de elementos que determinan la distribución de los distintos elementos bajo este esquema, entre ellos la mayor importancia recae en las impedancias de la red, las cuales dependen de los características de la línea así como de la topología de la red misma. Estos elementos van a determinar los rangos de sensibilidad de la red, los cuales se obtienen mediante la inversa del Jacobiano de un flujo de potencia en la red.

$$[J]^{-1} = \begin{pmatrix} \frac{\partial \delta}{\partial P} & \frac{\partial \delta}{\partial Q} \\ \frac{\partial V}{\partial P} & \frac{\partial V}{\partial Q} \end{pmatrix} \quad (2.1)$$

En la ecuación (2.1) se tiene que la magnitud de la tensión V así como su ángulo δ son las variables de estado del sistema de acuerdo a cambios en las potencias activa P y reactiva Q en una barra específica del sistema. De acuerdo con la ecuación (2.1) se pueden estimar que los cambios de tensión en las barras debido a perturbaciones en los generadores distribuidos se definen de la siguiente forma:

$$\Delta V_i = \left[\frac{\partial V_i}{\partial P_m} \right] \bullet \Delta P_{DG,m} + \left[\frac{\partial V_i}{\partial Q_m} \right] \bullet \Delta Q_{DG,m} \quad (2.2)$$

En la ecuación (2.2) se tiene que ΔV_i es la variación en tensión de la barra

en cuestión, m es la barra en la que se sufre la perturbación y $\Delta P_{DG,m}$ y $\Delta Q_{DG,m}$ son las sensibilidades de la barra donde se da la perturbación a variaciones en las potencias activa y reactiva respectivamente. Con simulaciones de comportamiento descrito anteriormente se determina que los generadores distribuidos tienen un bajo impacto en barras que son poco sensibles y un alto impacto en barras que son altas sensibilidades.

2.4. Identificación de las zonas locales

Con los análisis llevados a cabo por Piyadanai [3] se determinó que bajo este esquema, la contribución para la estabilidad de tensión se da mayoritariamente mediante el control de la potencia reactiva y por ende, la zona donde se encuentran las barras que permiten hacer la inyección de reactivo al sistema, tiene un mayor impacto en el perfil de tensión.

Las barras que se asocian a cada LCZ son determinadas por un esquema de operación en umbrales. En cada zona la barra en la que se conecta el elemento de GD se define como el centro de la zona. Se define entonces un umbral de variaciones en la tensión, el cual permite identificar las barras en las que el sistema de control tiene un mayor impacto y se agrupan dentro de la misma zona. Este umbral de tensión debe ser cuidadosamente seleccionado por el operador del sistema y debe permitir un adecuado manejo de la compensación dinámica dentro de la zona, procurando tener una muy baja interacción con las barras de las demás zonas.

De acuerdo a los análisis con la matriz de sensibilidad, las barras con variaciones en las tensiones mayores al umbral definido son ubicadas dentro de una LCZ. En caso de que las barras no sean incluidas dentro de ninguna zona se asumen que reciben muy poco aporte de las unidades de GD en caso de variaciones, y por eso no son incluidas dentro del esquema de control. Existe la posibilidad de que con el método existan barras que puedan ubicarse en varias zonas, en estos casos se utilizan los siguientes criterios:

1. En caso de que algunas barras pertenezcan a más de una zona, se

asocian a la más cercana de acuerdo al mayor cambio en la tensión.

2. En caso de que el traslape entre las áreas incluya las barras que cuenta con la unidad de GD, estas zonas son unidas. Puede entonces darse el caso de que una zona cuente con más de una unidad de generación distribuida.

Para poder llevar a cabo una identificación adaptativa en tiempo real de las distintas zonas, se requiere monitoreo en tiempo real de unidades de medición fasorial y el controlador central ubicado en la subestación. Con los datos se utiliza un estimador de estados que calcula un flujo de potencia en el cual encajen tanto las mediciones en tiempo real como las estimaciones de consumo o pseudomediciones. Con ello se calculan las matrices de sensibilidad y posteriormente se hace la identificación de zonas. Esta estimación se puede prolongar en un horizonte de hasta 15 minutos dependiendo de las características del sistema de comunicación. A continuación se muestra un diagrama de flujo que ilustra el proceso escrito.

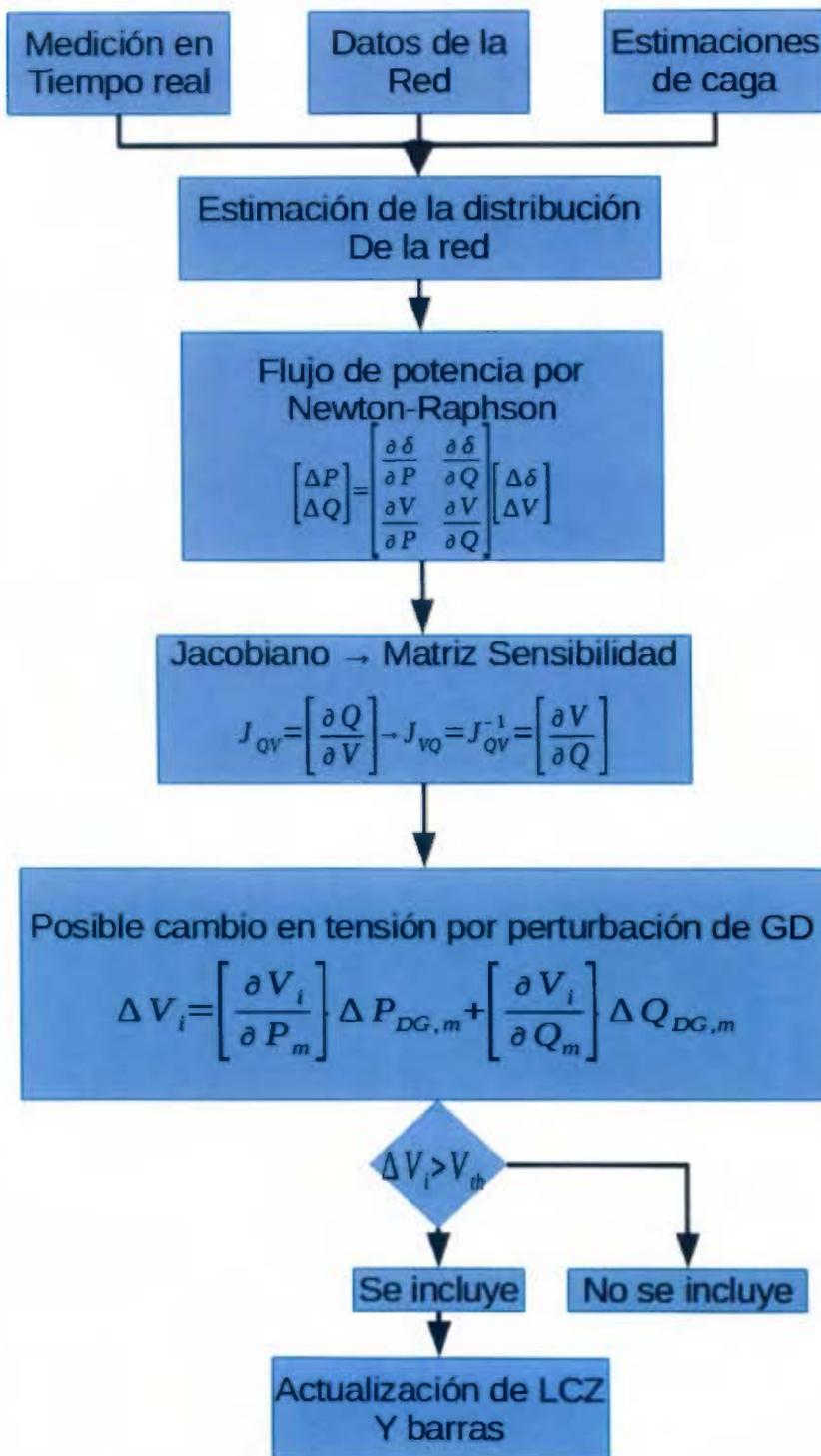


Figura 2.6: Diagrama de flujo algoritmo de selección [3]

Con la figura 2.6 se puede ver más claramente la forma del algoritmo que se necesita implementar. Este primero debe tener información de todas las barras de la red, con ello se hace un flujo de potencia por el método que mejor que mejor se acople. Una vez que se tiene el flujo de potencia se desarrolla un algoritmo de agrupamiento de acuerdo a las variaciones de las diferentes barras de acuerdo a las perturbaciones.

Este mecanismo de selección pretende identificar las principales barras en las distintas zonas que permitan aproximar el comportamiento de la totalidad de la zona y que pueda ser interpretado por el controlador como una sola barra. La idea es definir el menor número de barras posible en las distintas zonas para describir con la mayor precisión posible el comportamiento del sistema. La optimización del algoritmo pretende lograr el mejor balance posible entre precisión y el mínimo número de barras posible, de forma que el controlador pueda funcionar de forma adecuada dentro de sus márgenes de operación.

2.5. Técnicas de agrupamiento “Clustering”

La técnica de agrupamiento es descriptiva mientras la de clasificación es predictiva. La idea con este método es descubrir nuevas categorías basadas en el comportamiento. “Comprender nuestro mundo requiere conceptualizar las similitudes y diferencias entre las entidades que lo componen” (Tyron and Bailey, 1970) [6].

Debido a que el “clustering” consiste en el agrupamiento de objetos o instancias similares, debe existir alguna medida que determine si dos objetos son similares entre sí o no lo son. En ellos se utilizan mediciones de distancia y mediciones de similaridad. Una de las distancias que se utilizan en el método de agrupamiento es la distancia métrica. Una distancia para calificar como distancia métrica debe cumplir con las siguientes condiciones:

1. Desigualdad triangular:

$$d(x_i, x_k) \leq d(x_i, x_j) + d(x_j, x_k) \quad \forall x_i, x_j, x_k \in S \quad (2.3)$$

$$2.d(x_i, x_j) = 0 \Rightarrow x_i = x_j \quad \forall x_i, x_j \in S \quad (2.4)$$

Otro concepto alternativo que se utiliza cuando se comparan dos vectores es el de similaridad. Cuando la desigualdad triangular no se toma en cuenta se tiene una disimilaridad. En el caso de distancias para atributos numéricos se utiliza la distancia Minkowski. Dadas dos instancias en n -dimensiones, sea $x_i = (x_{i1}; x_{i2}; \dots; x_{in})$ y $x_j = (x_{j1}; x_{j2}; \dots; x_{jn})$. La distancia entre ambas instancias puede ser calculada utilizando la métrica Minkowski:

$$d(x_i, x_j) = (|x_{i1} - x_{j1}|^g + |x_{i2} - x_{j2}|^g + \dots + |x_{in} - x_{jn}|^g)^{1/g} \quad \forall g > 1, g \in \mathbb{Z}^+ \quad (2.5)$$

Existen casos especiales con diferentes denominaciones distancia Manhattan, Euclidiana y Chebyshev, estas son alcanzadas cuando $g = 1$, $g = 2$ y $g \rightarrow \infty$ respectivamente.

La unidad de medición que se utilice puede afectar el análisis de agrupamiento. Por ello se debe procurar una estandarización de las mediciones para dar a todas las variables el mismo peso. Dado el caso en que a cada variable se le asigne un peso de acuerdo a la importancia de la misma, se representa de la siguiente forma:

$$d(x_i, x_j) = (w_1|x_{i1} - x_{j1}|^g + w_2|x_{i2} - x_{j2}|^g + \dots + w_n|x_{in} - x_{jn}|^g)^{1/g} \quad \text{con } w_i \in [0, \infty[\quad (2.6)$$

Otro método para obtener distancia es el denominado, distancia Euclidiana estandarizada. Esta se define como la norma del vector de diferencias de las dos observaciones estandarizadas [7].

$$d(x_i, x_j) = \left(\frac{1}{V_1}|x_{i1} - x_{j1}|^2 + \frac{1}{V_2}|x_{i2} - x_{j2}|^2 + \dots + \frac{1}{V_n}|x_{in} - x_{jn}|^2 \right)^{1/2} \quad (2.7)$$

Dónde:

V_n : es el valor de la varianza entre los elementos x_{in} y x_{jn}

En el caso del programa Matlab R2015a que se va a utilizar cuenta con el algoritmo `pdist(X)`. En este algoritmo se genera un vector con las distancias solicitadas, ya sea Euclidiana, Euclidiana Estandarizada entre otras, entre los vectores de la matriz de entrada X .

Existen distintos criterios sobre los distintos grupos en los que se pueden categorizar los métodos de “clustering”. Algunos autores proponen dividirlo en métodos jerárquicos y métodos de particiones. Adicionalmente otros autores proponen subcategorías como modelos basados en densidad, modelos basados en agrupamiento y modelos basados en la red.

