

**LOCALIZACIÓN ÓPTIMA DE MONITORES DE CALIDAD DE POTENCIA PARA
LA ESTIMACIÓN DE ESTADO ARMÓNICO EN SISTEMAS DE DISTRIBUCIÓN
DE ENERGÍA ELÉCTRICA**

**DANIEL FELIPE ALMEIDA ARGÜELLO
SERGIO ARNOLDO VELANDIA CÁCERES**

**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
FACULTAD DE INGENIERÍAS FÍSICO MECÁNICAS
ESCUELA DE INGENIERÍAS ELÉCTRICA, ELECTRÓNICA Y DE
TELECOMUNICACIONES
BUCARAMANGA**

2015

**LOCALIZACIÓN ÓPTIMA DE MONITORES DE CALIDAD DE POTENCIA PARA
LA ESTIMACIÓN DE ESTADO ARMÓNICO EN SISTEMAS DE DISTRIBUCIÓN
DE ENERGÍA ELÉCTRICA**

DANIEL FELIPE ALMEIDA ARGÜELLO

SERGIO ARNOLDO VELANDIA CÁCERES

Trabajo de grado para optar al título de Ingenieros Electricistas

Director

JAIRO BLANCO SOLANO

Magíster Ingeniero Electricista

Codirector

JOHANN FARITH PETIT SUÁREZ

Doctor Ingeniero Electricista

**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
FACULTAD DE INGENIERÍAS FÍSICO MECÁNICAS
ESCUELA DE INGENIERÍAS ELÉCTRICA, ELECTRÓNICA Y DE
TELECOMUNICACIONES
BUCARAMANGA**

2015

DEDICATORIA

En primer lugar, le agradezco a Dios por haberme dado salud y permitido vivir estos últimos cinco años de vida universitaria en los cuáles me he formado como profesional y persona a través de todas las vivencias que he recogido.

A mi madre, Inés Argüello Niño, por ser una fuente de amor y cariño infinita hacia mí y haber estado pendiente de cada una de las situaciones difíciles durante todo el trasegar universitario brindándome todo de sí en procura de alcanzar mis logros.

A mi padre, Marcos Almeida Rueda, por enseñarme que todas las cosas requieren esfuerzo y dedicación y ser siempre una luz inspiradora en mi accionar hacia todas las tareas a emprender.

A mis hermanos, Natalia Almeida y Marcos Fabian Almeida, por brindarme un acompañamiento en todas las actividades realizadas y el conocimiento del contar con un apoyo incondicional en cada una de las situaciones a futuro.

A mi compañero de trabajo de grado, Sergio Velandia Cacéres, por ser un amigo en todas las tareas realizadas y por ser un compañero incondicional en cada uno de los espacios compartidos. También, a todos mis amigos, en especial a los del garaje que forman parte integral de este proceso.

Por último, este trabajo va a la memoria de mi tío Elibardo Argüello, que desde el cielo estará guiando cada uno de mis pasos.

Daniel Felipe Almeida Argüello

CONTENIDO

	Pág.
INTRODUCCIÓN	17
1. METODOLOGÍAS EXISTENTES PARA LA LOCALIZACIÓN ÓPTIMA DE MONITORES ORIENTADAS A LA ESTIMACIÓN DE ESTADO ARMÓNICO	23
1.1 INTRODUCCIÓN A LA OBSERVABILIDAD	23
1.2 DESCRIPCIÓN DE LAS METODOLOGÍAS IDENTIFICADAS EN LA LITERATURA.....	25
1.2.1 Localización óptima de monitores para la estimación de estado armónico considerando parámetros de incertidumbre en redes de distribución.....	26
1.2.2 Técnica simple para localización de monitores hacia la estimación de armónicos en sistemas eléctricos de potencia	29
1.2.3 Un método de localización hacia la medición óptima para estimación de estado armónico en sistemas de potencia.....	31
1.3 CONCLUSIONES DE LAS METODOLOGÍAS DESCRITAS	34
1.4 INTRODUCCIÓN AL MÉTODO SELECCIONADO.....	36
2. MÉTODO PARA LOCALIZACIÓN ÓPTIMA DE MONITORES DE CALIDAD DE LA POTENCIA PARA ESTIMACIÓN DE ESTADO ARMÓNICO EN SISTEMAS DE DISTRIBUCIÓN DE ENERGÍA ELÉCTRICA.	39
2.1 MÉTODO DE OBSERVABILIDAD	39
2.1.1 Vector de localización (AV)	41
2.1.2 Regla de la conectividad.....	43
2.1.3 Regla de la redundancia	46
2.1.4 Regla de la co-conectividad.....	50
2.1.5 Análisis de observabilidad.....	52
Figura 16. POV para el sistema de ejemplo.	53

2.1.6 Número de posiciones nulas del vector de localización (NOVN)	54
2.2 PROCESO DE OPTIMIZACIÓN	55
2.2.1 Función Objetivo.	55
2.2.2 Algoritmos Genéticos	58
2.3 MÉTODO PARA LA DETERMINACIÓN DE LAS NODOS CRÍTICOS A MEDIR EN LOS SISTEMAS DE DISTRIBUCIÓN	67
2.3.1 Procedimiento de regresión y correlación	68
2.3.2 Análisis de los resultados obtenidos de los procesos de regresión y correlación	71
2.4 ESTRUCTURA DEL MÉTODO PROPUESTO	74
2.4.1 Estructura general del método de observabilidad y proceso de optimización	74
2.4.2 Estructura general de detección de nodos críticos en sistemas de distribución de energía eléctrica	76
3. IMPLEMENTACIÓN DEL MÉTODO PROPUESTO.....	80
3.1 SISTEMA DE 14 BARRAS DEL IEEE	80
3.1.1 Datos de entrada y configuración obtenida.....	81
3.1.2 Desarrollo del método de observabilidad con la configuración obtenida para el sistema de 14 barras.....	84
3.2 SISTEMA DE 34 BARRAS DEL IEEE	92
3.2.1 Localización óptima de monitores para el sistema de 34 barras del IEEE....	92
3.2.2 Detección de nodos críticos para la obtención de la configuración óptima para el sistema de 34 barras.....	95
3.2.3 Desarrollo del método de observabilidad con la configuración óptima para el sistema de 34 barras.	103
3.3 ANÁLISIS GENERAL DE LOS RESULTADOS DE LOS CASOS DE ESTUDIO	112
4. CONCLUSIONES	114
5. TRABAJOS FUTUROS.....	116
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	117

BIBLIOGRAFÍA..... 119
ANEXOS 121

LISTA DE FIGURAS

	Pág.
Figura 1. Diagrama de flujo del enfoque.	27
Figura 2. Diagrama de bloques representativo de la metodología de observabilidad.	40
Figura 3. Sistema de ejemplo para análisis de observabilidad.	41
Figura 4. Vector de localización para el sistema de ejemplo.	43
Figura 5. Representación de conexión trifásica-monofásica.	44
Figura 6. Matriz de conectividad para el sistema de ejemplo.	45
Figura 7. Vector de conectividad para el sistema de ejemplo.	46
Figura 8. RFM para el sistema de ejemplo.	47
Figura 9. RTM para el sistema de ejemplo.	48
Figura 10. RFV para el sistema de ejemplo.	49
Figura 11. RTV para el sistema de ejemplo.	49
Figura 12. RV para el sistema de ejemplo.	49
Figura 13. CcV para el sistema de ejemplo.	51
Figura 14. Ejemplo de barra conocida.	52
Figura 15. Ejemplo de barra conectada.	52
Figura 16. POV para el sistema de ejemplo.	53
Figura 17. Configuración empleada en la monitorización de señales armónicas.	56
Figura 18. Diagrama de flujo del algoritmo genético implementado.	60
Figura 19. Ejemplo de cruce monopunto.	65
Figura 20. Operador de mutación aleatoria bit a bit.	66
Figura 21. Representación matricial del modelo de correlación y regresión.	71
Figura 22. Estructura principal de la metodología.	75

Figura 23. Diagrama de flujo para la obtención de la configuración óptima de monitores.	77
Figura 24. Sistema de 14 barras de la IEEE con la localización de los monitores encontrada.	83
Figura 25 Análisis de resultados del Algoritmo Genético Simple para el sistema de 14 barras.	91
Figura 26. Sistema de 34 barras implementado en ATP.	96
Figura 27. Matriz obtenida para la fase A.	97
Figura 28. Comparación de los datos obtenidos para los nodos 800 y 840.	98
Figura 29. Comparación de los datos obtenidos para los nodos 858 y 864.	99
Figura 30. Topología del sistema de 34 barras con el esquema de monitorización encontrado.	104
Figura 31. Resultados del Algoritmo Genético Simple.	111

LISTA DE TABLAS

	Pág.
Tabla 1. Barras y secciones del sistema de ejemplo.	42
Tabla 2. Posible agrupación para los datos de un sistema de 7 barras.	70
Tabla 3. Sumatoria de filas para la Figura 2.20.	72
Tabla 4. Valores en p.u correspondiente al sistema de ejemplo.	73
Tabla 5. Valores a comparar en el sistema de Figura 2.20.	73
Tabla 6. Configuración del sistema de monitorización para el sistema de 14 barras.	81
Tabla 7. Datos de entrada para la simulación del sistema de 14 barras.	81
Tabla 8. Vector costo ingresado en la metodología de 14 barras.	82
Tabla 9. Resultados obtenidos para el sistema de 14 barras.	82
Tabla 10. Vector de localización (AV) para la configuración encontrada	85
Tabla 11. Vector de conectividad para sistema de 14 barras.	86
Tabla 12. RV para configuración de 14 barras	87
Tabla 13. CcV para configuración de 14 barras.	88
Tabla 14. POV para la configuración de 14 barras resultante.	89
Tabla 15. Vector de Observabilidad (OV) para la configuración de 14 barras	90
Tabla 16. Parámetros de entrada para el sistema de 34 barras del IEEE.	92
Tabla 17. Vector costo de entrada para la metodología de 34 barras.	93
Tabla 18. Primera configuración de monitores obtenida para el sistema de 34 barras.	94
Tabla 19. Segunda configuración alternativa de monitores para el sistema de 34 barras.	94

Tabla 20. Tercera configuración alternativa de monitores para el sistema de 34 barras.....	95
Tabla 21. Características de la carga ingresada en ATP.....	96
Tabla 22. Sumatoria de filas de la matriz resultante para la fase A.	100
Tabla 23. Valores obtenidos para la comparación de configuraciones.	101
Tabla 24. Tabla comparativa de configuraciones según la metodología propuesta.	102
Tabla 25. Vector de localización AV para la configuración óptima.....	105
Tabla 26. Vector de conectividad para la configuración óptima.	106
Tabla 27. Vector de redundancia para la configuración óptima.	107
Tabla 28. Vector de co-conectividad para la configuración óptima.	108
Tabla 29. Vector de Pre-observabilidad para la configuración óptima.	109
Tabla 30. Vector de Observabilidad para la configuración óptima.	110

LISTA DE ANEXOS

	Pág.
ANEXO A. Matrices implementadas para el método de observabilidad	121
ANEXO B. Análisis de costos	122
ANEXO C. Códigos implementados en MATLAB	125

RESUMEN

TÍTULO: LOCALIZACIÓN ÓPTIMA DE MONITORES DE CALIDAD DE POTENCIA PARA LA ESTIMACIÓN DE ESTADO ARMÓNICO EN SISTEMAS DE DISTRIBUCIÓN DE ENERGÍA ELÉCTRICA.*

AUTORES: DANIEL FELIPE ALMEIDA ARGÜELLO**
SERGIO ARNOLDO VELANDIA CÁCERES

PALABRAS CLAVE:

Sistemas de distribución, estimación de estado armónico, análisis de observabilidad, leyes de Kirchoff, algoritmos genéticos, correlación, regresión.