Los métodos jerárquicos realizan particiones recursivas de los objetos tanto en forma agrupativa como disociativa hasta formar los grupos deseados. Estas particiones son irreversibles. En el caso de la técnica agrupativa cada objeto representa un grupo por sí solo. Los grupos son fusionados sucesivamente hasta que se tenga la estructura deseada.

Existe un método de agrupamiento jerárquico es el llamado “Par global más cercano” o GCP por sus siglas en inglés “Globally Closest Pair”. El proceso inicia por un enlace principal, luego en la segunda iteración los grupos con mínima disimilaridad son seleccionados y sustituidos por su conjunto y posteriormente se utiliza un algoritmo de reducción.

Por otro lado la técnica disociativa inicia con todos los objetos en un mismo grupo y se realizan divisiones recursivas en subgrupos hasta que se obtenga la estructura deseada.

Los métodos jerárquicos pueden verse representados con un diagrama bi-dimensional tipo árbol, denominado Dendrograma, donde se le puede dar seguimiento a las agrupaciones que fueron realizadas durante las distintas iteraciones del algoritmo. A continuación se muestra un ejemplo de este tipo de gráfico:

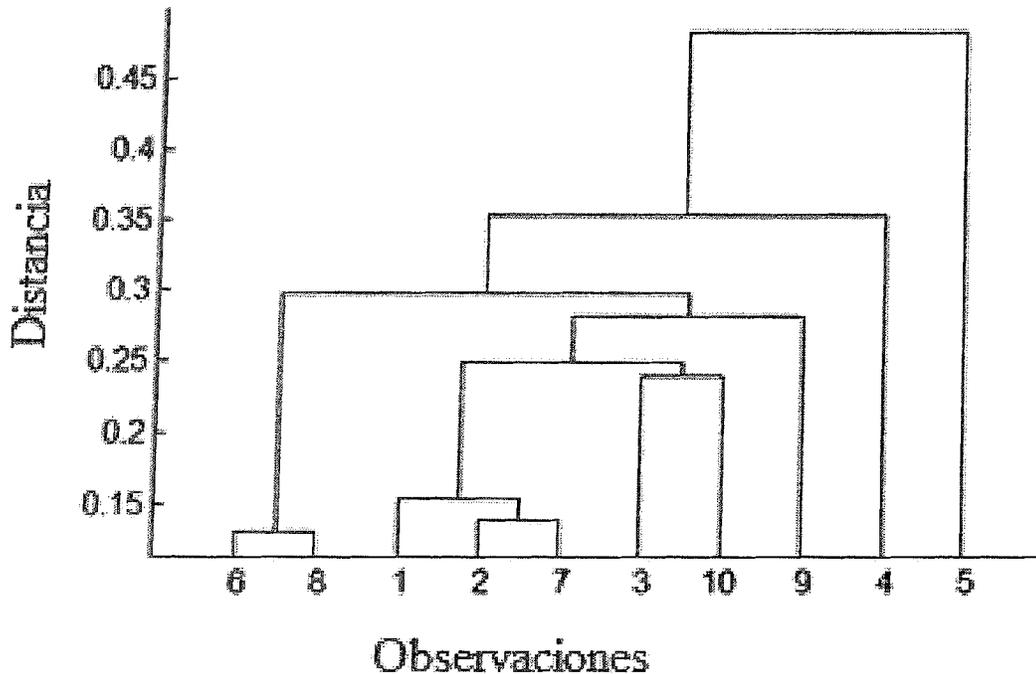


Figura 2.7: Dendrograma

En el gráfico presentado en la figura 2.7 se trabaja con líneas horizontales, por ejemplo si se quiere obtener entre los grupos una distancia máxima de 0,3 se pueden formar 4 grupos. Estos grupos van a estar formados por los elementos conectados a la línea vertical que interseca el punto de interés. De esta forma se puede dar seguimiento al proceso de agrupamiento y decidir en qué momento se alcanza el agrupamiento adecuado dependiendo de la necesidad.

Para estos agrupamientos jerárquicos se utilizan distintos criterios para los enlaces entre los elementos. Entre ellos están el agrupamiento con enlace simple, agrupamiento con enlace completo, el agrupamiento con enlace promedio y el método de varianza mínima de Ward. En este caso se va a suponer que los elementos con menor distancia fueron U y V y formaron el grupo UV y se tiene otro grupo W .

- Enlace simple o método del vecino más cercano: La distancia entre los grupos se define como la distancia entre los dos elementos, uno por cada grupo, que estén más cercanos.

$$d_{(uv)w} = \min(d_{uw}, d_{vw}) \quad (2.8)$$

- Enlace completo o método del vecino más lejano: la distancia entre los grupos se define como la distancia entre los dos elementos, uno por cada grupo, que estén más lejanos. Con este método se asegura que todos los elementos de un grupo están dentro de una distancia máxima uno del otro.

$$d_{(uv)w} = \max(d_{uw}, d_{vw}) \quad (2.9)$$

- Enlace promedio o método de la distancia promedio: la distancia se define como el promedio de todas las distancias entre los elementos, uno de cada grupo.

$$d_{(uv)w} = \frac{d_{uw} + d_{vw}}{2} \quad (2.10)$$

- Método de varianza mínima de Ward: esta distancia es medida en términos de la varianza muestral. En este caso se utiliza el incremento de la suma de cuadrados, esto es el incremento en el total dentro del grupo de la suma de los cuadrados como resultado de la unión de ambos grupos. Este último se define como la suma de los cuadrados de las distancias entre todos los elementos del grupo y el centroide del grupo. Esta se calcula mediante la siguiente fórmula.

$$d_{i,j} = \sqrt{\frac{2n_i n_j}{n_i + n_j}} \|\bar{x}_j - \bar{x}_i\|_2 \quad (2.11)$$

Donde:

$\|\bullet\|_2$: distancia Euclidiana entre los dos puntos

\bar{x}_j y \bar{x}_i : centroides de los grupos i y j

n_i y n_j : son las cantidades de elementos en los grupos i y j

Los centroides de los grupos se obtienen con la siguiente fórmula:

$$\bar{x}_i = \frac{1}{n_i} \sum_{q=1}^{n_i} x_{qi} \quad (2.12)$$

En este caso de igual forma que los anteriores, la unión entre los grupos se da si su varianza muestral de la unión es la más pequeña de todas. De ellos, el de enlace completo usualmente produce grupos más compactos y jerarquías más útiles que los demás métodos. En ella se considera que la distancia entre dos grupos igual a la distancia más lejana de cualquier miembro de un grupo con respecto a cualquier miembro del otro grupo.

A continuación se presenta un ejemplo de los enlaces generados con una matriz de prueba, y utilizando como criterio de medición la distancia Euclidiana.

$$M = \begin{pmatrix} 1 & 2 & 3 & 4 \\ 1,3 & 2,1 & 3,25 & 4,6 \\ 1,01 & 2,05 & 3,6 & 5 \\ 1,8 & 2,3 & 2,98 & 4,2 \\ 1,11 & 1,9 & 3,2 & 4,4 \end{pmatrix} \quad (2.13)$$

De la ecuación (2.13) se calculan las distancias Euclidianas entre los vectores lo cual genera el siguiente resultado:

$$D = \begin{bmatrix} 0,7228 \\ 1,1673 \\ 0,8777 \\ 0,4690 \\ 0,6075 \\ 0,7231 \\ 0,3500 \\ 1,3081 \\ 0,7420 \\ 0,8593 \end{bmatrix} \quad (2.14)$$

Elemento	Elemento	Distancia
1	2	0.7228
1	3	1.1673
1	4	0.8777
1	5	0.469
2	3	0.6075
2	4	0.7231
2	5	0.35
3	4	1.3081
3	5	0.742
4	5	0.8593

Cuadro 2.2: Distancia euclidiana entre elementos, caso ejemplo

Posteriormente se inicia a realizar los enlaces con las distancias del cuadro 2.2 y se ve la distancia entre los elementos de los subgrupos. Esto se va a realizar para los distintos criterios de enlace expuestos en la parte anterior.

▪ Enlace simple:

1. En el punto anterior se ve que la distancia mínima entre los vectores es 0,35, esta es distancia entre vector 2 y el vector 5 de la matriz inicial. Estos se enlazan y se obtiene un nuevo grupo denominado 6.
2. Ahora en la próxima iteración se buscan los siguientes elementos más cercanos. Se puede ver que la siguiente distancia en orden de sucesión es la representada por 0,46 que representa la distancia entre el vector 1 y el vector 5. Debido a que el vector 5 pertenece al nuevo grupo 6 entonces ambos grupos se fusionan generando un grupo 7 que contiene los vectores 2,5 y 1 y cuya diferencia se calcula como la distancia mínima entre los vectores, la cual es la distancia entre 1 y 5.
3. De esta forma sucesivamente generando los resultados que se ven a continuación. Que se pueden apreciar en el cuadro 2.3 .

Grupo	Grupo	Distancia
2	5	0.35
1	6	0.469
3	7	0.6075
4	8	0.7231

Cuadro 2.3: Resultados de enlazamiento simple, caso ejemplo

■ Enlace completo:

1. Se repite la misma metodología que se explicó en el enlace simple, la diferencia radica en que las distancias entre los grupos se consideran como la máxima distancia entre los elementos del mismo. Al igual que en el caso anterior se ubica primero los elementos más cercanos.
2. Una vez que se agrupan, se buscan los siguientes elementos más cercanos a partir de la última distancia contemplada. Cuando es localizada esa distancia, se ubican los elementos en cuestión, si este nuevo elemento pertenece a un grupo elaborado previamente entonces es absorbido por el grupo y se toma la distancia entre el grupo como la mayor distancia entre cada uno de los elementos que lo componen y el nuevo elemento agregado. Luego se busca el elemento más cercano a partir de esta nueva distancia, este se agrega y nuevamente se contempla la distancia más lejana hasta este nuevo elemento, y así sucesivamente. Lo anterior se puede verificar en el cuadro 2.4.

Grupo	Grupo	Distancia
2	5	0.35
1	6	0.7228
4	7	0.8777
3	8	1.3081

Cuadro 2.4: Resultados de enlazamiento completo, caso ejemplo

■ Enlace promedio:

1. Siguiendo la misma metodología primero se enlazan los elementos más cercanos.
2. Luego se busca el siguiente más cercano, una vez encontrado se utiliza el promedio de las distancias asociadas a los grupos en análisis. En este caso en particular asocia enlaza el grupo de 2 y 5 con 1 y su distancia es el promedio de las distancias de 1 – 2 y 1 – 5.
3. Posteriormente con esta distancia se selecciona el elemento más cercano que es el 4, en este punto la distancia que se coloca es el promedio de las distancias de 4 – 1, 4 – 2 y 4 – 5.
4. Este procedimiento se repite durante todo el proceso de agrupamiento.

Grupo	Grupo	Distancia
2	5	0.35
1	6	0.5959
4	7	0.82
3	8	0.9562

Cuadro 2.5: Resultados de enlazamiento promedio, caso ejemplo

- Método de varianza mínima de Ward: En este caso las variaciones se calculan con base en los centroides y funciona con distancias Euclidianas.
 1. Primeramente se toman los elementos que estén más cerca de acuerdo a la distancia Euclidiana y se agrupan, en este caso 2 y 5 y su distancia es 0,35.
 2. Posteriormente a partir de esa distancia se enlaza al elemento más cercano, y la nueva distancia se calcula a partir de la fórmula de la varianza mínima de Ward (2.11). Para la distancia entre los centroides requerida se calcula primero el centroide entre los grupos 2 y 5 y posteriormente la distancia entre este centroide y el elemento 1 que es en este caso el inmediato posterior. Una vez lista la distancia entre los centroides se multiplica por un

factor expuesto en la fórmula (2.11) que contempla la cantidad de elementos de los grupos.

3. Esto se repite sucesivamente hasta lograr la agrupación. Para el ejemplo en cuestión los resultados se muestran en el cuadro 2.6.

Grupo	Grupo	Distancia
2	5	0.35
1	6	0.6739
4	7	0.9336
3	8	01.1435

Cuadro 2.6: Resultados de enlazamiento varianza mínima de Ward, caso ejemplo

2.6. Métodos de particionamiento

Estos métodos son utilizados para reubicar los objetos, moviéndolos de un grupo a otro, comenzando por una partición inicial. En ellos es necesario que el número de grupos sea predefinido por el usuario. Uno de los métodos de particionamiento más utilizados es el algoritmo de minimización de error.

Estos algoritmos funcionan adecuadamente con grupos compactos y aislados, son los más intuitivos y utilizados. Este algoritmo busca una estructura de agrupamiento que minimice un determinado criterio de error que se utiliza donde se mide la distancia de cada elemento con su valor representativo. El más utilizado es la suma de errores al cuadrado, donde se mide el cuadrado de la distancia Euclidiana de los elementos con sus valores representativos. Uno de los algoritmos, no jerárquicos, más simples y comúnmente empleados es el algoritmo K-means. Este algoritmo agrupa los datos en K grupos, que son representados por sus centros o promedios. El centro de cada grupo se calcula como el promedio de las instancias que lo componen. Matemáticamente, el centro de la instancia puede ser

representado con la siguiente ecuación:

$$\mu_k = \frac{1}{N_k} \sum_{a=1}^{N_k} x_a \quad (2.15)$$

Donde:

N_k : número de elementos del grupo k

μ_k : promedio del grupo k

El algoritmo comienza a iterar y se detienen cuando el error de partición deja de ser reducido mediante la reubicación de los centros. Esto indica entonces que la partición es óptima. Otros criterios para que el algoritmo se detenga es limitando previamente el número de iteraciones.

Por otro lado en los métodos jerárquicos. Estos métodos pueden variar de acuerdo a las distancias que se utilicen ya también varían de acuerdo a los métodos de enlace. Estos fueron presentados anteriormente con sus distintas variaciones. El algoritmo de agrupamiento jerárquico tiene la siguiente estructura lógica:

- Recibe en la entrada una matriz de disimilaridad D sobre los elementos de estudio S .
- Entrega un agrupamiento jerárquico.
- Inicialmente se define un grupo para cada elemento:

Recapitulando lo expuesto previamente se tiene que:

- Inicialmente se define un grupo para cada elemento:

$$C_i = i \quad \forall i \in S \quad (2.16)$$

- Luego se inicia el lazo jerárquico donde sí:

$$|C| > 1 \quad (2.17)$$

1. Selección de pares de agrupamiento: Selecciona un par distinto de grupos con mínima disimilaridad D .

$$C_i, C_j \subseteq C \tag{2.18}$$

2. Unión de pares de agrupamiento: Se elimina C_i, C_j del grupo C y se reemplaza con: $C_i \cup C_j$ el cuál es añadido a la jerarquía.
3. Reducción: Se calcula la disimilaridad entre los nuevos elementos agrupados, bajo los mismos criterios del agrupamiento inicial y se prosigue con el proceso de agrupamiento

Para los métodos de agrupamiento jerárquico existe un algoritmo muy conveniente para obtener las disimilaridades denominada fórmula de disimilaridad actualizada de Lance-Williams.

$$d(i \cup j, k) = \alpha_i d(i, k) + \alpha_j d(j, k) + \beta d(i, j) + \gamma |d(i, k) - d(j, k)| \tag{2.19}$$

Dónde:

$\alpha_i, \alpha_j, \beta$ y γ definen los criterios de agrupamiento.

Estos se presentan en el cuadro 2.7:

Método de Agrupamiento	Factores fórmula Lance-Williams		
Enlace Simple	$\alpha_i = 0,5$	$\beta = 0$	$\gamma = -0,5$
Enlace Completo	$\alpha_i = 0,5$	$\beta = 0$	$\gamma = 0,5$
Enlace Promedio	$\alpha_i = \frac{ i }{ i + j }$	$\beta = 0$	$\gamma = 0$
Enlace Ward	$\alpha_i = \frac{ i + k }{ i + j + k }$	$\beta = -\frac{ k }{ i + j + k }$	$\gamma = 0$
Donde $ i $ es la cantidad de objetos en el grupo I y el coeficiente α_j se define de la misma forma que el coeficiente α_i			

Cuadro 2.7: Coeficientes de la ecuación Lance-Williams

En el caso del software Matlab se utiliza un algoritmo de agrupamiento denominado “linkage(X)”. Este algoritmo recibe una matriz de dos o más filas. En las filas se representa cada uno de los elementos de observación y en las columnas se representan las distintas categorías o mediciones de

los elementos en cuestión. Adicionalmente si uno desea puede especificar el método con el que desea realizar el agrupamiento, se pueden utilizar los estudiados anteriormente como enlace promedio, completo, simple, Ward, entre otras de acuerdo a los requerimientos. Si no se especifica utilizará enlaces simples por defecto. También al comando se puede definir la forma para medir las distancias, entre ellas se pueden utilizar la distancia Euclidiana, Euclidiana Estandarizada, Minkowski, Chebychev entre otras.

Existe también otra variación del algoritmo denominado “linkage(Y)”. En recibe el vector de distancias entre las filas de la matriz, de acuerdo al algoritmo mencionado anteriormente “pdist(S)”. En esta variación también se puede definir el método para realizar los agrupamientos al igual que en el caso anterior. A la salida de este algoritmo se genera una matriz Z de 3 columnas por m filas, donde m es el número de elementos en análisis. Los cuales provienen de la matriz S . Las primeras dos columnas de Z indican los números que fueron agrupados en una determinada iteración y la tercera columna indica la distancia entre los elementos o subgrupos agrupados en dicha iteración. Posteriormente se puede generar un dendrograma de la matriz Z donde se puede dar seguimiento al proceso de agrupamiento de una forma gráfica.

2.7. Métodos para ubicación óptima de medidores

En esta sección se consultaron referencias actuales sobre propuestas de ubicación óptima de medidores, en estos casos se utilizan para capturar caídas de tensión en el sistema en caso de fallas. Se pretende con ello exponer las similitudes entre los algoritmos para utilizarlos como punto de arranque, para, en conjunto con las herramientas expuestas anteriormente, desarrollar el algoritmo requerido.

En uno de los análisis [8] se busca establecer la cantidad mínima de monitores de tal forma que se garantice la cobertura del sistema completo. Para ello se busca obtener el área de alcance de los monitores y en este caso en particular se lleva a cabo una división de las líneas eléctricas en segmentos.

La finalidad en este caso establecer la cantidad mínima de medidores, así como su localización. En este caso la optimización se enfocan en minimizar el vector con los elementos $x(i)$ dónde:

$$x(i) = 1 \forall \text{ barra con medidor} \quad (2.20)$$

$$x(i) = 0 \forall \text{ barra sin medidor} \quad (2.21)$$

$$\min = \sum_{i=1}^N x_i \quad (2.22)$$

Sujeto a la restricción de:

$$M(x) \geq b \quad (2.23)$$

Dónde:

M : es una matriz binaria en la cual un 1 en la entrada (s, i) representa que una falla en algún punto del segmento s causa una caída de tensión en la barra i . Por ende esta matriz M representa el alcance de los monitores.
 b : debe ser un vector que contiene 1 en todos los elementos de forma que se asegure que cada falla sea capturada por al menos un medidor.

El producto $M(x)$ indica el número de monitores que son activados cuando ocurre la falla y de esta forma se obtiene la cantidad mínima de monitores que se necesitan. Posteriormente se define la ubicación de los mismos.

En los artículos consultados el algoritmo debe iniciarse con una configuración inicial y se define una estructura vecina para la configuración actual. Los criterios de definición de la zona vecina pueden variar depende de la aplicación. El concepto de minimización consiste en realizar el movimiento a la configuración que conlleve el menor costo, para contrastarlo con la configuración actual y verificar los resultados alcanzados con la nueva configuración hasta llegar a la mejor configuración o un criterio de parada.

En el otro artículo consultado [9] se utiliza una metodología híbrida que combina un algoritmo constructivo como el GRASP asociado a una técnica de búsqueda local en estructuras vecinas VNS. Este algoritmo asume la siguiente secuencia de pasos:

1. Implementar una fase de pre-procesamiento.
2. Realizar una fase constructiva.
3. Actualizar la solución actual.
4. Aplicar un criterio de parada.

En la etapa de pre-procesamiento se define una matriz de observabilidad denominada MO de dimensiones $M \times N$. En ella M es el número de condiciones de cortocircuito simuladas y N representa el número de barras del sistema. Se definen dos matrices de observabilidad, una temporal y una de desempeño. En la de observabilidad se tienen los valores de tensión de las barras en condiciones de falla y en la segunda de forma binaria se en la segunda de forma binaria se identifican las barras que están fuera de los rangos deseados de operación bajo dicha condición. Los cuadros 2.8 y 2.9 se ilustran un ejemplo, los límites permitidos se encuentran entre 1,1 y 0,8:

Condición	Barra 1	Barra 2	Barra 3	Barra 4
1	0.9	0.6	1.2	0.75
2	1.01	0.91	0.7	0.8
3	0.65	0.88	0.9	0.69

Cuadro 2.8: Ejemplo Matriz de Observabilidad Temporal

Condición	Barra 1	Barra 2	Barra 3	Barra 4
1	0	1	0	1
2	0	0	1	0
3	1	0	0	1

Cuadro 2.9: Ejemplo Matriz de Observabilidad de Desempeño

Luego de definir estas matrices se pasa a un proceso de evaluación de la función. Se define un vector de redundancia V_{red} , para evaluar la función

objetivo que define el número de medidores sensible para una determinada condición de falla.

$$V_{red} = M O_{ij} x V_{loc} \quad (2.24)$$

Donde V_{loc} es el vector binario de localización, que se define a partir del vector barra. Es decir se le asigna 1 si el medidor está en la barra correspondiente o 0 en el caso contrario.

De esta forma la expresión anterior genera que cada posición de V_{red} cuenta el número de medidores, los cuales colocados de la forma definida por V_{loc} son capaces de monitorear las condiciones de cortocircuito correspondiente.

Posterior a la etapa de pre-procesamiento se procede a utilizar el denominado algoritmo GRASP. Se toma la matriz de observabilidad y en ella se reducen el número de filas (en este caso condiciones de cortocircuito) y el número de barras considerando la redundancia en esta matriz. Entre las consideraciones se eliminan aquellas condiciones que generan caídas de tensiones en las mismas barras y aquellas barras que son afectadas por las mismas condiciones de falla.

Una vez que se tiene la matriz reducida se construye una solución utilizando un criterio probabilístico que consiste en lo siguiente:

1. Ordenar ascendentemente la matriz de observabilidad de acuerdo a la cantidad de barras son afectadas en una condición de falla determinada.
2. Se selecciona un número entre 1 y Tam_{Lista} . El valor Tam_{Lista} varía entre el 20 % a 30 % del tamaño de filas de la matriz. Esta fila seleccionada agrupa posiciones candidatas de barras (criterio adaptativo) que van a ser utilizadas para colocar los medidores.
3. Se elige en la línea de falla, la barra en la que va colocarse el medidor.
4. Se eliminan todas las condiciones de falla que la barra seleccionada observa o monitorea.

Este proceso es repetido hasta eliminar todas las condiciones de falla. Una

vez logrado ese objetivo se tiene un conjunto de barras donde serán instalados los medidores.

Una vez que se genera una solución en la primera etapa, se procesa una búsqueda local. En esta se deben generar todos los vecinos de la configuración actual dentro de su estructura vecina, reubicando un medidor aleatoriamente. Una vez que se tiene el medidor reubicado, se evalúa la función objetivo. Este proceso se realiza con todos los medidores y cada uno de los valores obtenidos se compara con la solución actual. Cuando se encuentre una solución mejor que la actual, esta pasa a ser la nueva solución actual y se reinicia la búsqueda con $k = 1$. Cuando no hay una mejor solución se pasa a la siguiente estructura vecina. Posteriormente se considera que la función objetivo visitada V_{red} es mejor que la actual cuando se presentan las siguientes condiciones:

1. Si los valores de V_{red} visitada no contienen ceros.
2. Si el número de 1 de V_{red} visitada es menor que V_{red} actual.

Cuando se encuentra solución mejor, se ubica el monitor en esa solución y reinicia el contador en 1. Es importante que para esta solución, se debe definir un número máximo de medidores.

Los métodos propuestos en los artículos anteriores tienen varias similitudes, principalmente en cuanto a su estructura. A pesar de que sus objetivos son distintos y sus métodos de optimización también varían, se tiene una secuencia estructurada que puede ser utilizada para resolver la situación en estudio. Siendo de vital importancia asumir una etapa de preprocesamiento de los datos por medio de un análisis de la matriz de sensibilidad. En esta parte se debe crear una matriz de observabilidad similar a la propuesta en el artículo anterior, adaptando el nuevo criterio de selección. Esta se procesa mediante el ordenamiento de sus filas y procesos de reducción matricial para posteriormente pasar a la fase constructiva.

En la fase constructiva se procede a seleccionar la función objetivo teniendo en cuenta criterios de minimización que fueron expuestos en el artículo [8] para definir la cantidad de medidores y se procede a su colocación

utilizando el criterio probabilístico expuesto en [9]. Luego una vez lista la primera solución se procede con la optimización donde se actualizan las soluciones actuales mediante los criterios de agrupamiento y se procede a definir el criterio de parada para finalizar el proceso.

Capítulo 3

Desarrollo

3.1. Metodología Propuesta

El proyecto desarrolló un algoritmo de ubicación de monitores de tensión en redes de distribución basado en el análisis de fallas. Debido a que las fallas en una red la someten a las condiciones más extremas, para generar un esquema robusto, el algoritmo se basa en el sistema bajo condiciones de falla.