DESCRIPCIÓN:

Los armónicos presentes en las señales de tensión y corriente en la red eléctrica constituyen uno de los fenómenos más comunes que van en detrimento de la calidad de la potencia eléctrica, ocasionando la aparición de sobrecalentamiento de dispositivos de la red y disparos súbitos de protecciones de motores eléctricos. Conforme a lo anterior, se ha hecho necesario conocer de manera adecuada el estado de las señales eléctricas en las redes de distribución con la ayuda de monitores de calidad de potencia. Sin embargo, el costo de estos y la infraestructura necesaria para su instalación y funcionamiento no permiten la localización de los monitores en cada barra de la red, siendo una tarea importante la selección del conjunto de nodos que se equipen con estos monitores. Específicamente, este trabajo de grado propone una metodología que aborda esta situación desde el punto de vista de la minimización del costo global del sistema de monitorización teniendo en cuenta la posterior estimación de estado armónico de las variables eléctricas del sistema. El planteamiento de la metodología propone la búsqueda de las configuraciones de monitores más óptimas en cuanto al costo total de las mismas por medio de un algoritmo genético simple, el procedimiento de verificación de la configuración encontrada para la estimación de estado se realiza a través de las leyes de Kirchoff y también se expone un parámetro de decisión para encontrar una única configuración de monitores a partir de un grupo de configuraciones con el mismo costo a partir de un análisis de regresión y correlación. Los resultados de esta herramienta representan un aporte hacia la implementación de los sistemas de monitorización por parte de los operadores de red que buscan el mejoramiento de la prestación del servicio de energía eléctrica.

* Trabajo de investigación

** Facultad de Ingenierías Físico-Mecánicas. Escuela de Ingenierías Eléctrica, Electrónica y de Telecomunicaciones. Director: Jairo Blanco Solano. Codirector: Johann Farith Petit S

ABSTRACT

TITLE: OPTIMUM LOCATION OF POWER QUALITY MONITORS FOR THE ESTIMATION OF THE HARMONIC STATE OF THE ELECTRIC ENERGY DISTRIBUTION.

AUTHORS: DANIEL FELIPE ALMEIDA ARGÜELLO**
SERGIO ARNOLDO VELANDIA CÁCERES

KEY WORDS:

Systems of distribution, estimation of the harmonic state, analysis of observability, Kirchhoff's laws, generic algorithms, correlation, regression.

DESCRIPTION:

The harmonics present in the signs of tension and current flow in the electric network constitute one of the most common phenomena that work in detriment of the quality of electric power allowing the presence of overheating in the devices in the network and sudden triggering of protectors for electric motors. According to this it has been necessary to know in full the state of the electric signals in the distribution network with the help of power quality monitors. However, their cost and infrastructure necessary to install and operate them does not allow for their location in every single bar of the network, making it an important task the selection of the group of nodes that are equipped into the monitors. Specifically, this research proposes a methodology that approaches this issue for me he point of view of minimization of the global cost of the monitoring system having in mind the subsequent estimation of the harmonic state of the electric variables in the system. The planning of this system proposes the research into more optimum configurations of monitors as regard to their cost through a simple generic algorithm. The procedure of verification of the configuration found for the estimation of state is done according to the Kirchhoff law and additionally a parameter of decision is exposed or suggested to find a unique configuration of monitors having always in mind a group of similar configurations with the same cost according to an analysis of correlation and regression. The results of this tool represent a contribution for the implementation of the monitoring systems on the part of the network operators which seek an improvement in the service performance in the field of electric energy.

* Research Work

** Faculty of Physical-Mechanic Engineering. School of Electrical, Electronical and Telecommunications Engineering. Advisor: Jairo Blanco Solano. Co-advisor: Johann Farith Petit S.

INTRODUCCIÓN

Como introducción al trabajo realizado se presenta la justificación y el planteamiento del proyecto, seguido por los objetivos y la organización del documento.

MOTIVACIÓN Y JUSTIFICACIÓN DEL TRABAJO

Los sistemas de distribución de energía eléctrica se caracterizan actualmente por un notable y continuo incremento en la distorsión en estado estable de las formas de onda de tensión y corriente, llamándose a este fenómeno como distorsión armónica. La principal causa del incremento del fenómeno se debe al aumento del uso de cargas no lineales en gran parte de aplicaciones. Este fenómeno implica problemas en la calidad del suministro de energía eléctrica como el sobrecalentamiento de conductores, transformadores y motores, así como corrientes excesivas en el neutro, fenómenos de resonancia entre los elementos del circuito, entre otros. Conforme a esto, es de interés describir el estado de la red eléctrica en cuanto a la distorsión armónica cuantitativamente con el fin de contar con un punto de partida para establecer estrategias de mitigación del mismo. Cabe resaltar, que los problemas de distorsión involucran tanto a la empresa responsable de la red como a los individuos o industrias que acceden a él [1] [2].

Uno de los principales objetivos de la caracterización de la red eléctrica en cuanto a los flujos de armónicos, consiste en establecer responsabilidades para garantizar niveles adecuados de distorsiones armónicas, con el fin de desarrollar operaciones de control y mitigación de este fenómeno. En este sentido, la instalación de un monitor en cada barra de la red eléctrica, en la cual exista una carga industrial o residencial, permite dar solución a este objetivo de manera

confiable y verídica a partir de estrategias de análisis en el punto de acople común, basadas en la dirección de potencia, la impedancia crítica y los índices de corriente en este punto [3]. Sin embargo la ubicación de monitores en cada carga tiene un costo elevado teniendo en cuenta las diferentes restricciones que involucra la configuración del sistema eléctrico, como el costo de los transformadores de corriente y potencial, y el costo propio del monitor. Por lo tanto, surge una herramienta llamada *Harmonic State Estimation* (HSE) con capacidad de suministrar información de la generación y penetración de armónicos a través de la red eléctrica a partir de un grupo de mediciones parciales en el sistema eléctrico [4]. En cuanto al costo del sistema de monitorización, es importante obtener un número mínimo de monitores que brinden los datos suficientes para poder calcular la HSE.

El objetivo principal de este trabajo de grado consiste en establecer estrategias que ayuden a localizar óptimamente los monitores en los sistemas de distribución de energía eléctrica, por medio de la búsqueda de la configuración de monitores que minimice el costo global asociado a la instalación de cada monitor en cada barra de la red eléctrica y además permita determinar de forma única y confiable la HSE.

Mediante este análisis, se busca brindar un aporte hacia los diferentes operadores de red y usuarios que deseen monitorizar, reportar y mitigar los efectos de los armónicos en las redes eléctricas. Además la Universidad Industrial de Santander, específicamente el Grupo de Investigación en Sistemas de Energía Eléctrica (GISEL) como parte de su trabajo investigativo en el análisis y estudio del Estado de la Calidad de la Potencia Eléctrica, centra sus actividades en el desarrollo de trabajos de grado teniendo como uno de sus ejes temáticos esta rama de la ingeniería eléctrica. Por lo tanto, este proyecto de grado servirá como complemento y soporte para la tesis doctoral "*Calidad de la Potencia Eléctrica: Métodos para la estimación de estado de las componentes armónicas y de las*

variaciones de tensión de corta duración en sistemas de distribución en el marco de las redes eléctricas inteligentes”, desarrollada por el Ingeniero y Magíster Jairo Blanco Solano.

PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA DE INVESTIGACIÓN

Debido a la presencia de una alta distorsión armónica a causa de la proliferación de dispositivos electrónicos basados en la electrónica de potencia, los operadores de red están cada vez más preocupados por el seguimiento y la mitigación de este fenómeno, en búsqueda del cumplimiento de niveles mínimos según las normas internacionales¹. Con el fin de alcanzar este objetivo se ha determinado la monitorización permanente de las redes de distribución. Sin embargo, los monitores tradicionales no cumplen con los requerimientos tecnológicos necesarios para la tarea y por lo tanto se requieren monitores con capacidades “Smart metering”. Para los cuáles, la localización de un monitor de calidad de potencia (PQM², por sus siglas en inglés) en cada uno de los nodos del sistema, así como la infraestructura requerida para un sistema masivo de monitorización [5], requeriría de una gran inversión económica.

Conforme a esto, el uso de técnicas de estimación, que para este caso se conoce como “*Harmonic State Estimation*” (HSE), surge como una solución prometedora al problema planteado. El método HSE utiliza datos provenientes de las mediciones en los nodos del sistema que tengan instalados los monitores y consecuentemente desarrollar el proceso de estimación de cada una de las variables de estado, representados en las tensiones de los nodos y las corrientes de línea, que no son directamente medidas.

Para la localización óptima de los monitores en algunos nodos de la red eléctrica, es necesario tener en cuenta las siguientes consideraciones:

¹ 519-2014- IEEE Recommended Practice and Requirements for Harmonic Control in Electric Power Systems

² Power Quality Meter

- El costo de la infraestructura necesaria para la localización de un monitor en un nodo específico.
- La topología de la red eléctrica. Puesto que esta puede contener cargas tanto trifásicas como monofásicas, que deben ser tenidas en cuenta tanto para el costo de la localización de monitores, como las restricciones técnicas introducidas por la interacción entre las variables de estado trifásicas como monofásicas.
- El comportamiento de la red eléctrica en cuanto a la inserción de cargas que inyecten armónicos a la misma, con el fin de determinar las zonas de mayor distorsión en las variables de estado de la misma, esto para tener un parámetro de decisión en cuanto a configuraciones de monitores con el mismo costo y número de medidores.

La validación de los resultados de la metodología de minimización de costos se realiza a través del software MATLAB, en el cual se implementan la metodología en sistemas de transmisión y distribución de ejemplo utilizados en otros trabajos, como el sistema de 14 y 34 barras, con el fin de comparar y analizar los resultados obtenidos. Este método fue adoptado y modificado de [6]. Para la estimación del comportamiento de la red eléctrica se utilizó el programa de simulación de redes eléctricas *Alternative Transient Program (ATP)*, el método empleado fue extraído de [7]. El propósito es combinar los resultados de los métodos para determinar una configuración de monitores de calidad de potencia que sea robusta, confiable y adaptable a sistemas de distribución reales.

OBJETIVOS DEL TRABAJO DE INVESTIGACIÓN

El objetivo general del trabajo de investigación consiste en el diseño de una metodología de localización óptima de monitores de calidad de potencia para la estimación de estado armónico en sistemas de distribución de energía eléctrica. Para ello se proponen los siguientes objetivos específicos:

- Revisar diferentes fuentes bibliográficas que propongan metodologías referentes a la localización óptima de monitores de calidad de potencia, teniendo como eje temático la estimación de estado armónico en sistemas de distribución de energía eléctrica.
- Plantear un método que permita integrar las referencias estudiadas y adicionalmente incluir mejoras respecto a los trabajos anteriores.
- Validar la metodología propuesta mediante simulación en las plataformas MATLAB y ATP-EMTP, utilizando el sistema de distribución de 34 barras, reportado en la base de datos del IEEE.

ESTRUCTURA DEL DOCUMENTO

Este documento se ha dividido en 4 capítulos, descritos brevemente a continuación:

- **Capítulo 1:** Se realiza una revisión teórica acerca de las diferentes metodologías propuestas acerca de la localización óptima de monitores, específicamente se describen las distintas estrategias planteadas en cuanto a la observabilidad del sistema y las distintas implicaciones que conciernen a este cálculo.
- **Capítulo 2:** En este capítulo se expone el fundamento teórico y el modelado del método escogido como referencia, en la cual se identifican las características del método de observabilidad y las condiciones del problema de optimización resueltas mediante un algoritmo genético simple. También se formula una teoría complementaria para la selección final de la localización óptima basándose en el comportamiento armónico de la red de 34 barras. Este procedimiento involucra análisis estadísticos.
- **Capítulo 3:** En este capítulo se muestran los resultados obtenidos en las distintas simulaciones realizadas, las cuales comprenden la localización específica de los monitores en las redes de estudio y los datos de entrada ingresados para obtener estos mismos, junto con el análisis de observabilidad

de la configuración de monitores resultante. Además, se muestra el análisis realizado de los resultados del software ATP para el sistema de 34 barras del IEEE.