La principal finalidad del algoritmo es ubicar una cantidad determinada de monitores de la mejor forma posible en el sistema, para que cada monitor permita monitorear una determinada porción del sistema con un grado de exactitud mínimo contemplando las condiciones en falla. Debido a que las mayores diferencias en tensión entre las barras en el sistema se presentan en condiciones de falla, estas son el criterio fundamental de estudio método propuesto. Las condiciones de falla permiten determinar las similitudes en el sistema de una forma más sencilla debido a que las variaciones en las tensiones entre los elementos son más marcadas, en contraste con la uniformidad de comportamientos de la tensión en condiciones normales de operación.

Inicialmente lo que busca el algoritmo es analizar la red mediante simulaciones de flujos de potencia, para obtener tensiones de la barras en distintas condiciones. Las tensiones son obtenidas realizando el mismo tipo de falla

en las distintas barras del sistema, considerando una falla a la vez, y se almacenan las tensiones en una matriz. En dicha matriz las filas representan las barras y las columnas una condición de falla específica. De esta forma se pueden obtener filas que representen la barra en cada una de las condiciones para el tipo de falla en cuestión, mientras la falla se traslada a través de las barras del sistema. Una vez que se tiene esta matriz se puede realizar un análisis para poder determinar los agrupamientos adecuados de acuerdo a las similitudes de comportamiento entre las barras.

En este punto se introducen las restricciones físicas, que son algunas de las innovaciones propuestas en este método. En este caso, ya que se busca que sea viable y funcione en sistemas reales, se introduce el elemento de los postes, debido a que necesariamente tiene que existir un poste en el que se pueda colocar el monitor en cuestión. Se requieren entonces, las ubicaciones de los postes y las barras del sistema en cuestión, para determinar si la barra que se está analizando es apta o no para colocar un monitor. En el proceso para determinar si una barra tiene un poste asignado considera el promedio de las distancias mínimas entre los postes de la red. Con esto se genera un vector binario que indica si la barra se encuentra a una distancia menor o igual a la calculada previamente y de esta forma se caracteriza la barra como apta o no para monitor. En caso de que un grupo de barras se encuentre dentro de las distancias aceptables, para un mismo poste, este poste se asignará únicamente a su barra más cercana.

En el sistema en estudio y para el desarrollo del algoritmo se consideran en el análisis únicamente las barras trifásicas. Esta restricción se toma para la red en estudio debido a su topología radial y que las líneas monofásicas que se derivan del sistema son únicamente ramales hacia las cargas, por ende las fallas en los ramales tendrían un impacto mayor al percibido por una falla en la barra trifásica de la cual el ramal se origina. A pesar de que solo se analiza la sección trifásica de la red, se analiza en la misma el impacto de fallas tanto trifásicas como monofásicas en sus distintas fases.

- Las matrices de tensiones de falla son el elemento utilizado para el análisis. Debido a la forma en que se plantea el análisis es necesario considerar las tensiones en los diferentes puntos del sistema para todas las condiciones

de falla. Es por eso que se generan diez matrices de fallas. Una de ellas es la matriz que describe las fallas trifásicas ya que en este tipo de fallas todas sus fases se comportan de igual forma, en caso de que sea una red balanceada. Las matrices restantes describen los comportamientos de las tres fases en condiciones de falla monofásica de cada una de ellas. Por ejemplo: una matriz observa la tensión de la fase A cuando se presentan fallas en la fase A, otra matriz observa la fase B en las condiciones de falla anteriores. De esta forma se obtienen las nueve matrices restantes a analizar. Cada una de ellas va a generar grupos distintos en los cuales va a existir un único monitor.

Posteriormente para cada conjunto de monitores se analiza la precisión de medición durante las distintas condiciones presentadas en las matrices para finalmente elegir el grupo de medidores que genere los mejores resultados.

3.2. Análisis de fallas

El método de localización propuesto basa sus algoritmos en el análisis de falla. El mismo toma en consideración una falla a la vez y se llevan a cabo tanto fallas monofásicas como trifásicas. Durante este proceso las tensiones son almacenadas en las matrices de análisis. Estas matrices son obtenidas generando fallas en cada una de las barras trifásicas en las siguientes condiciones:

En el cuadro 3.1 se puede ver como la matriz 1 se obtiene al realizar un cortocircuito trifásico a tierra en cada una de las barras del sistema. Debido a que el sistema en análisis es balanceado, según los resultados obtenidos en la simulación, todas las fases presentan el mismo comportamiento y por eso solo se genera la matriz a partir de la fase A. En los casos de las demás matrices son generadas a partir de fallas monofásicas a tierra. La matriz 2 se genera al realizar fallas en la fase A y observar la fase A. La matrices 3 y 4 observan las fases B y C respectivamente en la condición anterior. Este esquema es repetido al realizar las fallas en las demás fases. Se tiene una

Matriz	Falla	Tensión
1	A,B,C	A
2	A	A
3	A	B
4	A	C
5	B	A
6	B	B
7	B	C
8	C	A
9	C	B
10	C	C

Cuadro 3.1: Matrices de falla

undécima matriz que es únicamente utilizada para evaluar las ubicaciones en condiciones normales de operación.

Las dimensiones de las matrices pueden variar, sin embargo para este análisis son de dimensiones $N \times N$ donde N es el número de barras del sistema. En esta matriz las filas representan las barras del sistema y las columnas las distintas condiciones de falla. Debido a que en el análisis en cuestión para obtener mejores resultados, se realizan fallas en todas las barras analizadas, la matriz es $N \times N$, sin embargo si no se realizan todas las fallas, las dimensiones de la matriz pueden variar.

Posterior a la obtención de las matrices, estas tensiones son convertidas a PU para estandarizar el sistema y simplificar el análisis de las mismas.

3.3. Agrupamiento jerárquico

En esta propuesta, se utiliza el agrupamiento jerárquico para formar los grupos de barras. Este proceso inicia con el supuesto de que cada elemento corresponde a un grupo. Posteriormente se crea un enlace entre los elementos que se encuentran a una menor distancia y ellos pasan a formar un grupo. Una vez que ese grupo es formado sus elementos no se pueden separar, sin embargo el grupo puede absorber más elementos o grupos. Los

enlaces se continúan haciendo hasta llegar a un criterio de parada o que todos los elementos pasen a formar un único grupo.

Este comportamiento es particularmente útil para este algoritmo debido a la uniformidad y la trazabilidad del proceso. Debido a que los grupos tienden a mantenerse estables, esto es particularmente útil en los algoritmos de expansión ya que de esta forma es más sencillo mantener las ubicaciones originales.

Para el algoritmo en cuestión se utiliza la distancia euclidiana entre los vectores y se utiliza el enlace de tipo completo para realizar los agrupamientos. Un ejemplo del agrupamiento jerárquico es el caso donde se tienen inicialmente 10 monitores a ubicar, el algoritmo genera 10 grupos y ubica los monitores en el centroide. Si posteriormente se desea agregar un monitor más, el grupo número 11 será de la división de uno de los grupos anteriores, entonces se podrán obtener 9 de las localizaciones originales como óptimas. Otro beneficio del agrupamiento jerárquico es que debido a su estructura, se le puede dar seguimiento gráfico mediante un dendrograma 2.7.

3.4. Criterio de localización

El algoritmo de localización de monitores propuesto se basa en los siguientes fundamentos.

1. Debe existir un único monitor por grupo.
2. Cada una de las matrices citadas en la sección 3.2 se utiliza para generar un conjunto de grupos, por cada cantidad de monitores.
3. El monitor debe ser localizado en la barra más cercana al centroide que tiene un poste asignado a ella.
4. Se define una métrica (3.1) que es el criterio de evaluación de las ubicaciones de los monitores.
5. El algoritmo debe evaluar cada uno de los grupos en las distintas

matrices de falla y obtener una métrica para cada conjunto en cada condición de falla.

6. La menor métrica obtenida para cada conjunto de monitores es seleccionada como la métrica del conjunto.
7. Debido a que cada matriz genera un conjunto diferente de monitores, el conjunto con la métrica más alta es seleccionado como el conjunto óptimo.

Una vez que los grupos están definidos, se debe localizar el monitor cerca del centroide para que el mismo tenga un determinado rango o radio de cobertura, que es cuantificado mediante la métrica. El objetivo de la métrica en cada grupo es obtener un valor que determine la diferencia de tensiones entre el valor percibido por el monitor y la tensión mínima o máxima del grupo. Este se determina mediante la ecuación (3.1).

$$M = 1 - \max(|V - V_{min}|, |V - V_{max}|) \quad (3.1)$$

Donde:

M: Métrica

V: Tensión percibida por el monitor

V_{min} : Tensión mínima en el grupo

V_{max} : Tensión máxima en el grupo

La métrica va a tomar un valor de 1 cuando el grupo esté formado por un único elemento debido a que todos los elementos de la ecuación van a ser iguales, esto indica que la precisión del monitor es máxima en su grupo. Conforme se aumenta el tamaño del grupo, el radio del grupo va a aumentar y su métrica disminuye, debido a que la variación de tensiones percibida en el grupo incrementa. Como se puede deducir de la ecuación, la ubicación del monitor es fundamental.

Para disminuir la diferencia de tensiones entre el monitor y las distintas barras del grupo este tiene que estar ubicado en el punto más cercano al centroide posible. De esta forma el radio obtenido entre el monitor y las tensiones más extremas del grupo es el menor posible.

El método propuesto sigue el procedimiento presentado a continuación para obtener la ubicación óptima, tomando en cuenta las distintas matrices y ubicaciones disponibles:

1. Obtener los grupos para la primera matriz a ser analizada.
2. Colocar los monitores en las barras más cercanas al centroide que son elegibles al tener un poste asignado.
3. Calcular las métricas para las ubicaciones de los monitores en cada una de las matrices a ser analizadas.
4. Seleccionar la mínima métrica para cada conjunto de monitores.
5. Retornar la paso 1 con la siguiente matriz y repetir el procedimiento para todas las matrices a ser analizadas.
6. Una vez que los conjuntos de monitores para las distintas matrices han sido analizados, el conjunto que genere una mejor métrica va a ser seleccionado como el óptimo.

El método puede verse ilustrado en la figura 3.1.

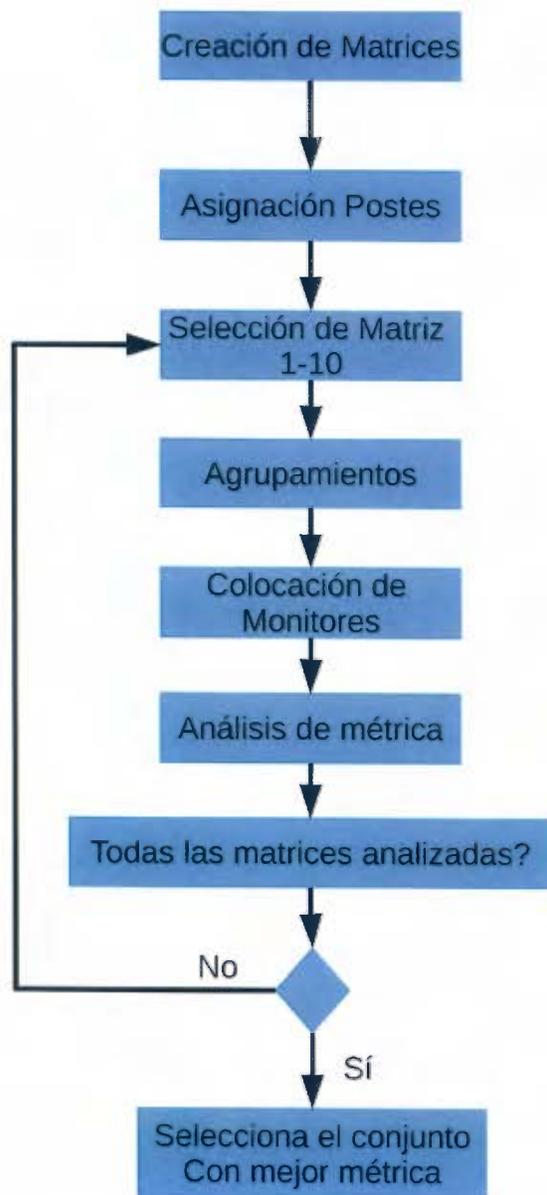


Figura 3.1: Diagrama de flujo del algoritmo de localización

Este algoritmo presenta una modificación en la cual el usuario puede introducir la métrica mínima deseada el algoritmo realiza un barrido, incrementando la cantidad de monitores hasta alcanzar una métrica óptima igual o superior a la deseada.

Otra de las variaciones toma en cuenta la expansión futura del sistema. En una situación de expansión de la red se propone una variación que considera la ubicación inicial de los monitores. Este algoritmo sigue el siguiente procedimiento:

1. Obtener las ubicaciones iniciales de los monitores, la cual es obtenida el algoritmo de ubicaciones óptimas.
2. Introducir el nuevo número de monitores a los cuales la red quiere ser expandida.
3. Considerando la nueva cantidad de monitores el algoritmo crea la misma cantidad de grupos, siguiendo el mismo esquema del algoritmo original.
4. El algoritmo revisa si los elementos pertenecientes a cada grupo ya contienen monitores. En caso de que esto suceda, el monitor se mantiene en su ubicación actual. Se debe tomar en cuenta que solo puede existir un monitor por grupo. En caso de que un grupo generado a partir de alguna de las matrices a analizar, contenga más de 1 monitor, esta matriz queda descartada del análisis.
5. Si el grupo no cuenta con un monitor, este es colocado en la barra que tiene un poste asignado más cercana al centroide del grupo.
6. Posteriormente se calculan los valores de la métrica, y el procedimiento se repite con las distintas matrices.
7. Una vez que las distintas métricas son calculadas, el conjunto con mejor métrica es elegido.

3.4.1. Datos Requeridos

Para diseño y pruebas del método propuesto se utilizó una red de topología radial de 362 barras trifásicas con una única fuente. Esta red representa el circuito de San Rafael de Escazú abastecido por la Compañía Nacional de Fuerza y Luz. Dicho circuito es el número 704 y proviene de la subestación de Sabanilla. Tiene un recorrido total de 82.63 km de los cuales 27.42 km corresponden a líneas trifásicas principales. Cuenta con 511 transformadores y tiene una capacidad instalada de 25 349 kVA. La demanda estimada de los 13 793 clientes abastecidos por dicho circuito estimada con base en los últimos 6 meses de año 2016 es de 16 263.09 kWh y la demanda real es de 10 MW.

El modelo utilizado de la red incluye barras monofásicas, trifásicas, la ubicación de las líneas y postes. Dicha red debe ser modelada, incluyendo impedancias, distancias, cargas y ubicación espacial de los elementos para ser analizada y simulada mediante el programa OpenDSS. Para la ubicación de los elementos se utiliza el programa QGIS que permite observar el diagrama de la red y la ubicación de los elementos. De lo anterior se extraen las coordenadas de los elementos que van a ser utilizados para analizar las limitaciones físicas contempladas por el algoritmo. Con el modelo en OpenDSS se realizan los estudios de flujos de potencia en las distintas barras de la red tanto en condiciones normales de operación como en condiciones de cortocircuito. Mediante la utilización combinada de los programas Matlab R2015a y OpenDSS la red es analizada y sometida al procedimiento propuesto en la sección 3.4.

3.4.2. Etapa de Pre-Procesamiento

Primeramente el algoritmo para por una etapa de preprocesamiento. En esta etapa es necesaria una única vez por simulación. En esta fase primero se somete el sistema a un flujo de potencia en condiciones normales y se exportan los resultados del flujo de potencia.

El resultado de lo anterior pasa a ser analizado en una etapa de selección de

barras, donde son identificadas las barras trifásicas del sistema, que son el punto de interés del algoritmo. Una vez que se tiene esta lista de barras, se obtienen las coordenadas de dichas barras de un archivo generado mediante el programa QGIS que incluye el nombre de la barra y sus coordenadas geográficas. Estos datos son importados a Matlab R2015a y contrastados para obtener la ubicación de las barras de interés.

En este punto se importa un segundo archivo obtenido de igual forma de QGIS que contiene los nombres y ubicaciones de los postes del sistema. Este archivo es analizado para obtener el promedio de distancias mínimas entre los postes. De esta forma se obtiene un valor que va a ser utilizado en primera instancia para determinar si una barra está o no asignada a un poste. Este archivo es analizado contra el obtenido de las barras de interés para generar un vector binario que indique si la barra tiene un poste asignado y por tanto es apta para colocar un monitor o no. En caso de que más de una barra sea asignada a un mismo poste ya que se encuentran a una distancia menor o igual de la obtenida como distancia máxima de selección, la barra más cercana será la considerada apta para selección y las demás no son consideradas. De esta forma se obtiene el vector binario de selección.

Una vez que se tienen las barras y el vector de selección se proceden a realizar los flujos de potencia en cada una de las barras trifásicas del sistema. Las tensiones obtenidas como resultado de esos flujos de potencia son almacenadas en matrices para ser analizadas posteriormente. Con esto concluye la etapa de pre-procesamiento.

3.4.3. Etapa de procesamiento

En la etapa de procesamiento el algoritmo toma las matrices y vector de selección obtenidos durante el pre-procesamiento para iniciar su análisis.

Primeramente las matrices obtenidas son normalizadas y se obtienen las dimensiones de las mismas. La cantidad de filas indica la cantidad de barras

del sistema y la cantidad de columnas las condiciones de cortocircuito a las que se somete el sistema. De igual forma se normaliza el vector, en este caso, o matriz de condiciones normales de operación y se obtiene la cantidad de condiciones normales de operación simuladas.

Seguidamente se introduce un vector con las cantidades de monitores que desean colocar en el sistema.

Una vez obtenidos estos datos se inicia con el proceso de agrupamiento o "clustering". Durante este proceso se analizan cada una de las matrices normalizadas obtenidas anteriormente. Al seleccionar la matriz, el algoritmo obtiene las distancias euclidianas entre las filas de la matriz, lo cual representa las barras del sistema.

Una vez obtenidas las distancias el programa inicia a realiza los enlaces completos a partir de las distancias del paso anterior. Para finalizar el proceso de agrupamiento se generan los grupos a partir de los enlaces completos y se utiliza como criterio de parada el número de grupos introducido por el usuario.

Con las barras distribuidas en los distintos grupos, se inicia el análisis de las submatrices. Estas submatrices son formadas para cada uno de los grupos, tomando de las matrices principales, las barras que pertenecen a cada uno de los grupos y también obteniendo del vector binario de selección cuales de las barras del determinado grupo son aptas para colocar monitores. A partir de las submatrices se obtienen los centroides de las mismas y luego se ubica el elemento que tenga un poste asignado y se encuentre a menor distancia del centroide. Esta va a ser la barra en la cual se coloca el monitor para el grupo en cuestión.

El proceso anterior se lleva a cabo en cada uno de los grupos. Una vez que se tienen las métricas para cada una de las condiciones se procede a seleccionar la mínima del grupo para la matriz en análisis. Este proceso se repite para los distintos grupos de la matriz y sus valores son almacenados.

Una vez asignados los monitores a partir del análisis de la primera matriz, se procede a obtener la métrica propuesta para evaluar la calidad de la

ubicación propuesta. Este análisis se da nuevamente en cada una de las submatrices de los grupos.

Una vez que se tiene cada submatriz se procede a analizar cada una de las columnas o condiciones de falla de esta matriz. En cada condición de falla para el grupo se obtiene la tensión máxima obtenida, la tensión mínima y la tensión de la barra en la que se ubica el monitor como se ve en la ecuación (3.1). A partir de estos valores se obtiene el valor de la métrica para cada una de las condiciones de falla. Este procedimiento se repite en cada una de las matrices a analizar y sus valores son almacenados. De los anteriores valores se extrae la métrica mínima encontrada para esa determinada cantidad de monitores y se elige como la métrica del conjunto.

El procedimiento se repite desde la formación de grupos hasta obtener la métrica del conjunto, generando los grupos con cada una de las matrices disponibles en el cuadro 3.1. De esta forma se tienen distintas opciones de ubicaciones de monitores para una determinada cantidad definida por el usuario. Para elegir entre las opciones de grupos presentadas se selecciona el conjunto que tenga una mayor métrica, que es decir la que tenga un mejor desempeño en la condición más crítica analizada. Este conjunto es seleccionado como la ubicación óptima para esa cantidad de monitores.

El proceso se repite para las distintas cantidades de monitores seleccionadas por el usuario.

Una de las variaciones presentadas es el permitir que el usuario introduzca una métrica mínima deseada. En este caso el algoritmo utiliza el mismo procedimiento, con la modificación de que la cantidad de monitores deseada varía de forma creciente desde 1 hasta la cantidad máxima de monitores permitida y el programa se detiene cuando el valor de la métrica es mayor o igual que la métrica deseada.

La segunda modificación del algoritmo incorpora elementos de expansión futura de la red. En este caso una mayor cantidad de datos es requerida para ser introducida por el usuario. El algoritmo inicia con la localización

óptima para un determinado grupo de monitores, posteriormente se introduce la cantidad de monitores a la que se desea expandir la red, en caso de que el usuario desee observar un barrido con varias opciones puede introducir la cantidad máxima deseada y en pasos de cuanto quiere realizar el incremento. Por ejemplo: el usuario ubica 10 monitores de forma óptima y desea expandir posteriormente la red a 20 elementos como máximo con incrementos en pasos de 5. Bajo este esquema el sistema colocará primero la ubicación óptima para 10 y expandidas para 15 y 20 monitores.

Una vez que el algoritmo define de forma óptima la cantidad inicial de monitores, se obtiene la ubicación inicial de los monitores en el sistema y la cantidad a la que se desea expandir el sistema. Con la nueva cantidad, el sistema procede a realizar los agrupamientos. Estos agrupamientos son creados de la misma forma que en el caso óptimo.

Una vez que se tienen los grupos formados se procede a verificar las ubicaciones de los elementos que ya cuentan con monitor dentro de esos nuevos grupos. Se debe tomar en cuenta el criterio de que únicamente puede existir 1 monitor por grupo. En caso de que un grupo inicialmente cuente con más de un monitor, esta matriz es descartada y se procede a utilizar la próxima para generar un nuevo conjunto de grupos. En caso de que el grupo contenga un único monitor, este monitor se mantiene en su ubicación. Cuando el grupo en análisis no cuenta con un monitor, el monitor es ubicado bajo el mismo criterio que en la selección óptima, en la barra más cercana al centroide que tiene un poste asignado.

Una vez que se tienen las ubicaciones de los monitores, el procedimiento de evaluación de las métricas a través de las distintas matrices se mantiene y finalmente se elige el conjunto que cuente con una mayor métrica.

3.5. Resultados del algoritmo de localización

3.5.1. Sub-Sistema de 10 barras

El algoritmo fue aplicado a un pequeño sistema de 10 barras y 10 postes, este es una sección del circuito de San Rafael analizado durante el proyecto. Para este caso se pretenden ubicar 3 monitores al sistema.

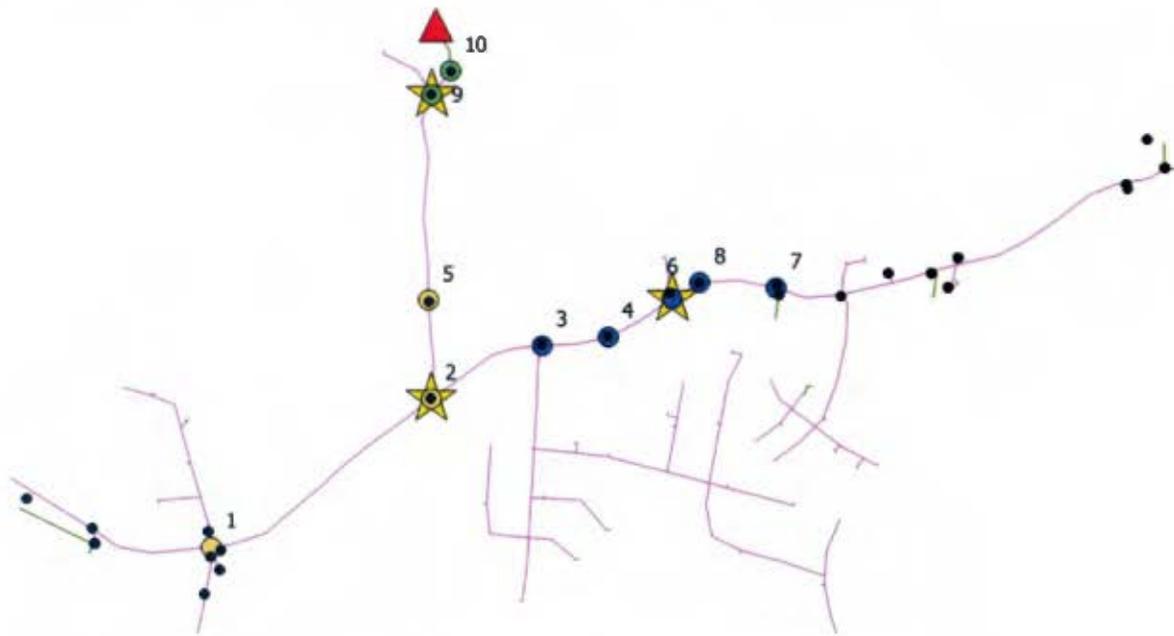


Figura 3.2: Subsistema de 10 Barras

La primera etapa consiste en someter el sistema a un estudio de flujos de potencia. Las distintas matrices mencionadas en la sección 3.2 son creadas. Cada una de las matrices va a tener dimensiones de 10×10 . Para este sistema en particular, se llamará la matriz T , en esta se almacenan las tensiones en PU del sistema durante una falla trifásica. La matriz se