- **Capítulo 4:** Se muestran las principales conclusiones obtenidas de acuerdo al resultado de las simulaciones, así como los trabajos que podrían concluir en mejoras hacia lo realizado en el proyecto.

1. METODOLOGÍAS EXISTENTES PARA LA LOCALIZACIÓN ÓPTIMA DE MONITORES ORIENTADAS A LA ESTIMACIÓN DE ESTADO ARMÓNICO

En este capítulo se presenta una revisión de las metodologías referentes a la localización de monitores en redes eléctricas, concretamente aquellas que plantean como restricción la observabilidad completa del sistema con la configuración seleccionada de monitores. Se presentan diferentes métodos para la solución del problema planteado, combinándose estrategias de optimización, así como el desarrollo de la estimación de estado armónica para la identificación de la observabilidad en el sistema. Finalmente, se plantea una comparación descriptiva entre los métodos descritos y se presenta la metodología adoptada para el desarrollo del problema investigación en este trabajo.

1.1 INTRODUCCIÓN A LA OBSERVABILIDAD

La necesidad de caracterizar completamente las señales de tensión y corriente de una red eléctrica, por medio de la localización de unos monitores de calidad de potencia distribuidos a lo largo de posiciones específicas en la topología de la red, permite desarrollar un procedimiento de estimación llamado *Harmonic State Estimation* (HSE).

La expresión para la estimación de estado Armónico está dada por:

$$Y_h = H_h X_h - U_{meas}(h) \quad (1)$$

La Ecuación (1) es válida siempre y cuando por el vector de cantidades medidas Y_h , se puedan obtener todas las variables de estado representadas por el vector X_h , relacionadas a través de la matriz de medidas H_h . El término $U_{meas}(h)$ representa el error en la estimación [8].

La estimación de estado armónico ha sido utilizada para distintos objetivos. En [3] se citan algunas de sus utilidades:

- Caracterizar el comportamiento del sistema y determinar si los niveles armónicos no superan los límites establecidos.
- Monitorizar y hacer el seguimiento de fuentes armónicas, lo cual requiere de sincronización múltiple y mediciones en distintas ubicaciones.
- Determinar el impacto de la distorsión armónica sobre las señales del sistema, permitiendo hacer una caracterización en el nivel de la calidad de la energía suministrada a los consumidores.
- Sus resultados pueden ser usados para estimar y calibrar modelos computacionales.

El análisis de la formulación matemática de la estimación de estado armónico puede ser dividido dentro de tres subcategorías, las cuales están directamente ligadas con la solución del mismo, estas se expresan en [6], [9] y [3]:

- **Sobre-determinado:** Cuando el número de medidas es mayor que el número de variables de estado.
- **Completamente determinado:** Cuando el número de medidas es igual al número de variables de estado.
- **Sub-determinado:** Cuando el número de medidas es menor que el número de variables de estado.

En los problemas sobre-determinados y completamente determinados existe una única solución, mientras que para los problemas sub-determinados pueden existir varias soluciones. Este último caso es el más usual en los sistemas eléctricos debido al limitado equipo de medición que se puede ubicar.

A causa de lo anterior, el procedimiento en el que se evalúa si una alternativa o configuración de monitores permite encontrar una solución única para las variables del sistema, por medio de la Estimación de Estado Armónico, se le denomina Análisis de Observabilidad, o en sus siglas en inglés “Observability Analysis” (OA).

En la siguiente sección se describirán tres metodologías referentes al análisis de observabilidad, que servirán de referencia para la selección del procedimiento a implementar en este trabajo de investigación.

1.2 DESCRIPCIÓN DE LAS METODOLOGÍAS IDENTIFICADAS EN LA LITERATURA

A continuación se presentarán tres metodologías que tienen como eje temático la localización óptima de monitores en sistemas de distribución de energía eléctrica para la estimación armónica. Estas metodologías fueron encontradas en la base de datos del IEEE y cuentan con fechas recientes de publicación.

La descripción realizada a continuación se enfoca en el análisis de la localización óptima, puesto que estos artículos también emplean la estimación de estado armónico con las posibles soluciones resultantes de la optimización. Incluso en las metodologías se emplean elementos de la estimación armónica para poder localizar óptimamente los monitores en la red eléctrica.

El resumen de las metodologías fue extraído de las referencias [8], [10] y [11], respectivamente.

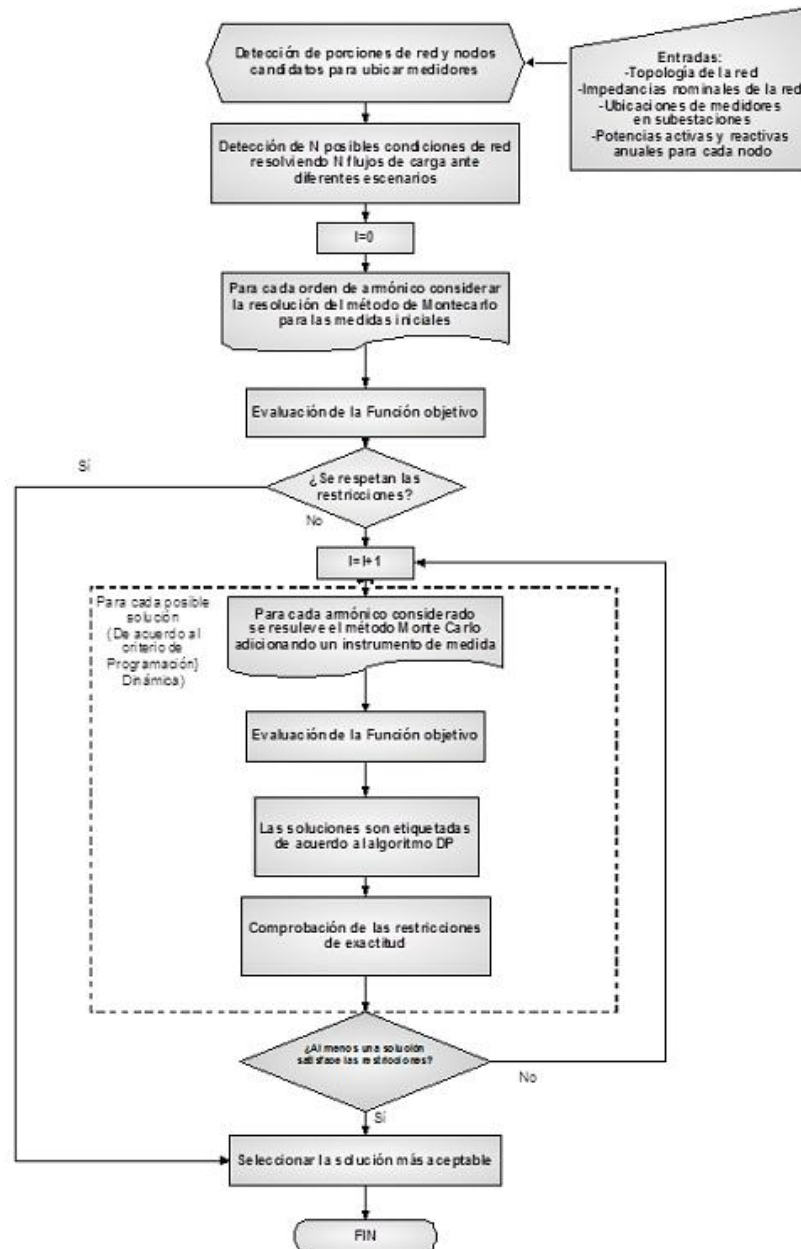
1.2.1 Localización óptima de monitores para la estimación de estado armónico considerando parámetros de incertidumbre en redes de distribución [8]. En algunas aplicaciones de monitorización de la calidad de la potencia, los sistemas distribuidos de medida son requeridos para la evaluación del estado armónico del sistema eléctrico. Sin embargo, en sistemas de distribución, usualmente unos pocos nodos son equipados con instrumentos de medida con costos aceptables de modo que la pérdida de información ha sido cubierta por la estimación de estado armónica (hse). En este trabajo se propone un algoritmo de optimización para seleccionar, con el menor costo posible, el número óptimo y la localización de monitores. Tales monitores deberían garantizar un nivel de exactitud deseado para los resultados obtenidos en el proceso de estimación armónica. La incertidumbre introducida por los dispositivos de medida y la tolerancia en el conocimiento de los parámetros de la red son tomadas en cuenta en el enfoque propuesto.

El desarrollo del algoritmo propuesto para la localización óptima se basa en la programación dinámica y consta de los siguientes pasos:

- Cálculo las N condiciones posibles de red, variando cargas, inyecciones armónicas e impedancias de red.
- Cálculo de la HSE considerando las incertidumbres a través del método de Monte Carlo.
- Evaluación de la función objetivo.
- Consignar resultados obtenidos.
- Verificar el cumplimiento de las restricciones impuestas como criterio de terminación del algoritmo.

Conforme a los pasos dados anteriormente, se procede a explicar los rasgos más importantes del algoritmo, a partir del diagrama de flujo presentado en la Figura 1.

Figura 1. Diagrama de flujo del enfoque.



Fuente: Artículo de revista: Optimal Measurement Devices Allocation for Harmonic State Estimation Considering Parameters Uncertainty in Distribution Networks [8].

El procedimiento descrito en la Figura 1 puede ser formalizado como sigue:

- Entradas de topología de la red, localización de los monitores por defecto, impedancias nominales de línea y potencias activas y reactivas medias para cada nodo.
- Un conjunto de N posibles condiciones de referencia para el sistema considerado, cada uno caracterizado por diferentes inyecciones armónicas, definiéndose posibles valores para potencia demandada y parámetros de red.
 - En cada prueba un valor para las corrientes armónicas inyectadas por las cargas no-lineales es extraída aleatoriamente en el rango desde cero hasta un valor máximo prefijado (I_{lmax}), mientras que la fase de esta corriente es extraída aleatoriamente en el rango de $\pm\pi/2$.
 - Para cada línea el valor de la impedancia es definida por medio de distribuciones uniformes centrados en los valores nominales y teniendo rangos de tolerancia predeterminados.
 - Para cada carga un conjunto de N valores para potencia activa y reactiva es definida por medios de la distribución Gaussiana distribuida centrada en los valores medios anuales y teniendo desviaciones estándar predeterminadas.
- Se realizan flujos de cargas armónicos N veces con las condiciones anteriormente definidas, obteniendo los valores de referencia de todas las cantidades anteriores (tensiones, corrientes nodales y de rama).
- La incertidumbre de los dispositivos de medida es considerada. Los datos medidos difieren desde las condiciones de referencia debido a la incertidumbre. En particular, una constante de desviación máxima relativa para la amplitud de cada armónico de tensión y corriente ($U_{meas,a}$ % alrededor del valor medido), y una desviación máxima incrementándose con la frecuencia para el ángulo de fase ($hU_{meas,\phi}$ % siendo h el orden del armónico) son asumidas. Distribuciones de probabilidad uniformes son asociadas para estos valores aleatorios.
- La evaluación de la función objetivo depende de la desviación máxima relativa de los estimados con respecto a las condiciones asumidas como de referencia.

Esta función es promediada sobre todos los armónicos presentes en la red y sobre las N situaciones de referencia.

- Para cada nueva medida adicional y para cada orden de armónico considerado, se resuelve el HSE por medio de SVD³ evaluando las corrientes armónicas nodales que son las variables de estado del problema.
- La calidad de las cantidades estimadas son evaluadas en comparación con las de referencia.
- El algoritmo finaliza el proceso con una solución que cumpla con las restricciones de exactitud.