muestra en (3.2):

$$T = \begin{pmatrix} 1,86E-05 & 1,92E-05 & 1,45E-02 & 2,20E-02 & 1,94E-05 & 3,02E-02 & 4,19E-02 & 3,37E-02 & 1,99E-05 & 1,99E-05 \\ 3,04E-02 & 1,92E-05 & 1,45E-02 & 2,20E-02 & 1,94E-05 & 3,02E-02 & 4,19E-02 & 3,37E-02 & 1,99E-05 & 1,99E-05 \\ 3,04E-02 & 1,92E-05 & 1,89E-05 & 7,62E-03 & 1,94E-05 & 1,59E-02 & 2,79E-02 & 1,95E-02 & 1,99E-05 & 1,99E-05 \\ 3,04E-02 & 1,92E-05 & 1,89E-05 & 1,88E-05 & 1,94E-05 & 8,40E-03 & 2,04E-02 & 1,20E-02 & 1,99E-05 & 1,99E-05 \\ 4,16E-02 & 1,15E-02 & 2,58E-02 & 3,32E-02 & 1,94E-05 & 4,14E-02 & 5,30E-02 & 4,48E-02 & 1,99E-05 & 1,99E-05 \\ 3,04E-02 & 1,92E-05 & 1,89E-05 & 1,88E-05 & 1,94E-05 & 1,86E-05 & 1,21E-02 & 3,63E-03 & 1,99E-05 & 1,99E-05 \\ 3,04E-02 & 1,92E-05 & 1,89E-05 & 1,88E-05 & 1,94E-05 & 1,86E-05 & 1,84E-05 & 1,85E-05 & 1,99E-05 & 1,99E-05 \\ 3,04E-02 & 1,92E-05 & 1,89E-05 & 1,88E-05 & 1,94E-05 & 1,86E-05 & 8,52E-03 & 1,85E-05 & 1,99E-05 & 1,99E-05 \\ 6,52E-02 & 3,59E-02 & 4,99E-02 & 5,71E-02 & 2,47E-02 & 6,50E-02 & 7,63E-02 & 6,84E-02 & 1,99E-05 & 1,99E-05 \\ 6,86E-02 & 3,94E-02 & 5,33E-02 & 6,05E-02 & 2,82E-02 & 6,84E-02 & 7,97E-02 & 7,18E-02 & 3,64E-03 & 1,99E-05 \end{pmatrix} \quad (3.2)$$

Para este caso en particular, la matriz (3.2) es la que origina las ubicaciones óptimas de los monitores. Por lo anterior, esta es la seleccionada para el análisis.

El algoritmo divide la matriz en 3 grupos de acuerdo a las distancias entre sus filas. Las barras son agrupadas de la siguiente forma:

1. Grupo 1: 3,4,6,7,8
2. Grupo 2: 1,2,5
3. Grupo 3: 9,10

Estos grupos pueden ser fácilmente identificados en la figura 3.2. El proceso de formación de los grupos puede ser fácilmente trazado en el dendrograma de la figura 3.3.

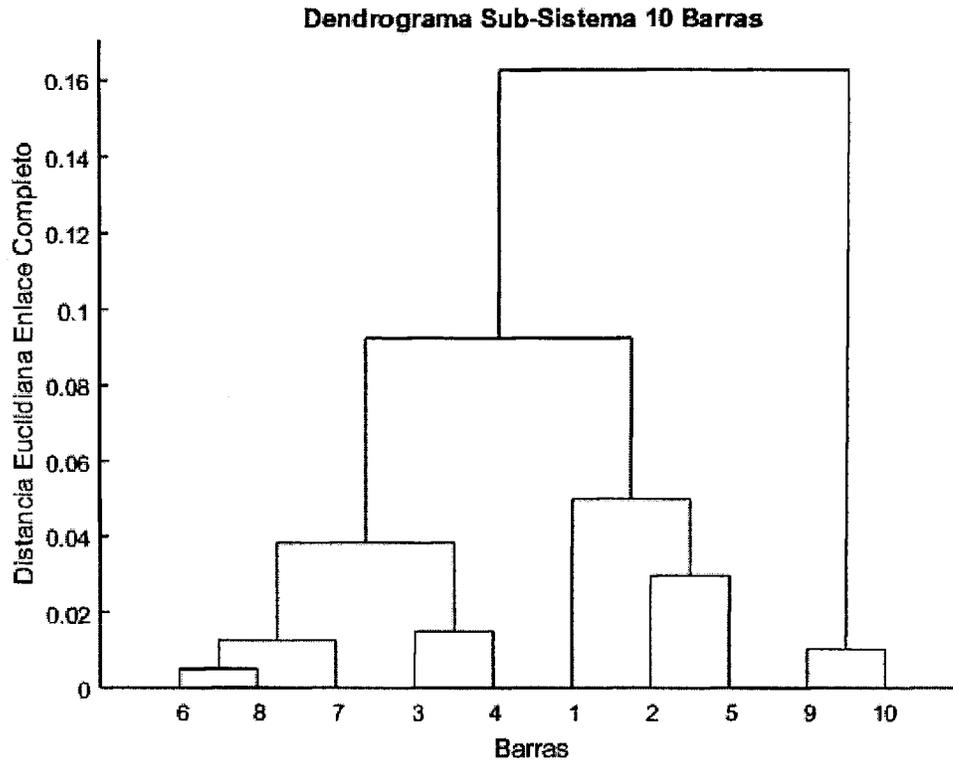


Figura 3.3: Dendrograma Sub-Sistema de 10 Barras

En el eje X del dendrograma se representan las distintas barras del sistema, mientras que el eje Y presenta las distancias euclidianas, para los enlaces completos durante la formación de los grupos. En ella se puede apreciar que las barras más similares son la 6 y la 8 y por ende es el primer enlace que de forma, seguidos por las barras 9 y 10. Luego el primer grupo formado se une con la barra 7 y forman un nuevo grupo. De esta forma se dan agrupamientos escalonados hasta que todos los elementos pasan a un único grupo. Lo que se hace gráficamente para este caso es trazar una línea horizontal hasta obtener tantas intersecciones como grupos deseados. En este caso cerca del valor de 0,1 en el eje Y se logran las 3 intersecciones, de las cuales cada una es un grupo formado por los elementos incluidos en su árbol.

Posterior a la formación de los grupos, se deben considerar las limitaciones físicas para la localización de los monitores. Para ello se crea un vector

binario que indica si la barra tiene un poste asignado o no. Para este caso en particular, como puede observarse en la figura 3.2, los puntos negros representan postes del sistema y cada barra está cerca de un único poste y por ello todas tienen un poste asignado. Lo anterior conlleva al siguiente comportamiento del vector (3.3):

$$\begin{matrix} B1 \\ B2 \\ B3 \\ B4 \\ B5 \\ B6 \\ B7 \\ B8 \\ B9 \\ B10 \end{matrix} = \begin{bmatrix} 1 \\ 1 \\ 1 \\ 1 \\ 1 \\ 1 \\ 1 \\ 1 \\ 1 \\ 1 \end{bmatrix} \quad (3.3)$$

De acuerdo al análisis del vector de selección (3.3), cada una de las barras es apta para la colocación de un monitor. Posteriormente los grupos son analizados de forma independiente para obtener primeramente el centroide del grupo, el cual es un vector fila obtenido del grupo. Luego de obtener el vector centroide se procede a calcular la distancia euclidiana entre ese vector y los demás elementos del grupo. Una vez obtenidas las distancias se selecciona el vector que se encuentre a menor distancia del centroide, que es apto para colocar un monitor de acuerdo al vector de selección, y en este se coloca el monitor.

De acuerdo con este análisis se obtienen las siguientes barras:

1. Grupo 1: 6
2. Grupo 2: 2
3. Grupo 3: 9

Estas son las barras donde se ubican los monitores de acuerdo a los grupos obtenidos durante el análisis de la matriz T .

Luego de la ubicación de los monitores se procede a buscar el comportamiento de las tensiones con respecto a las barras donde esos monitores se encuentran, para ello se utiliza la métrica. La métrica es calculada para cada grupo en las distintas condiciones de falla y para cada una de las diferentes matrices mencionadas en la sección 3.2. Los resultados de las métricas se pueden observar en el cuadro 3.2:

Grupo	Matriz 1	Matriz 2	Matriz 3	Matriz 4
1	0,984	0,971	0,993	0,995
2	0,970	0,943	0,987	0,989
3	0,996	0,993	0,999	0,999
Grupo	Matriz 5	Matriz 6	Matriz 7	Matriz 8
1	0,994	0,971	0,993	0,995
2	0,989	0,943	0,987	0,989
3	0,999	0,993	0,999	0,999
Grupo	Matriz 9	Matriz 10	Matriz C.N	
1	0,994	0,971	1,000	
2	0,989	0,943	1,000	
3	0,999	0,993	1,000	

Cuadro 3.2: Métrica caso de 10 barras

En el cuadro 3.2 se presentan las mínimas métricas obtenidas en cada uno de los casos presentados. Por ejemplo: el grupo 1 en las condiciones presentadas en la matriz 1 las cuales es un cortocircuito trifásico presenta una métrica mínima de 0.984. Este mismo grupo para la matriz 2, en condición de cortocircuito monofásico en la fase 1 y observando la fase 1, genera un valor mínimo de 0.971. De esta forma se van analizando cada uno de los grupos en las distintas condiciones de cortocircuito.

Una vez analizado el comportamiento de este grupo para la totalidad de condiciones se selecciona la métrica mínima para este conjunto, que en este caso tiene un valor de 0.943 y se da para el grupo 2 cuando se analiza la matriz 10 que representa una falla monofásica en la fase 3 observando la fase 3. Esta métrica significa que para esta ubicación de monitores, las tensiones de los monitores van representar en el peor de los escenarios, las tensiones del sistema con una exactitud mínima del 94.3%.

El siguiente paso es repetir este mismo análisis para los grupos generados a partir de las matrices restantes. Una vez que se han analizado todos los conjuntos de monitores, se va a seleccionar el conjunto con la mayor métrica, lo que también representa el conjunto que pueda representar de forma más exacta el comportamiento del sistema. Para este caso presentado, la mejor métrica se obtiene con el conjunto generado a partir de la matriz 1, el cual fue presentado anteriormente.

3.5.2. Sistema completo caso de 10 monitores

El primer escenario a ser analizado es colocar de forma óptima 10 monitores en la red. Los resultados se pueden observar en la figura 3.4.

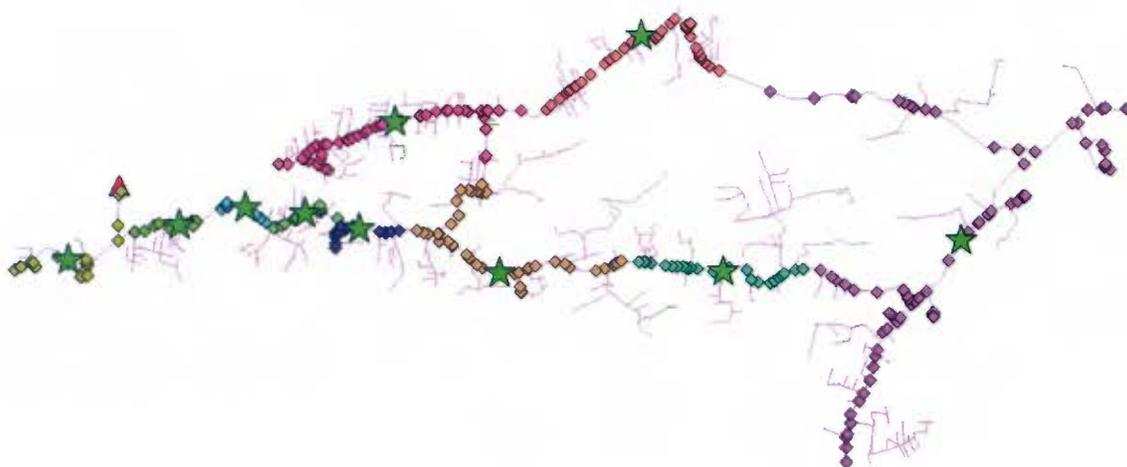


Figura 3.4: Ubicación y grupos para 10 monitores

Como puede observarse en la figura 3.4, se crearon 10 grupos distintos. Mediante el uso del programa QGIS se crea la figura para corroborar los resultados y poder interpretarlos de forma adecuada. Cada grupo se representa con un color distinto.

Como se puede ver en la figura 3.4 se generaron 10 grupos y la barra más cercana al centroide que tiene un poste asignado está representada por una estrella color verde que representa el monitor. Para este caso la métrica para el mejor conjunto es de 0.8515. Esto significa que para el peor de los escenarios analizados, el grupo con condiciones más variantes tendrá una precisión de 85.15 % de los valores reales en la red. Se debe considerar que en este porcentaje se logra con monitores en un 2.76 % de la red.

3.5.3. Sistema completo caso de 20 monitores

Otro escenario a ser analizado es colocar de forma óptima 20 monitores en la red. Los resultados se pueden observar en la figura 3.5.

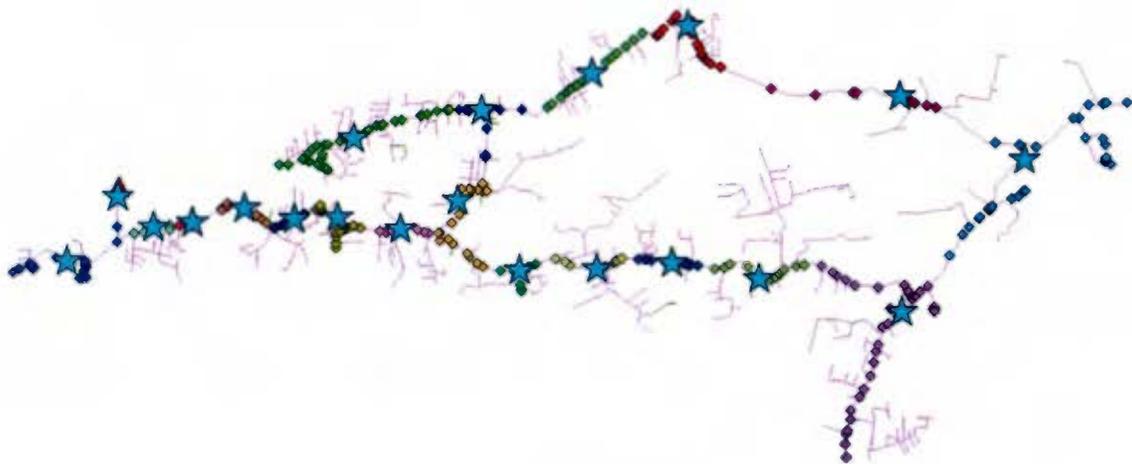


Figura 3.5: Ubicación y grupos para 20 monitores

Como puede observarse en la figura 3.5, se crearon 20 grupos distintos. Mediante el uso del programa QGIS se crea la figura para corroborar los resultados y poder interpretarlos de forma adecuada. Cada grupo se representa con un color distinto. Como se puede ver en la figura se generaron 20 grupos y la barra más cercana al centroide que tiene un poste asignado

está representada por una estrella color verde que representa el monitor. Para este caso la métrica para el mejor conjunto es de 0.894. Esto significa que para el peor de los escenarios analizados, el grupo con condiciones más variantes tendrá una precisión de 89.4% de los valores reales en la red. Se debe considerar que en este porcentaje se logra con monitores en un 5.52% de la red.

3.5.4. Comportamiento general de la ubicación óptima

El algoritmo fue probado para distintas cantidades de monitores y se pudo determinar que la cantidad de monitores y la métrica no tienen una relación lineal. El gráfico presentado en la figura 3.6 ilustra el patrón de comportamiento para este sistema.



Figura 3.6: Tendencia de la métrica en localización óptima

De acuerdo con la figura 3.6, la métrica de 90 % es alcanzada cuando se colocan 25 monitores, lo cual representa un 6.91 % de la red. Se debe tener en consideración que estos valores se obtienen durante condiciones de falla. En condiciones normales de operación, se obtiene una métrica del 99.9 %. Para este caso en particular, el valor mostrado de la métrica se obtiene cuando se presenta una falla monofásica en la fase 2 y se observa esa misma fase 2 para el grupo número 6.

Se puede apreciar también en el gráfico 3.6 que posterior a este punto la tendencia a incrementar la métrica por incremento en cantidad de monitores se disminuye sustancialmente.

También se puede observar que existen áreas planas, donde no hay una mejora aparente en el sistema según la gráfica. Debe considerarse en estos casos, que la métrica mostrada representa el escenario más adverso, sin embargo si se da una mejora en los grupos, que en estos casos no representan el peor escenario. Este gráfico 3.6 es una herramienta útil para determinar hasta que puntos es rentable realizar la inversión en monitores ya que como se puede apreciar, con un pequeño porcentaje de la red con monitores se pueden obtener datos muy precisos superiores al 90 %. Como se puede apreciar el algoritmo en la parte inicial tiene una pendiente muy pronunciada y conforme se van aumentando los monitores, a partir aproximadamente de la métrica del 95 %, se la condición se mantiene. Sin duda alguno esta una situación específica para este caso en particular, sin embargo se obtiene beneficios bastante significativos desde el inicio de la localización.

3.6. Algoritmo de expansión

3.6.1. Resultados de expansión

Para ilustrar el algoritmo de expansión se va a utilizar en la red en estudio la ubicación óptima de 10 monitores presentada en la sección 3.5.2 y se añadirán 10 medidores adicionales. La siguiente figura 3.7 muestra la

ubicación óptima de los 10 monitores iniciales y la expansión a 20 monitores.

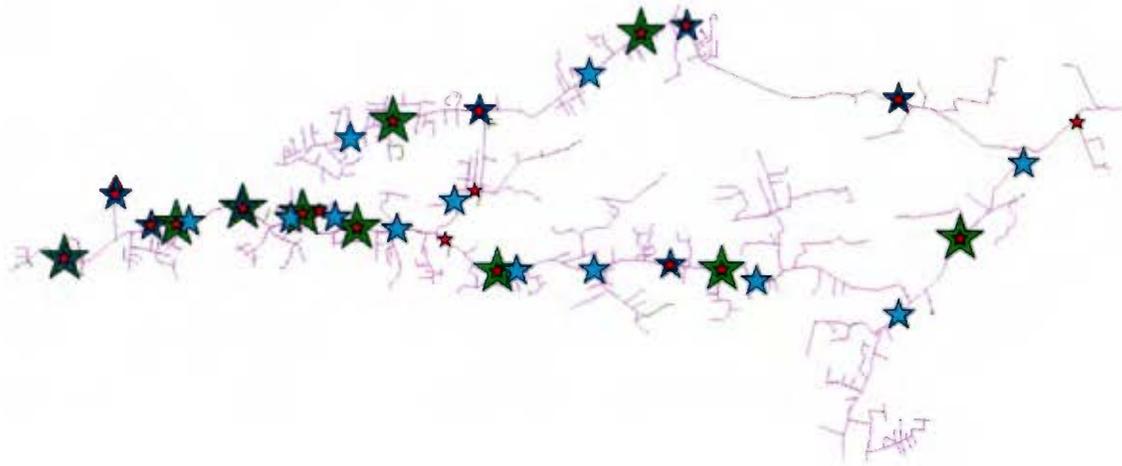


Figura 3.7: Ubicación inicial de 10 monitores y expansión a 20.

En la figura 3.7 las estrellas color verde representan la ubicación óptima de los primeros 10 monitores. Las estrellas color azul representan la ubicación óptima para 20 monitores la cual fue presentada anteriormente en la sección 3.5.2. Las estrellas color rojo representan la ubicación de los monitores en la expansión.

Se puede ver que las ubicaciones iniciales fueron preservadas, por ello las estrellas verdes contienen una estrella roja. Las demás estrellas rojas son las ubicaciones de los nuevos monitores. Estas nuevas estrellas van a estar localizadas en el centroide de los nuevos grupos para los casos en que los grupos no tengan un monitor previamente.

Para este caso en particular se debe considerar que la ubicación original de los 10 monitores fue generada a partir de la matriz 4 y la ubicación expandida que entrega la mayor métrica es generada por la matriz 1, por esta razón los elementos tienen la ubicación mostrada.

En el siguiente gráfico 3.8 se muestra en una línea que representa la ubicación óptima en contraste con una segunda línea que ilustra el caso de la expansión.



Figura 3.8: Expansión de 10 a 20 monitores

En la figura 3.8 se puede observar el comportamiento de la métrica en el caso de la expansión. Para este caso en particular se dio una mejora en la métrica al pasar de 0.851 a 0.876. Cuando se compara con la ubicación óptima para 20 monitores se tiene un valor de 0.894 lo cual presenta una diferencia del 2.1 % para la misma cantidad de monitores.

3.6.2. Resultados de expansión

El sistema en análisis se sometió a distintos casos de simulación para verificar el comportamiento de la expansión. La prueba consistió en iniciar

el sistema en los casos óptimos para 5 monitores y proceder a expandir el caso inicial, en pasos de 5 monitores hasta 250 monitores. Posteriormente se incrementa a 10 monitores y se hace el barrido de expansión de la misma manera. Este proceso se repitió hasta iniciar con 250 monitores. Lo que se busca es mostrar el funcionamiento y ver las tendencias de los casos de expansión en contraste con los casos óptimos, para valorar en que situaciones o puntos vale la pena una expansión y en caso de la misma si mantener ubicaciones actuales o reubicarlos. Esto se muestra en las figuras 3.9, 3.10 y 3.11 a continuación.