1.2.2 Técnica simple para localización de monitores hacia la estimación de armónicos en sistemas eléctricos de potencia [10]. Una nueva y simple estrategia de localización de monitores para monitorización de fuentes armónicas en sistemas de potencia es propuesta. La técnica es fácilmente ejecutable y adecuada incluso cuando solo pocas mediciones armónicas son seleccionadas.

En un sistema de potencia sería deseable estimar las fuentes armónicas conocidas usando pocos instrumentos permanentemente conectados a las barras. La localización del medidor está basada en las sensibilidades de las corrientes de línea como la mejor representación posible de las fuentes armónicas.

En la metodología propuesta los monitores son ubicados en aquellas líneas a través de las cuáles el flujo de corriente armónica es la más sensible a las corrientes armónicas inyectadas a las barras. Como la localización de las fuentes armónicas son asumidas para ser conocidas *a priori*, la sensibilidad de la corriente armónica $I_{h,i,j}$ con respecto a la corriente armónica inyectada I_{hk} puede ser encontrada analíticamente. El método de inyección de corriente es presentado en (2).

³ Singular Descomposition Value.

$$V_h = Z_h [I_h] \quad (2)$$

Esta se puede expresar según la topología del sistema en la Ecuación (3):

$$V_h = [\sum_{k=1}^n Z_{h,1k} I_{hk}, \sum_{k=1}^n Z_{h,ik} I_{hk}, \dots, \sum_{k=1}^n Z_{h,nk} I_{hk}]^T \quad (3)$$

Así la expresión para la corriente armónica de línea es dada por (4):

$$I_{h,ij} = V_{hi} - V_{hj} y_{h,ij} + y_{sh,ij} V_{hi} \quad (4)$$

Sustituyendo las expresiones de V_{hi} y V_{hj} desde (2) y (3), $I_{h,ij}$ puede ser determinada como una función de corrientes armónicas inyectadas a las barras como sigue en (5).

$$I_{h,ij} = y_{h,ij} \sum_{k=1}^n Z_{h,ik} I_{hk} - \sum_{k=1}^n Z_{h,jk} I_{hk} + y_{sh,ij} [\sum_{k=1}^n Z_{h,jk} I_{hk}] \quad (5)$$

Igualmente, todas las otras corrientes de línea armónicas en cada orden de armónico h pueden ser determinadas. Para encontrar la sensibilidad de las corrientes armónicas de línea con respecto a las corrientes armónicas inyectadas a las barras, la derivada parcial de (5) es obtenida y mostrada en (6):

$$\frac{\partial I_{h,ij}}{\partial I_{hk}} = y_{h,ij} + y_{sh,ij} Z_{h,ik} - y_{h,ij} Z_{h,ik}; k = 1, 2, 3, \dots n \quad (6)$$

Recolectando todas las ecuaciones, la matriz de sensibilidad $[H]$ es definida en (7):

$$H = \begin{bmatrix} \frac{\partial I_{h,12}}{\partial I_{h1}} & \frac{\partial I_{h,12}}{\partial I_{h2}} & \frac{\partial I_{h,12}}{\partial I_{hn}} \\ \dots & \dots & \dots \\ \frac{\partial I_{h,ij}}{\partial I_{h1}} & \frac{\partial I_{h,ij}}{\partial I_{h2}} & \frac{\partial I_{h,ij}}{\partial I_{hn}} \end{bmatrix} \quad (7)$$

Cada elemento de H está dado por (7). La ubicación de los monitores está determinada por las posiciones que tengan los valores más altos con respecto a las demás, en la cual, si se tiene un número de monitores disponibles N , estos se ubicarán en las N primeras posiciones con valor más alto de la matriz H . La determinación del número de medidores depende de la exactitud en la estimación para un número de monitores dado, es decir, si se tiene en consideración la ubicación de 4 monitores, es necesario evaluar el desempeño de la estimación con $N=1, 2, 3, 4$ monitores en las posiciones indicadas por la matriz H .

1.2.3 Un método de localización hacia la medición óptima para estimación de estado armónico en sistemas de potencia [11]. Este artículo se enfoca en una nueva técnica para la ubicación óptima de monitores y análisis de observabilidad para localizar fuentes armónicas.

El método empleado consiste en seleccionar las ubicaciones de los monitores que puedan minimizar el valor de la suma de diferencias de cuadrados entre las variables estimadas y reales. Aplicando el criterio de diferencia mínima para la estimación de fuentes armónicas de corriente, el problema se expresa como sigue (8):

$$\begin{aligned} & \textit{Minimizar} \\ & \textit{con respecto a } T = \{ F I_{\mu} - I_{\mu}^2 \} \quad (8) \\ & \textit{la ubicación de } I_o \textit{ y } V_o \end{aligned}$$

Donde I_{μ} es la corriente real e I_{μ} es una estimación de I_{μ} .

La Ecuación (8) es resuelta en dos pasos. Primero se escoge el predictor I_{μ} que puede minimizar el valor de la diferencia de cuadrados, representado por T . Posteriormente, se encuentran las localizaciones óptimas que minimizan el error

debido al predictor lineal I_μ . La teoría necesaria para resolver (8) usando los dos pasos indicados se da a continuación.

La Ecuación (9) expresa una relación entre las tensiones nodales y las corrientes de un sistema de potencia:

$$V = ZI \quad (9)$$

Si I representa la matriz de inyección de corriente en los nodos del sistema, entonces Z debe ser la matriz de impedancia armónica nodal. De otra manera, si I consiste en la matriz de corrientes de línea, por lo tanto Z debe ser obtenida de acuerdo a la topología de la red y sus parámetros.

Si V_o e I_o corresponden a los vectores de cantidades observadas y V_μ e I_μ consisten en los vectores de tensiones y corrientes desconocidas, entonces:

$$\begin{matrix} V_\mu \\ V_o \end{matrix} = \begin{matrix} Z_{\mu\mu} & Z_{\mu o} \\ Z_{o\mu} & Z_{oo} \end{matrix} \begin{matrix} I_\mu \\ I_o \end{matrix} \quad (10)$$

Si se conoce que las fuentes armónicas en las distintas barras no se relacionan, la solución de la Ecuación (8) puede ser simplificada. A causa de esto, la matriz de varianzas para la existencia de una fuente armónica es diagonal. Esta información puede ser incorporada al desarrollo por medio de una matriz expresada en (11):

$$\sigma^2 = \begin{matrix} \sigma_\mu^2 & 0 \\ 0 & \sigma_o^2 \end{matrix} \quad (11)$$

Las posiciones de (11) dependen del conocimiento previo de los niveles de carga de cada barra del sistema. Por ejemplo, si una barra no tiene carga, esta no puede ser una fuente de armónicos. Por otro lado, si la carga de la barra consiste en

usuarios industriales, se le podría asignar una mayor probabilidad de ser fuente armónica con respecto a un usuario residencial.

Usando desde la Ecuación (9) hasta (11) para evaluar las matrices de covarianza y covarianza cruzada, es obtenida (12):

$$Cov \begin{matrix} V_{\mu} \\ I_{\mu} \\ V_o \\ I_o \end{matrix} = \begin{matrix} Z_{\mu\mu} & Z_{\mu o} \\ I & 0 \\ Z_{o\mu} & Z_{oo} \\ 0 & I \end{matrix} \begin{matrix} \sigma_{\mu}^2 & 0 \\ 0 & \sigma_o^2 \\ Z_{o\mu} & Z_{oo} \\ 0 & I \end{matrix} \begin{matrix} Z_{\mu\mu} & Z_{\mu o} \\ I & 0 \\ Z_{o\mu} & Z_{oo} \\ 0 & I \end{matrix}^T \quad (12)$$

Reescribiendo (12) en función de las variables necesarias para el problema de minimización, es decir, omitiendo la variable V_{μ} , se obtiene (13):

$$Cov \begin{matrix} I_{\mu} \\ V_o \\ I_o \end{matrix} = \begin{matrix} \sigma_{\mu}^2 & \sigma_{\mu}^2 Z_{o\mu}^T & 0 \\ Z_{o\mu} \sigma_{\mu}^2 & Z_{o\mu} \sigma_{\mu}^2 Z_{o\mu}^T + Z_{oo} \sigma_o^2 Z_{oo}^T & Z_{oo} \sigma_o^2 \\ 0 & \sigma_o^2 Z_{oo}^T & \sigma_o^2 \end{matrix} \quad (13)$$

La covarianza de la estimación del error es dada por (14):

$$Cov \ I_{\mu} - I_{\mu} = Var \ I_{\mu} - Cov \ I_{\mu}, V_o I_o * Var \ V_o I_o^{-1} * Cov(V_o I_o, I_{\mu}) \quad (14)$$

Usando (12) y (13) para resolver el error condicional, la matriz de covarianza produce (15):

$$MatCov = Cov \ I_{\mu} - I_{\mu} = \sigma_{\mu}^2 - \sigma_{\mu}^2 Z_{o\mu}^T (Z_{o\mu} \sigma_{\mu}^2 Z_{o\mu}^T)^{-1} \quad (15)$$

La traza de la magnitud de la matriz de covarianza es el escalar de error apropiado para este problema de minimización. Conforme se puede observar en (15), la elección del elemento $Z_{o\mu}$ resulta crítica para minimizar la traza de la magnitud de

la matriz de covarianza, por consiguiente, $Z_{o\mu}$ determina la ubicación óptima de monitores en el sistema de distribución. La magnitud de esta variable difiere conforme al orden de armónico evaluado, por lo tanto, la traza de la magnitud de covarianza debe ser calculada, sumada y minimizada para todos los armónicos existentes en la red de acuerdo a la expresión mostrada en (16):

$$\begin{aligned} & \textit{Minimizar} \\ & \textit{con respecto a } T = \sum_h \textit{traza}(\textit{MatCov } h) \quad (16) \\ & \textit{por medio de } Z_{o\mu} \end{aligned}$$

Donde h representa el orden del armónico considerado.

Para la ubicación de los medidores se pueden identificar dos pasos esenciales junto con un criterio de terminación. El primer paso consiste en ubicar el primer medidor que cumpla con lo descrito en (16), identificándose cuáles variables de estado del sistema se convierten en observables por la ubicación del monitor, luego estas variables de estado se etiquetan para que no sean tenidas en cuenta en el análisis para la ubicación de otro medidor en el sistema eléctrico. El proceso finaliza cuando todas las variables de estado sean observables a través de la ubicación de los medidores

1.3 CONCLUSIONES DE LAS METODOLOGÍAS DESCRITAS

La metodología de DP y el análisis por el método de Monte Carlo plantea la comparación entre dos escenarios: la simulación del flujo de carga del sistema con distintos escenarios que difieren en los valores de las fuentes armónicas, impedancias de líneas y potencias activas y reactivas de las cargas del sistema, y la estimación de estado armónica por medio de descomposición en valores

singulares (SVD), tomando en cuenta la incertidumbre introducida por los monitores y que se propaga a medida que se desarrollan los cálculos relativos a la estimación. De acuerdo a esto, este método identifica la localización óptima de los monitores con unos requerimientos de cálculos importantes que no se consideran esenciales en la orientación dada para este proyecto, entre las que se encuentran la estimación y simulación de las variables de estado del sistema y el análisis de la incertidumbre por el método de Monte Carlo. El interés de este proyecto consiste en adaptar una metodología que cumpla con el requerimiento de observabilidad, sin la necesidad de comprobar este mismo con la aplicación de la estimación de estado armónico.