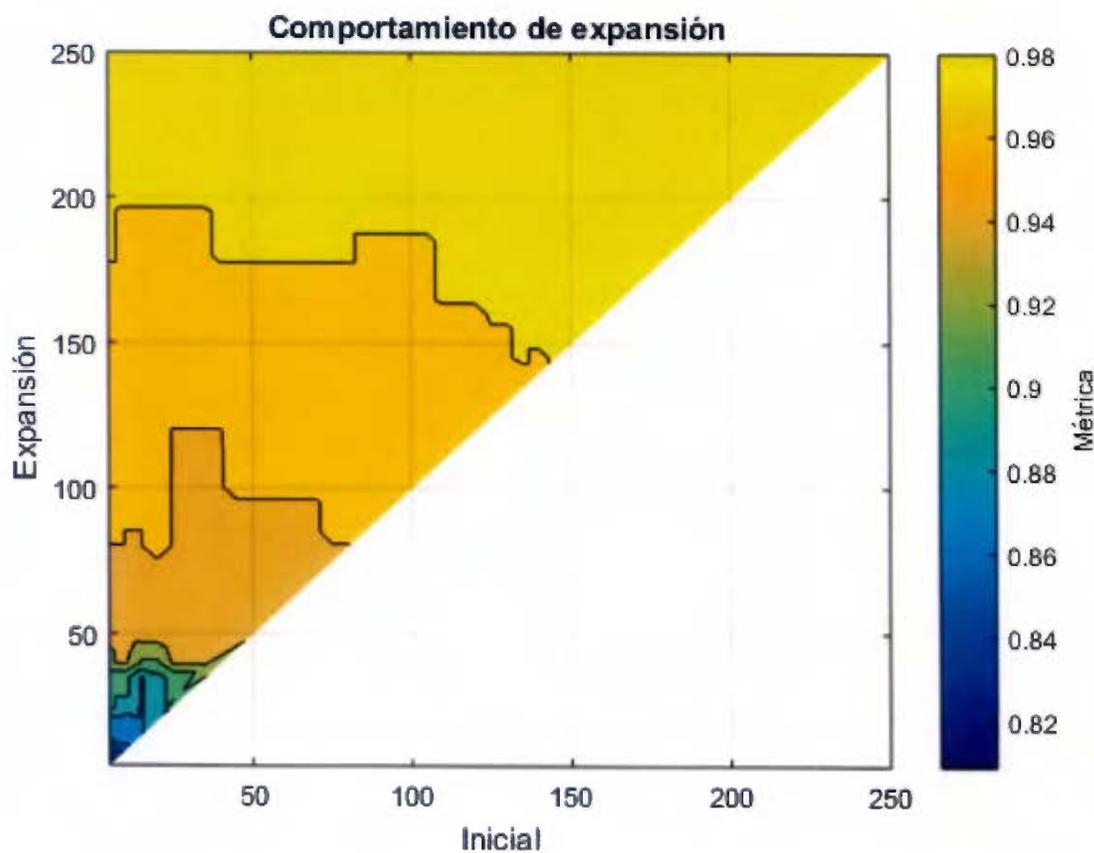


Figura 3.9: Comportamiento de la métrica del sistema

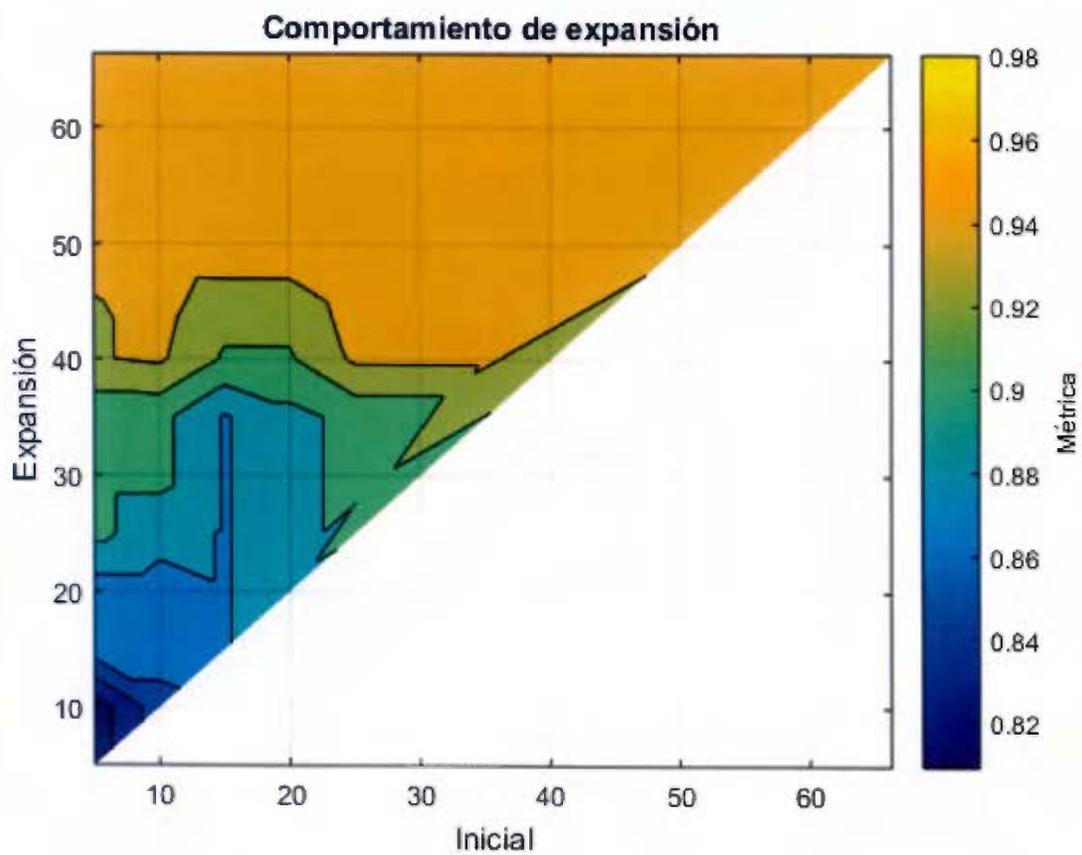


Figura 3.10: Comportamiento de la métrica del sistema etapa inicial

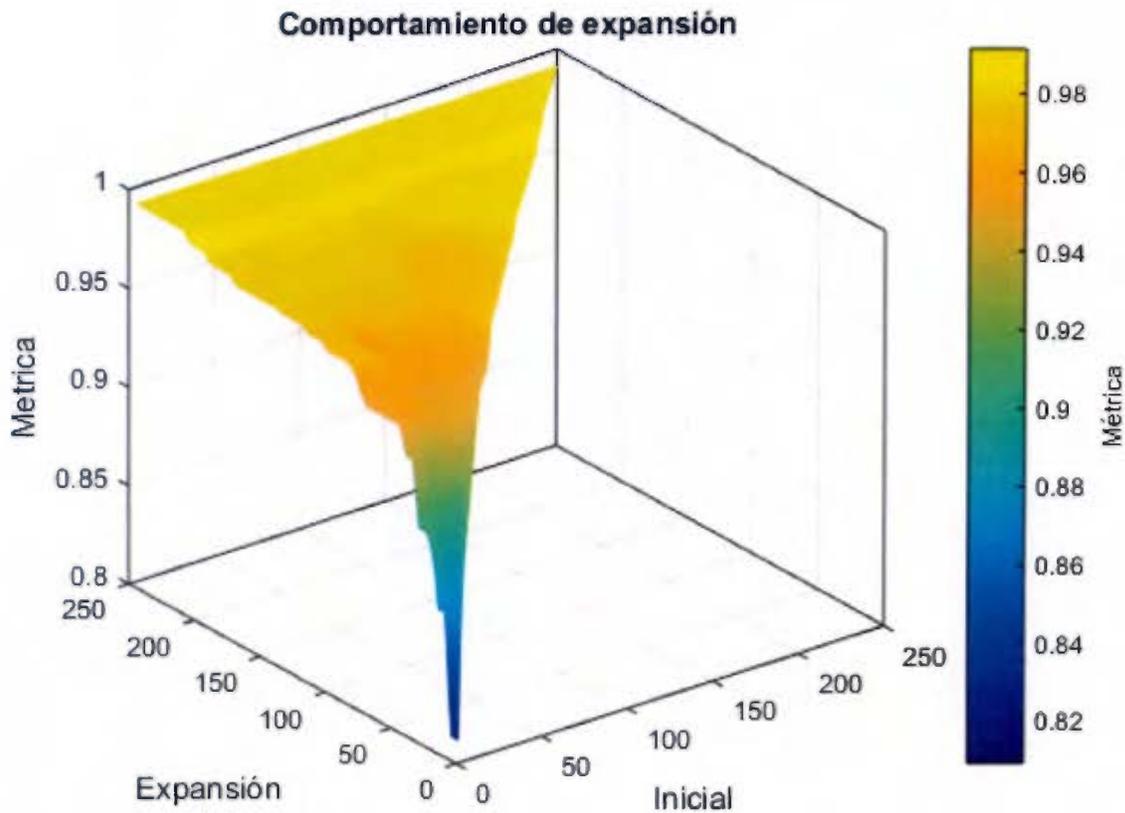


Figura 3.11: Comportamiento de la métrica del sistema 3D

La figura 3.9 representa un esquema en 2 dimensiones del comportamiento de los algoritmos. En el eje x se representa la cantidad inicial de monitores, en el eje y se representa la cantidad de monitores a los que se expande y con los distintos colores se puede observar el comportamiento de la métrica de acuerdo a la escala que se observa al lado derecho de la imagen.

La diagonal que se presenta son las ubicaciones óptimas de los monitores, donde la cantidad inicial es igual que la cantidad expandida. Se debe tener en cuenta a la hora de analizar el gráfico que el programa realiza una linealización de los puntos y por ende existe un margen de error entre la figura y los valores reales, en puntos intermedios que no son múltiplos de 5. Se puede observar como en la mayoría de los casos los cambios de color se dan primero en la diagonal de lado derecho de la gráfica 3.10 que es

donde se muestran las ubicaciones óptimas. Lo anterior es esperable debido a que las ubicaciones en este caso son óptimas. En el centro de la gráfica se observa que las mejoras en la métrica se ven de forma más tardía, debido a que hay un importante porcentaje de las ubicaciones no óptimas definidas inicialmente y por ello las mejoras van a requerir una mayor cantidad de monitores. En el lado izquierdo se como inicialmente existían muy pocos monitores colocados, por ende la mayoría de los elementos van a tener ubicación óptima y los cambios en la métrica son alcanzados de forma más sencilla, similar al lado derecho.

Estos comportamientos se pueden verificar en la figura 3.10 donde hace una acercamiento a la figura 3.9 para poder observar de mejor forma el comportamiento del sistema en sus etapas iniciales. De igual forma se tiene que en la figura 3.11 se representa la misma información desde una perspectiva tridimensional.

Capítulo 4

Conclusiones y recomendaciones

4.1. Conclusiones

Este proyecto permitió desarrollar un nuevo método de localización de monitores de tensión para una red eléctrica de distribución. Y con ello se cumple el objetivo general del proyecto.

Para desarrollar este método se exploró a través de distintos métodos existentes, para lograr extraer los procesos en común y desarrollar un algoritmo nuevo. Entre las innovaciones se tiene que no requiere, a diferencia de los demás algoritmos, tensiones de retención para considerar o no las fallas, este por el contrario se enfoca en buscar comportamientos similares de las barras para generar los grupos y ubicar los monitores en el centroide basándose en el concepto de los radios o alcances.

Para el algoritmo se utilizó el agrupamiento jerárquico, debido a que con este método se permite una adecuada trazabilidad del proceso. Esta trazabilidad hace uso de los dendrogramas para una mejor comprensión de las formaciones de los grupos. Además debido a que se proponen algoritmos de expansión y se trata dentro de lo posible conservar estructuras semejantes, este tipo de agrupamiento permite las expansiones debido a su forma de operación.

El proyecto permitió incorporar elementos que no eran considerados en sus algoritmos actuales como son restricciones físicas como la ubicación de

los postes en el sistema para la colocación de los monitores lo cual otorga valor adicional al algoritmo al poder ser aplicado de forma más útil en casos reales. Esto lo puede realizar y se puede visualizar gráficamente mediante el programa QGIS que permite observar la red y es donde finalmente se van a observar las ubicaciones de los elementos, de esta forma se puede otorgar al usuario la información de manera más comprensible y se puede visualizar de forma sencilla la eficacia del algoritmo.

Se realizaron una serie de simulaciones de flujos de potencia en la red en estudio mediante el programa OpenDSS, y debido a que se trabaja directamente con los resultados obtenidos de las simulaciones se puede comprobar la eficiencia del método mediante la métrica propuesta.

Se desarrollaron una serie de algoritmos en Matlab R2015a que permiten: la ubicación óptima de monitores para una cantidad de monitores definida por el usuario, la ubicación óptima y cantidad mínima de monitores para lograr una métrica determinada y un tercer algoritmo que entrega las nuevas ubicaciones de los medidores para un caso de expansión en la cual el usuario define la cantidad actual de monitores con los que cuenta en la ubicación óptima y el algoritmo entrega las ubicaciones de los nuevos medidores conservando el esquema inicial.

El algoritmo no se limita al análisis de una falla, por el contrario explora distintas condiciones de falla, las cuales permiten tanto la generación de grupos, como la evaluación de los mismos. De esta forma se puede tener un panorama más completo del sistema.

4.2. Recomendaciones

De acuerdo al Análisis Técnico-Financiero de la Generación Distribuida en la CNFL 2015 [10] se determinó que las principales empresas de distribución del país actualmente no cuentan con sistemas de monitoreo de calidad de la energía en sus sistemas de distribución. Por ello el sistema propuesto puede ser utilizado para realizar una primera incorporación de los mismos

en la red para de esta forma mejorar los esquemas de información y control en la red.

Una vez que se utiliza el algoritmo para la ubicación óptima, se puede utilizar el algoritmo de expansión para valorar futuras incorporaciones de monitores en la red. Si a estas se les da un peso económico, se permite tener una mejor perspectiva sobre la ruta a tomar durante una expansión. De tal forma que llega a ser una herramienta de mucha utilidad para temas de planificación.

Para darle continuidad al proyecto se podría implementar como una herramienta directa del software OpenDSS, que permita la introducción de los parámetros adicionales mediante una interfaz gráfica y genere las ubicaciones de los monitores en las condiciones deseadas.

Debido a la estructura de las matrices y como son interpretadas por el algoritmo, es posible adaptar más condiciones de falla en las líneas, de ser necesario, sin una modificación significativa del algoritmo.

Otro de los elementos que se pueden incorporar, que es utilizado por los otros algoritmos es añadir funciones de localización de las fallas, con las ubicaciones propuestas de los monitores, esto ampliaría la funcionalidad del algoritmo significativamente.

Bibliografía

- [1] U. E. I. Administration. (2016) International energy outlook 2016. [Online]. Available: [http://www.eia.gov/forecasts/ieo/pdf/0484\(2016\).pdf](http://www.eia.gov/forecasts/ieo/pdf/0484(2016).pdf)
- [2] G. Valverde and T. Van Cutsem, “Model predictive control of voltages in active distribution networks,” *IEEE Trans. Smart Grid*, vol. 4, no. 4, pp. 2152–2161, Dec. 2013.
- [3] P. Piyadanai and O. Anaya-Lara, “Adaptive zone identification for voltage level control in distribution networks with dg,” 2012.
- [4] V. Rajkumar. (2012) Optimal planning of distributed generation systems in distribution system: A review. [Online]. Available: <http://dx.doi.org/10.1016/j.rser.2012.05.020>
- [5] Ciemat. (2006) Situación energética del mundo, europa y españa. [Online]. Available: <http://www.energiasrenovables.ciemat.es/especiales/energia/index.htm>
- [6] L. Rokach and M. Oded. (2010) Clustering methods. [Online]. Available: <http://www.ise.bgu.ac.il/faculty/liorr/hbchap15.pdf>
- [7] L. E. N. B. Análisis de cúmulos. [Online]. Available: http://allman.rhon.itam.mx/~lnieto/index_archivos/Modulo62.pdf
- [8] S. García-Martínez and E. Espinosa-Juárez, “Analysis of system operation state influence on the optimal location of voltage sag monitors by applying tabu search,” in *North American Power Symposium (NAPS)*, 2010.
- [9] W. Zvietcovich, E. Cardoso, and J. Manso, “Optimal allocation of

meters for monitoring voltage sags and swells using the grasp-vns optimisation algorithm,” in *Innovative Smart Grid Technologies Latin America (ISGT LA), 2013 IEEE PES Conference*, 2013.

- [10] G. Valverde, J. Lara, L. A., and J. Rojas, “Análisis técnico-financiero de la generación distribuida en la cnfl,” 2015.