Para la metodología de sensibilidad de corrientes de línea con respecto a las corrientes armónicas inyectadas a las barras, se observa la ventaja de una mayor concentración del estudio en la distribución del flujo armónico de corriente en el sistema, ubicándose los monitores únicamente en las ramas en que se identifique mayor flujo armónico con respecto a las fuentes armónicas ubicadas. Este es un aporte importante porque toma en cuenta el sistema y sus características para las localizaciones que requieran más atención en cuanto al flujo de armónicos y el planteamiento de nodos críticos a medir. Sin embargo este análisis es necesario realizarlo para todos los armónicos y es posible que existan diferentes localizaciones para los monitores en relación a un determinado armónico. Además, la obtención de resultados consiste en ubicar cargas de posición aleatorias a través del sistema, por lo que habría incertidumbre acerca de la efectividad del método frente a una variación de número o posición de estas cargas. También la cantidad de cálculos a efectuar es considerable puesto que para cada localización es necesario comprobar la estimación para comprobar la efectividad o no de los monitores localizados.

Conforme a lo reseñado del método presentado en [11], se expone un proceso de optimización de acuerdo a la disminución de los errores existentes entre las variables estimadas y reales. El procedimiento para llegar a solucionar este mismo es confuso, debido a que no se encuentra claridad en cuanto al cálculo de la impedancia entre una variable observada y no conocida, siendo este parámetro esencial en el proceso de optimización que se plantea. Además, la necesidad de asignar una probabilidad acerca de la generación de armónicos en una determinada carga es posible siempre que se tenga información del comportamiento de la misma, sin embargo, puede que los operadores de red no posean esta información.

En resumen, se ha analizado distintas ventajas y desventajas de diferentes enfoques propuestos. Se indica como puntos comunes la necesidad de utilizar elementos de la estimación de estado armónico, así como información acerca de características de topología de la red e información de la inyección de armónicos de las cargas a la red eléctrica. Toma cierta consideración que en ninguna de las tres metodologías se toma en cuenta el costo del sistema ni se requiere en situaciones en la que este costo pueda afectar la localización, puesto que en algunos nodos del sistema este mismo se incrementará o disminuirá dependiendo de la topología. En la siguiente sección, se describirá la metodología de solución adoptada en este trabajo de grado.

1.4 INTRODUCCIÓN AL MÉTODO SELECCIONADO

La metodología validada por este proyecto fue tomada de [6]. Como una forma de introducción al procedimiento, se presentan una serie de ventajas que presenta el método con respecto a los descritos previamente:

- No se basa en la estimación de estado armónico ni de ningún componente de la misma. Esto es importante porque los resultados de la metodología no dependen de valores o ubicaciones *supuestas* que podrían afectar la veracidad de los mismos ante cambios de estas situaciones, representando una gran cantidad de cálculos a realizar.
- Resalta la importancia de la conexión del monitor a una barra y una rama del sistema adyacentes, por lo que se obtienen los resultados fácilmente verificables e implementables, y no se tendría que recurrir a monitores con entradas adicionales de corriente.

Se podrían identificar algunas desventajas frente a los otros métodos como por ejemplo:

- El artículo se enfoca en el análisis de sistemas de potencia, por lo tanto, se puede identificar una diferencia entre las topologías características entre las redes de distribución y los sistemas de transmisión. Por ejemplo, en las redes de distribución es común mezclar cargas trifásicas con monofásicas, mientras en sistemas de transmisión todo es referente a cargas trifásicas.
- Se obtienen diversos sistemas de monitores, sin embargo, no existe un criterio claro acerca de cuál configuración del conjunto óptimo resulta más apropiada para el sistema en cuestión.

La metodología adoptada permite el cálculo de las variables de estado desconocidas por medio de las variables medidas y considerando solo los parámetros de la red (impedancias serie y admitancias shunt). Estos parámetros pueden ser determinados en base a la configuración de la red y los tipos de conductores. Sin embargo, es común que los operadores de red tengan información disponible acerca de los componentes de red de sus redes, por lo tanto, las impedancias serie y las admitancias shunt pueden ser estimadas de forma confiable y segura, para el análisis armónico [6].

Para la determinación de la estimación de estado armónico, se pueden identificar errores de estimación solamente debido al cálculo de los parámetros de la red y debido a las medidas. Esta característica también es común encontrarla en otros enfoques tradicionales de la estimación armónica [6].

2. MÉTODO PARA LOCALIZACIÓN ÓPTIMA DE MONITORES DE CALIDAD DE LA POTENCIA PARA ESTIMACIÓN DE ESTADO ARMÓNICO EN SISTEMAS DE DISTRIBUCIÓN DE ENERGÍA ELÉCTRICA.

En este capítulo se presenta la estructura general de la estrategia adoptada para la localización óptima de monitores de calidad de potencia para la estimación de estado armónico en sistemas de distribución de energía eléctrica. En primer lugar se muestran cada uno de los bloques característicos que constituyen la metodología. Luego se describen cada uno de ellos de forma general, haciendo uso de un caso tipo que consiste en un sistema de 5 barras planteado en la misma fuente bibliográfica [6]. Por último se enuncia un complemento de la metodología adoptada a través de un análisis en ATP del desempeño de las configuraciones óptimas obtenidas, lo que permitirá seleccionar la configuración más eficaz del sistema de monitorización entre el conjunto de posibles soluciones óptimas.

De acuerdo a lo anterior, se procederá a describir la metodología estudiada, en la cual se pueden identificar tres partes principales: Método de observabilidad, el proceso de optimización y la identificación de los nodos sensibles por la inserción de cargas armónicas, con el fin de encontrar una configuración óptima de monitores a partir de un grupo de éstas con el mismo costo y número de medidores asociado.

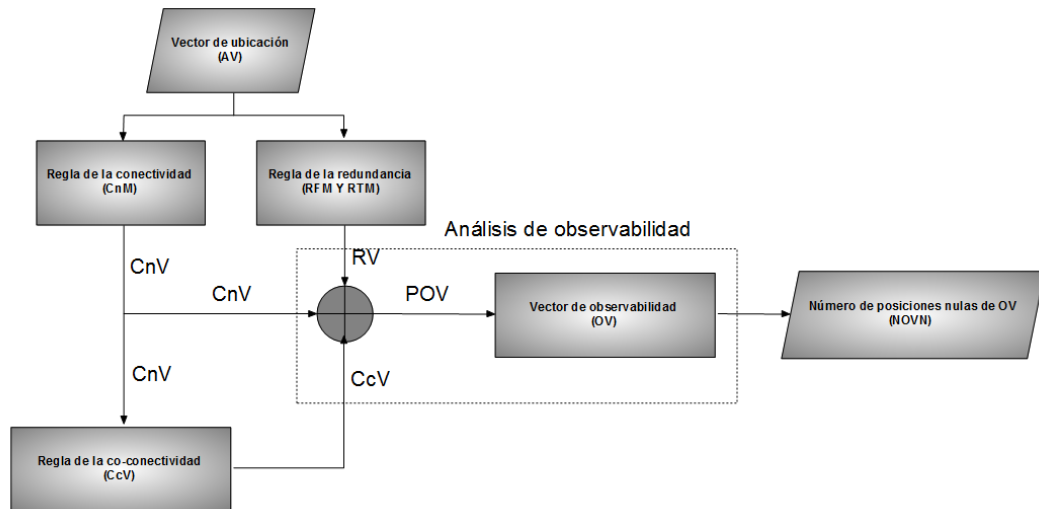
2.1 MÉTODO DE OBSERVABILIDAD

Antes de iniciar la descripción es importante recordar la definición de observabilidad en un sistema eléctrico. Este término asocia una relación entre las

mediciones y las variables de estado que permiten una estimación adecuada de estas últimas [2], es decir, un sistema es completamente observable cuando el sistema de medidas permite determinar cada variable de estado del sistema. En este caso las variables de estado a encontrar son las tensiones en las barras y las corrientes en cada rama del sistema.

El método de observabilidad del sistema sigue el siguiente diagrama de bloques mostrado en la Figura 2.

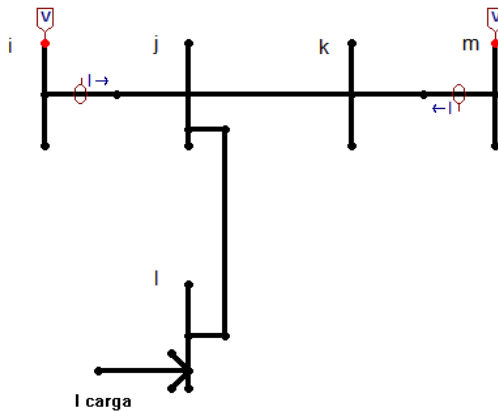
Figura 2. Diagrama de bloques representativo de la metodología de observabilidad.



A continuación, se explicará el contenido de cada uno de los módulos descritos en el diagrama de bloques.

2.1.1 Vector de localización (AV). El vector de localización o ubicación (AV) representa una alternativa de localización de monitores donde cada posición considera la conexión o no de un medidor en una barra determinada y una línea o rama que sale o entra de la misma barra. Para soportar este concepto de una forma más clara se analizará la Figura 3, que consiste en un sistema de 5 barras con una posible conexión de transformadores de instrumentación sobre líneas y barras específicas.

Figura 3. Sistema de ejemplo para análisis de observabilidad.



Fuente: Artículo de revista: Harmonic State Estimation Through Optimal Monitoring Systems [6].

El sistema de ejemplo tiene las siguientes características de interés, las cuales se citan en la Tabla 1.

Tabla 1. Barras y secciones del sistema de ejemplo.

Barras	Secciones	
<i>i</i>	<i>i</i>	<i>j</i>
<i>j</i>	<i>j</i>	<i>i</i>
	<i>j</i>	<i>l</i>
	<i>j</i>	<i>k</i>
<i>k</i>	<i>k</i>	<i>j</i>
	<i>k</i>	<i>m</i>
<i>l</i>	<i>l</i>	<i>j</i>
<i>m</i>	<i>m</i>	<i>k</i>

Conforme a lo que se muestra en la Figura 2, existe un conexionado de transformadores de corriente y potencial (CT y PT en la imagen), en la que se está midiendo las tensiones y corrientes señaladas en la tabla 1.

Para la Figura 2, si se estuviera evaluando la posibilidad de conexión de un medidor en la barra *i*, midiendo la corriente en la línea *ij*, se tendría que tomar la siguiente decisión con respecto al vector AV, presentada en (17).

$$\begin{aligned}
 av \quad v_i, i_{ij} = & \begin{aligned} & 1, \text{ considerando la instalación de un medidor} \\ & \text{en la barra } \mathbf{i} \text{ y sección } \mathbf{ij} \end{aligned} \\
 & 0, \text{ considerando la no instalación de un medidor} \\
 & \text{en la barra } \mathbf{i} \text{ y la sección } \mathbf{ij}
 \end{aligned} \quad (17)$$

Conforme a la descripción anterior, el tamaño de AV está determinado por cada una de las ramas que entran y salen de las barras. Cada una de las secciones ordenadas en la Tabla 1 deben ser incluidas en el vector AV como posiciones del mismo y analizadas de la misma forma que en el proceso anterior. Respecto al tamaño del vector, en (18) se expresa esta condición.

$$\text{tamaño de } av = \sum_{i=1}^n (\# \text{ de secciones conectadas en la barra } i) \quad (18)$$

Dónde n es el número total de barras.

Para la Figura 2, el vector AV se construye como se muestra en la Figura 4:

Figura 4. Vector de localización para el sistema de ejemplo.

v_i, i_{ij}	v_j, i_{ij}	v_j, i_{jk}	v_j, i_{jl}	v_k, i_{jk}	v_k, i_{km}	v_l, i_{jl}	v_m, i_{km}
1	0	0	0	0	0	0	1

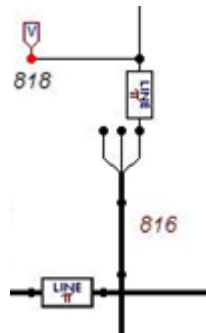
Fuente: Artículo de revista: Harmonic State Estimation Through Optimal Monitoring Systems [6].

De acuerdo al diagrama de bloques mostrado en la Figura 1, el vector AV es entrada para dos de los bloques siguientes de conectividad y redundancia. Además el mismo vector intervendrá en la función objetivo al tener influencia directa sobre el costo global del sistema de medición, como se presentará más adelante.

2.1.2 Regla de la conectividad. Esta regla se apoya en la ley de tensiones de Kirchhoff, para identificar cuáles tensiones en barra son posibles obtener a partir de las variables de estado medidas. Si se obtienen mediciones de la tensión en una barra y de la corriente que fluye desde esta barra hacia otra en la cual no exista un monitor, entonces la tensión de esta última barra puede calcularse con la ayuda de la impedancia de la línea y el valor de corriente medido. Sin embargo, es necesario incluir en este análisis una particularidad existente en los sistemas de distribución de energía eléctrica, la cual se manifiesta mediante la Figura 5. Se puede observar la conexión de una carga monofásica a un nodo trifásico, donde de acuerdo a fundamentos teóricos no es posible conocer las tres tensiones y corrientes de un nodo trifásico a partir

del conocimiento de la tensión y corriente en un nodo monofásico, teniendo en cuenta el desbalance característico de las redes de distribución. Esto le imprime el carácter de no observabilidad y por lo tanto esta consideración también debe incorporarse a la hora de expresar la regla de la conectividad.

Figura 5. Representación de conexión trifásica-monofásica.



De acuerdo a lo previamente mencionado, no es posible conocer la tensión y corriente en el nodo 816 con la instalación de un medidor en la barra 818, midiéndose la tensión de una de las fases en 818 y la corriente que fluye por la línea monofásica entre los nodos 818 y 816.

El comportamiento antes descrito puede ser resumido dentro de la *Matriz de Conectividad (CnM, por sus siglas en ingles)*. El número de filas de esta matriz depende del número de variables de estado de corriente y tensión que tenga el sistema. El número de columnas depende del número de conexiones de monitores posibles, es decir, el mismo tamaño del vector de localización (AV). El procedimiento para el llenado de la matriz de conectividad se resume en (19).

$$c_{nm} \ v_i, \ v_i, \ i_{ij} = \begin{cases} 1, & \text{Cuando } v_i \text{ es observable debido} \\ & \text{a la instalación de un medidor} \\ & \text{conectado a } (v_i, i_{ij}). \\ 0, & \text{Cuando } v_i \text{ no es observable} \\ & \text{debido a la instalación de un} \\ & \text{medidor conectado a } (v_i, i_{ij}) \end{cases} \quad (19)$$

Para la Figura 2, la matriz de conectividad es la mostrada en la Figura 6.

Figura 6. Matriz de conectividad para el sistema de ejemplo.

	v_l, i_{ij}	v_j, i_{ij}	v_j, i_{jk}	v_j, i_{jl}	v_k, i_{jk}	v_k, i_{km}	v_l, i_{jl}	v_m, i_{km}
v_i	1	1	0	0	0	0	0	0
v_j	1	1	1	1	1	0	1	0
v_k	0	0	1	0	1	1	0	1
v_l	0	0	0	1	0	0	1	0
v_m	0	0	0	0	0	1	0	1
i_{ij}	1	1	0	0	0	0	0	0
i_{jk}	0	0	1	0	1	0	0	0
i_{jl}	0	0	0	1	0	0	1	0
i_{km}	0	0	0	0	0	1	0	1

Fuente: Artículo de revista: Harmonic State Estimation Through Optimal Monitoring Systems [6].

El objetivo de elaborar la *Matriz de Conectividad* es encontrar las variables de estado que se hacen observables por la aplicación de esta regla. Para este propósito se multiplica la matriz CnM y el vector AV, según (20):

$$CnV = CnM * AV' \quad (20)$$

Las posiciones del vector de conectividad (CnV) representan cada una de las variables de estado. Si el valor en cada posición del vector es diferente de cero, significa que la variable de estado correspondiente a esa posición es observable a partir de la configuración de monitores dispuesta. En la Figura 7 se muestra el CnV para el sistema de ejemplo.

Figura 7. Vector de conectividad para el sistema de ejemplo.

v_i	v_j	v_k	v_l	v_m	i_{ij}	i_{jk}	i_{jl}	i_{km}
1	1	1	0	1	1	0	0	1

Fuente: Artículo de revista: Harmonic State Estimation Through Optimal Monitoring Systems [6].

Las posiciones de las variables de estado de corriente i_{ij} e i_{km} , en la Figura 6, tienen un valor en sus respectivas posiciones de 1, puesto que la medición de las corrientes por parte de la conexión del monitor ya hacen a la variable de estado observable, independiente de si la regla se aplica solo para las variables de estado de tensión. Esto se debe a la composición de la matriz CnM la cual tiene incorporado este escenario para la regla de conectividad, en la cual las filas que corresponden a las variables de estado de corriente son llenadas de acuerdo a si la conexión del monitor hace a la variable de corriente observable o no.

2.1.3 Regla de la redundancia. La regla de la redundancia también se apoya en la ley de tensiones de Kirchhoff. De acuerdo a esta regla es posible determinar cuáles corrientes pueden ser calculadas usando los valores de tensión que son medidos, es decir, la finalidad de la regla de la redundancia consiste en identificar si existe una línea en la cual las dos tensiones de las barras en sus extremos son observables. De ser así, entonces la corriente que fluye por la respectiva línea también será observable.

Este concepto puede ser expresado por medio de dos matrices llamadas *Redundancy-From-Matrix* (RFM) y *Redundancy-To-Matrix* (RTM), o Redundancia de la Matriz y Redundancia a la Matriz. De la misma forma que en la matriz CnM, el número de filas de las matrices corresponde a las variables de estado del sistema, y el número de columnas al número de posibles conexiones existentes, que corresponde al mismo tamaño de AV. Según esta regla, las filas de las

variables de estado de tensión contienen valores nulos, puesto que ninguna de estas puede ser determinada con esta regla.

Para el llenado de las matrices RFM y RTM, se emplea la CnM de acuerdo a (21) y (22):

$$rfm_{i_{jk},:} = cnm(v_j,:) \quad (21)$$

$$rtm_{i_{jk},:} = cnm(v_k,:) \quad (22)$$

Las expresiones (21) y (22) son ejemplificadas a través de las Figuras 8 y 9 para el sistema de la Figura 2.

Figura 8. RFM para el sistema de ejemplo.

	v_i, i_{ij}	v_j, i_{ij}	v_j, i_{jk}	v_j, i_{jl}	v_k, i_{jk}	v_k, i_{km}	v_l, i_{jl}	v_m, i_{km}
v_i	0	0	0	0	0	0	0	0
v_j	0	0	0	0	0	0	0	0
v_k	0	0	0	0	0	0	0	0
v_l	0	0	0	0	0	0	0	0
v_m	0	0	0	0	0	0	0	0
i_{ij}	1	1	0	0	0	0	0	0
i_{jk}	1	1	1	1	1	0	1	0
i_{jl}	1	1	1	1	1	0	1	0
i_{km}	0	0	1	0	1	1	0	1

Fuente: Artículo de revista: Harmonic State Estimation Through Optimal Monitoring Systems [6].

Figura 9. RTM para el sistema de ejemplo

	v_l, i_{ij}	v_j, i_{ij}	v_j, i_{jk}	v_j, i_{jl}	v_k, i_{jk}	v_k, i_{km}	v_l, i_{jl}	v_m, i_{km}
v_i	0	0	0	0	0	0	0	0
v_j	0	0	0	0	0	0	0	0
v_k	0	0	0	0	0	0	0	0
v_l	0	0	0	0	0	0	0	0
v_m	0	0	0	0	0	0	0	0
i_{ij}	1	1	1	1	1	0	1	0
i_{jk}	0	0	1	0	1	1	0	1
i_{jl}	0	0	0	1	0	0	1	0
i_{km}	0	0	0	0	0	1	0	1

Fuente: Artículo de revista: Harmonic State Estimation Through Optimal Monitoring Systems [6].

Como se puede observar, los valores de las filas de las variables estado de tensión son nulos y existe la correspondencia expresada en las ecuaciones (21) y (22), entre CnM y las matrices RFM y RTM.

Para encontrar las variables de estado de corriente que se hacen observables por este método, se necesita multiplicar la RFM y RTM por el vector AV, de acuerdo a las ecuaciones (23) y (24). Esta operación produce los vectores *Redundancy-From-Vector* (RFV) o redundancia del vector y *Redundancy-To-Vector* (RTV) o redundancia al vector.

$$RFV = RFM * AV' \quad (23)$$

$$RTV = RTM * AV' \quad (24)$$

Estos vectores tienen la misma longitud del vector CnV, y cada una de sus posiciones corresponde a una variable de estado del sistema.

De acuerdo al sistema de la Figura 2, los vectores RFV y RTV para este sistema se presentan en las Figuras .10 y 11.

Figura 10. RFV para el sistema de ejemplo.

v_i	v_j	v_k	v_l	v_m	i_{ij}	i_{jk}	i_{jl}	i_{km}
0	0	0	0	0	1	1	1	1

Fuente: Artículo de revista: Harmonic State Estimation Through Optimal Monitoring Systems [6].

Figura 11. RTV para el sistema de ejemplo

v_i	v_j	v_k	v_l	v_m	i_{ij}	i_{jk}	i_{jl}	i_{km}
0	0	0	0	0	1	1	0	1

Fuente: Artículo de revista: Harmonic State Estimation Through Optimal Monitoring Systems [6].

Con el fin de combinar los vectores RFV y RTV, se aplica una operación lógica AND. El resultado de esta operación da como resultado el Vector de Redundancia (RV), el cual se expresa en (25).

$$RV = RFV \cap RTV \quad (25)$$

Para la Figura 2, el RV es de la siguiente forma, de acuerdo a la Figura 12.

Figura 12. RV para el sistema de ejemplo.

v_i	v_j	v_k	v_l	v_m	i_{ij}	i_{jk}	i_{jl}	i_{km}
0	0	0	0	0	1	1	0	1

Fuente: Artículo de revista: Harmonic State Estimation Through Optimal Monitoring Systems [6].

Según (25), el RV corresponde a la intersección de RFV y RTV, por lo tanto, esta operación representa una multiplicación de ambos vectores, en la que se concluye que una variable de corriente es observable si la posición tiene un valor igual a 1 en ambos vectores.

2.1.4 Regla de la co-conectividad. La regla de la co-conectividad consiste en la aplicación de la ley de corrientes de Kirchhoff (LCK), puesto que si se tiene una barra en la cual se conocen todas las tensiones de las barras adyacentes, se podría hallar la tensión desconocida de esta misma. Conforme a la Figura 2, si se desconociera la tensión en la barra v_j , pero se monitorizaran las tensiones de v_l , v_k y v_i , y se tuviera conocimiento de la impedancia de la carga a tierra en el nodo, z_{carga} , la expresión que relaciona estas variables a través de la LCK en la barra v_j se muestra a través de (26).

$$v_j = \frac{z_{kj} * z_{lj} * v_i + z_{ij} * z_{lj} * v_k + z_{ij} * z_{kj} * v_l}{z_{kj} * z_{lj} + z_{ij} * z_{lj} + z_{ij} * z_{kj}} - \frac{1}{z_{carga}} \quad (26)$$

La propiedad descrita se resume en el Vector de Co-conectividad (CcV), donde cada posición de CcV también corresponde al número de variables de estado presentes en la red de potencia. En el proceso de construcción de CcV, las variables de estado de corriente son nulas, puesto que esta regla solo se refiere a variables de estado de tensión, mientras que para el resto de posiciones de CcV, el llenado depende de CnV. Se debe comprobar que las variables de estado de tensión de las barras adyacentes de una barra determinada tengan un valor lógico 1, es decir para que la tensión de una barra sea observable es necesario que las barras adyacentes a la misma ya lo sean desde la regla de la conectividad. Por ejemplo, para determinar si la tensión v_j es observable o no, en la Figura 2, gracias a la regla de la co-conectividad, se debe verificar que según (27), el valor obtenido es el valor lógico 1.

$$ccv v_j = cnv v_i * cnv v_k * cnv v_l \quad (27)$$

El CcV para el sistema de la Figura 2, es mostrado en la Figura 13.

Figura 13. CcV para el sistema de ejemplo.

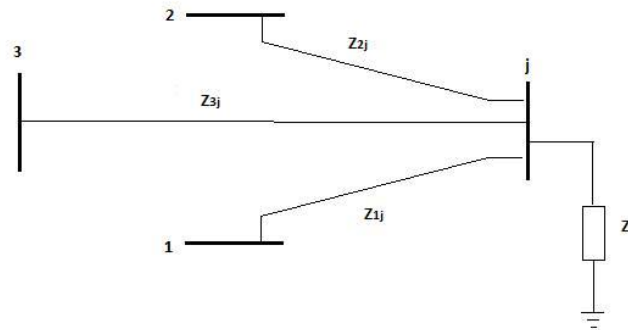
v_i	v_j	v_k	v_l	v_m	i_{ij}	i_{jk}	i_{jl}	i_{km}
1	0	1	1	1	0	0	0	0

Fuente: Artículo de revista: Harmonic State Estimation Through Optimal Monitoring Systems [6].

De acuerdo a la Figura 132, la variable de estado v_j no es observable debido a que la variable v_l era nula para el vector CnV, mientras que v_l ahora se hace observable puesto que v_j era observable desde el vector de conectividad y esta es la única barra conectada a v_l .

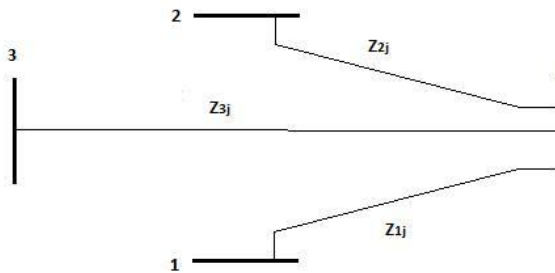
Es necesario hacer una observación en cuanto al modelado de (26), debido a que la aplicación estricta de la regla exige el conocimiento de la carga conectada desde la barra a tierra para calcular la tensión de la barra de interés. Este análisis es hecho en [12], en la cual se realiza un análisis similar al mostrado en [6], pero se realiza una diferenciación mediante la identificación de *barras conocidas* y *barras conectadas*. Estos tipos de barras se muestran en la Figura 14 y en la Figura 15, en la cual la barra j se muestra en dos situaciones: la primera corresponde al tipo de barra que tiene una carga conectada a tierra, el cual corresponde al caso de la Figura 2, y el segundo a una barra la cual no tiene cargas a tierra. Para efectos del presente trabajo, la aplicación de la regla de la co-conectividad se aplica de la misma forma para ambos tipos de barra. No obstante, es necesario prestar atención a la hora de la estimación de estado en cuanto a esta diferenciación [12].

Figura 14. Ejemplo de barra conocida.



Fuente: Artículo de revista: A Novel Power Quality Monitoring Allocation Algorithm [12].

Figura 15. Ejemplo de barra conectada.



Fuente: Artículo de revista: A Novel Power Quality Monitoring Allocation Algorithm [12].

2.1.5 Análisis de observabilidad. Conforme a la Figura 1, el bloque de análisis de observabilidad está compuesto por la formación de dos vectores que desempeñan un papel importante dentro del procedimiento porque combinan todos los procedimientos realizados en las tres reglas anteriores. Estos dos vectores tienen como nombre el Vector de Pre-Obseabilidad (POV) y el Vector de Observabilidad (OV), los cuáles se explicarán a continuación:

2.1.5.1 Vector de Pre-observabilidad (POV): El POV surge de la combinación de los tres vectores obtenidos anteriormente: CnV, RV y CcV, su relación se expresa a través de (28).

$$POV = CnV \cup CcV \cup RV \quad (28)$$

Para este trabajo de grado, (28) se interpretó como una suma entre los tres vectores. Como una consecuencia de la operación aritmética, cada una de las posiciones de POV corresponde a una variable de estado. En la Figura 16 se muestra el vector resultante para el sistema de la Figura 2.

Figura 16. POV para el sistema de ejemplo.

v_i	v_j	v_k	v_l	v_m	i_{ij}	i_{jk}	i_{jl}	i_{km}
1	1	1	1	1	1	1	0	1

Fuente: Artículo de revista: Harmonic State Estimation Through Optimal Monitoring Systems [6].

Conforme a la Figura 16, se observa que la variable i_{jl} , no es observable aún, sin embargo, esta puede ser calculada de acuerdo a las reglas anteriores. Este procedimiento se explicará en el siguiente inciso.

2.1.5.2 Vector de Observabilidad (OV). Como ya se había mostrado en el último párrafo de la sección 0, la variable i_{jl} aún no es observable. No obstante, las variables de estado de tensión v_j y v_l ya fueron calculadas por medio de las reglas de la conectividad y co-conectividad, respectivamente, por lo cual la variable de estado i_{jl} puede ser calculada por medio de la regla de la redundancia, puesto que se tiene la tensión de las dos barras en los extremos de la misma.

Esto puede ser expresado de acuerdo a (29).

$$ov \ i_{jl} = pov \ v_j * pov(v_l) \ (29)$$

Este comportamiento puede ser generalizado para todas las posiciones de variables de estado de corriente de POV, originando el Vector de Observabilidad (OV), el cual solo puede permitir cambios en la variables de estado de corriente cuando dos tensiones en barras son conocidas y estas están relacionadas por una rama en común. De acuerdo al POV, cada posición de OV corresponde a una variable de estado.

2.1.6 Número de posiciones nulas del vector de localización (NOVN). Una vez realizado el análisis de observabilidad, se concluye que una configuración de monitores garantiza completamente la observabilidad de la red eléctrica si todas las posiciones del Vector de Observabilidad (OV) son no nulas, es decir, en todas las posiciones de OV existe un número mayor que 1.

En el método de optimización, que se presentará en la sección 0, se necesita determinar si una configuración determinada es o no observable por medio de OV. Para esto se obtiene el número de posiciones nulas de OV, denominándolo NOVN. La utilidad de este índice será explicada con más detalle en el siguiente capítulo. Sin embargo podemos identificar a NOVN como la salida del método de observabilidad, y se utilizará solo este término en adelante, puesto que a través de este se puede identificar si una alternativa cumple o no con la restricción de observabilidad.

2.2 PROCESO DE OPTIMIZACIÓN

El proceso de optimización tiene como finalidad la selección de la configuración óptima del sistema de monitorización, que cumpla además con el criterio de observabilidad mostrado en el inciso 0. Esto implica que el vector de observabilidad (OV) no tenga ninguna posición nula, siendo las posiciones de OV cada una de las variables de estado presentes en el sistema.

El contenido de la siguiente sección comprende la descripción de la función objetivo y las restricciones del mismo, así como la descripción del método de optimización utilizado para la resolución del problema, que en este caso se utiliza un algoritmo genético simple.

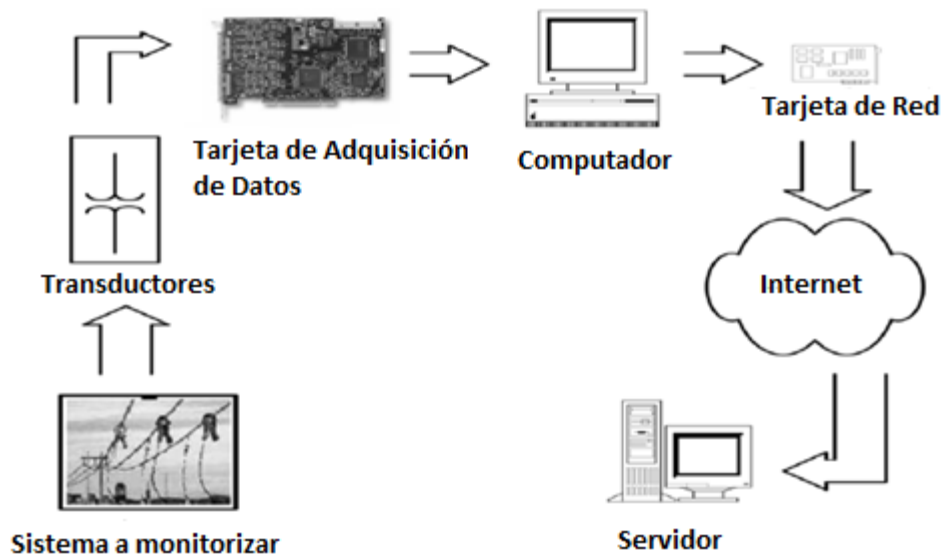
2.2.1 Función Objetivo. La localización óptima de monitores se obtendrá por medio de la minimización del costo total de la configuración. Este costo se definirá de acuerdo a (30).

$$cv \ v_i, i_{ij} =$$

Costo de la instalación de un monitor de calidad de potencia con medición en la barra i y la corriente en la sección ij (30)

Para determinar el costo de la instalación de un monitor en una barra determinada, se necesitan tener en cuenta los diferentes componentes que intervienen en el sistema de monitorización. En [12] se realiza una descripción de estos elementos, los cuáles se organizan en la Figura 17.

Figura 17. Configuración empleada en la monitorización de señales armónicas.



Fuente: Artículo de revista: A Novel Power Quality Monitoring Allocation Algorithm [12].

En [12] se incluye una ecuación relacionando las variables descritas anteriormente, que también se encuentra en (31).

$$C_j = C_{tran} + C_{DAQ} + C_{PC} + C_{com} + C_{sw} \quad (31)$$

Donde, C_{tran} es el costo de los transformadores de instrumentación, C_{DAQ} es el costo de la tarjeta de adquisición de datos empleada por el medidor, C_{PC} es el costo de los computadores asociados a la operación de la configuración, C_{com} es el costo del sistema de comunicaciones y C_{sw} es el costo del software empleado por la tarjeta para mostrar los datos registrados.

Conforme a la Ecuación (30) y la descripción anterior, el costo de la instalación de un monitor en cada barra de la red eléctrica, es expresado a través de cada posición del vector CV. Para este trabajo de grado, se tuvieron en cuenta factores

como el número de los transformadores de instrumentación de acuerdo a la posición que ocupe en la topología de la red. Esto se realiza dependiendo si el nodo y rama en cuestión corresponden a configuraciones trifásicas o monofásicas, el nivel de tensión al cual estén conectados los transformadores de instrumentación, el costo del monitor y los diferentes computadores que se utilicen para registrar y guardar los distintos datos que se obtengan, con el fin de llenar cada una de las posiciones del vector CV.

Para determinar el costo total de una determinada configuración se necesita conocer en cuáles barras de la red eléctrica se tiene conectado un monitor. Esto se expresa a través de AV, según las ecuaciones (17) y (18), y el costo asociado a cada una de las posiciones en que se pueda ubicar, mostrado a través del vector CV. En consecuencia, la Ecuación (32) describe la expresión para el costo total de una configuración dada.

$$\text{Costo total} = AV * CV^T = \sum_1^h (av_{v_i, i_{ij}} * cv(v_i, i_{ij})) \quad (32)$$

Donde h es el número posible de conexiones para instalar monitores de calidad de potencia.

De acuerdo al desarrollo de la Sección 0, se determinó que si una de las posiciones de OV es igual a cero, la configuración determinada no garantiza la observabilidad completa del sistema, por lo tanto, esto resulta ser una restricción para la función objetivo. En resumen, el problema de optimización puede ser expresado de la siguiente forma, a través de (33):

$$\begin{aligned} f_{\text{objetivo}} &= \min(AV * CV^T) \quad (33) \\ \text{sujeto a: } &ov \ x_i \geq 1, i = 1, 2, 3 \dots \end{aligned}$$

Puesto que no existe una relación lineal entre las variables de decisión de AV y OV, este problema no puede ser resuelto por medio de la programación lineal. Por lo tanto, se utilizó una técnica heurística basada en algoritmos genéticos, el cual también fue trabajado en [6], para la resolución del problema de optimización planteado en (33).

2.2.2 Algoritmos Genéticos. Un algoritmo genético simple (AGs, por sus siglas en inglés) fue utilizado para resolver el problema de optimización presentado en (33). Los algoritmos genéticos, de acuerdo a [13], están basados en el proceso genético de los organismos vivos, usando una analogía directa con el comportamiento natural. Su funcionamiento se basa en la operación con una población de individuos donde cada uno representa una solución factible al problema dado. A cada individuo se le asigna un valor o puntuación, relacionado con la solución. En la naturaleza esto equivale al grado de efectividad de un organismo para competir por unos determinados recursos. Cuanto mayor sea la adaptación de un individuo al problema, mayor será la probabilidad de que el mismo sea seleccionado para reproducirse, cruzando su material genético con otro individuo seleccionado de igual forma, a través de los operadores genéticos. Cuanto menor sea la adaptación de un individuo, menor será la probabilidad de que dicho individuo sea seleccionado para la reproducción, y por tanto su material genético se propague en sucesivas generaciones.

En un algoritmo genético (AG) la representación de los individuos son cadenas binarias, que representan puntos determinados en el espacio de búsqueda del problema, y se utiliza una nomenclatura de la biología para referirse a sus principales términos [14]. En base a esto, a cada cadena binaria se le llama *genotipo* o *cromosoma* y a los puntos en el espacio de búsqueda se les denomina *fenotipo*. Cada posición de la cadena binaria se le suele llamar *gen* y se utiliza para referenciar una característica determinada del individuo. La adaptación al

problema de un individuo depende de la evolución del genotipo. Esta puede inferirse a través del fenotipo, el cual puede ser encontrado computando el cromosoma usando la función de evaluación [14]. Cada uno de estos términos se relacionará con el problema de la localización óptima más adelante.

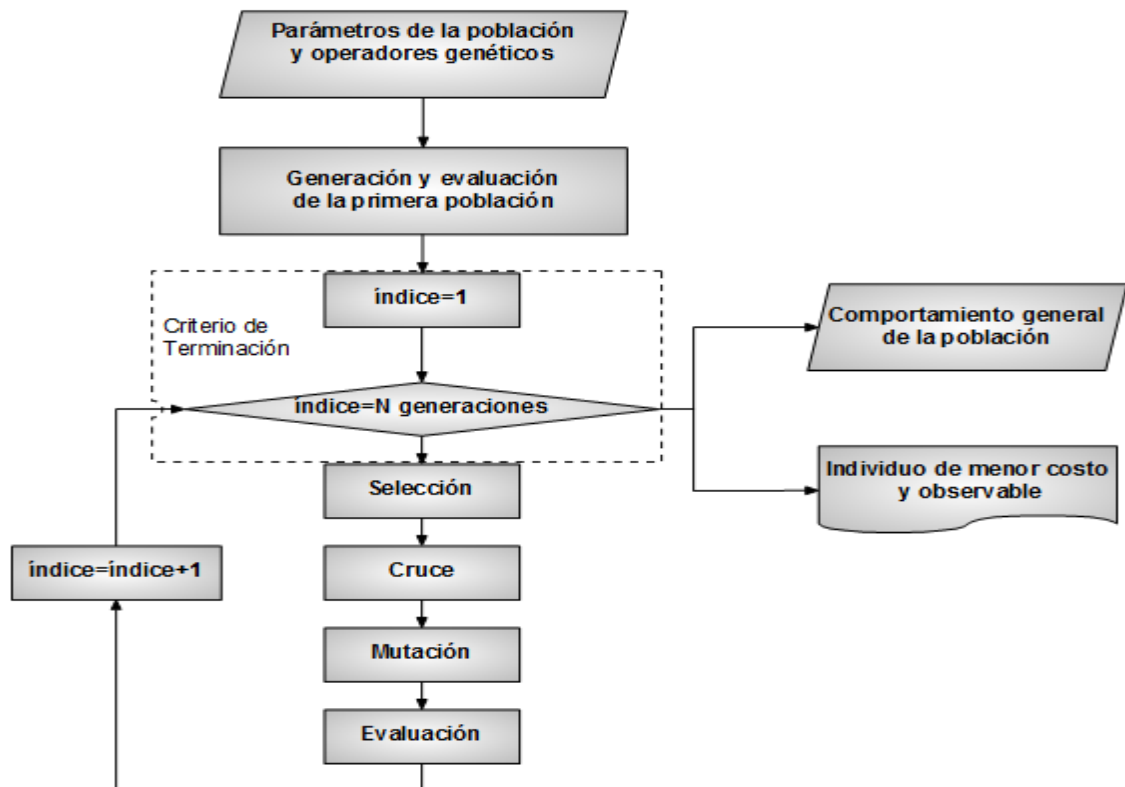
Entre las ventajas que se pueden encontrar de la utilización de estas técnicas se tiene que [13]:

- Procesan simultáneamente un conjunto de posibles soluciones al problema, a través de *individuos*; el conjunto total de todas estas se les denomina *población*.
- La composición de la población se modifica a lo largo de cada una de las iteraciones del algoritmo, en la cual, cada uno de los individuos puede seguir conservando sus características originales o puede transformarse a partir de los individuos de la población anterior a través de *operadores genéticos*.
- Durante cada iteración se realiza un proceso de selección. Este proceso consiste en la selección de los individuos mejor adaptados de acuerdo a su valoración en la función de evaluación. Sin embargo, el algoritmo incluye componentes aleatorias que permite la supervivencia de individuos menos adaptados, dotando a la metodología para escapar de óptimos locales y explorar distintas zonas del espacio de búsqueda.

Los algoritmos genéticos forman parte de los *algoritmos evolutivos*; existen distintos tipos dentro de los algoritmos evolutivos y su principal diferencia se encuentra en la representación de los individuos, siendo el algoritmo genético caracterizado por la codificación binaria que incluye en cada uno de sus algoritmos [13]. Es así como los algoritmos genéticos resultan apropiados en este caso, puesto que la población de individuos estará compuesta por distintas configuraciones de monitores que *evolucionarán* hacia individuos que cumplan las exigencias de costo y observabilidad impuestas, siendo el vector de localización

(AV) seleccionado como la representación común de todos los individuos en la población.

Figura 18. Diagrama de flujo del algoritmo genético implementado.



En la Figura 18 se muestra el diagrama de flujo implementado en Matlab para la solución del caso de estudio del presente trabajo. En cada módulo mostrado se realizan procedimientos específicos que serán explicados a continuación.

2.2.2.1 Parámetros de la población y operadores genéticos: En esta sección se define las características de la población, las diferentes tasas de entrada para cada uno de los operadores genéticos y el costo de las diferentes

configuraciones. Los aspectos a tener en cuenta en la formulación de estos parámetros de entrada son los siguientes:

- El tamaño de cada individuo de la población corresponde a la misma longitud de AV según sea la topología del sistema y conforme a (18). El tamaño de la población y el número de generaciones, el cual es el criterio de decisión del algoritmo, se definen aleatoriamente y no cambiarán a lo largo de las iteraciones del mismo.
- El costo de la operación, de acuerdo a (30) y (31), se establece para cada posición específica, de acuerdo a criterios como el costo del medidor, costo de los transformadores de instrumentación, de las comunicaciones, entre otras, explicadas en la sección 0.

2.2.2.2 Generación y evaluación de la primera población: Los individuos de la población corresponden a cadenas de vectores del mismo tamaño y composición equivalentes a AV, siendo este el genotipo del problema y los genes la localización o no de un medidor en cada posición, según (17) y (18). La población consiste en conformar una matriz en la que cada una de las filas corresponde a una posible localización de monitores, es decir, distintos vectores AV.

La generación de la primera población representa la asignación aleatoria de vectores de unos y ceros del mismo tamaño de AV para cada una de las filas de la matriz de población. El número de vectores generados representa el tamaño de la población. Se recomienda que este número sea lo suficientemente grande para asegurar un mayor espacio de búsqueda de solución [13].

La expresión de evaluación de cada uno de los individuos de la población es expresada en (34), donde se combina el problema de minimización presentado en (33), junto con el término NOVN, el cual expresa la dependencia de cada uno de

los AV con respecto a la observabilidad del sistema. Esta restricción también se ve reflejada a través del escalar k , el cuál relaciona la función objetivo con la restricción de observabilidad.

$$f_{\text{evaluación individual}} = \frac{1}{f_{\text{objetivo}} + k * NOVN} \quad (34)$$

La Ecuación (34) puede recibir otros nombres en la literatura, tal como en [13] donde se le llama función de adaptación debido a la utilización de un algoritmo genético como método de solución. Este nombre se refiere al valor que se le da a una determinada solución a un problema específico con respecto a sus similares.

2.2.2.3 Criterio de terminación: Existen diversos tipos de terminación para los algoritmos genéticos. En [13] se citan algunos como:

- Alcanzar un número máximo de generaciones.
- Alcanzar un número máximo de llamadas al cálculo de la adaptación.
- Llegar a una situación con escasas posibilidades de que se produzcan cambios significativos en la generación siguiente.

Para este trabajo de grado, se determinó que el criterio de terminación corresponde al alcance de un número de generaciones establecido. Cuando se haya llegado a este número, la población resultante contendrá distintas configuraciones que diferirán entre unas y otras, por lo tanto, se escogerá el individuo con menor número de monitores, el cual también tiene el menor costo de configuración de monitores, y que cumpla con la restricción de observabilidad, es decir, que su OV resultante no contenga posiciones nulas. Además se registrará el costo de este mismo para ser comparado con otras ejecuciones que se hagan del algoritmo, que den como resultado el mismo número de medidores y también cumplan con la restricción de observabilidad.

2.2.2.4 Proceso de selección: Cada una de las generaciones se somete a un proceso de selección o muestreo que tiende a favorecer a los individuos más adaptados. Los procesos de selección básicos son los siguientes [13]:

- Selección proporcional o por ruleta
- Muestreo estocástico universal
- Selección por torneo
- Muestreo por restos

En este proyecto se seleccionó la selección proporcional o por ruleta. Este método consiste en definir la probabilidad de cada individuo conforme su valor en la función de evaluación para poder ser seleccionado como padre. La probabilidad de selección está expresada en (35).

$$p_i = \frac{f(i)}{f} \quad (35)$$

Donde p_i es la probabilidad de selección del individuo i , $f(i)$ es la adaptación del individuo y f la adaptación media de la población [13].

Para la selección de los individuos se introduce una serie de valores asociados a las probabilidades antes obtenidas llamadas puntuaciones acumuladas, estas están definidas en (36):

$$\begin{aligned} q_0 &:= 0 \\ q_i &:= p_0 + \dots + p_i \quad (\forall i = 1, \dots, n) \end{aligned} \quad (36)$$

La selección se realiza por medio de la generación de números aleatorios entre 0 y 1, en la cual se muestrea cada puntuación en orden ascendente hasta encontrar el intervalo entre el que este el número aleatorio en consideración de acuerdo a (37).

$$q_{i-1} < a < q_i \quad (37)$$

Siendo a un número aleatorio determinado e i el individuo escogido.

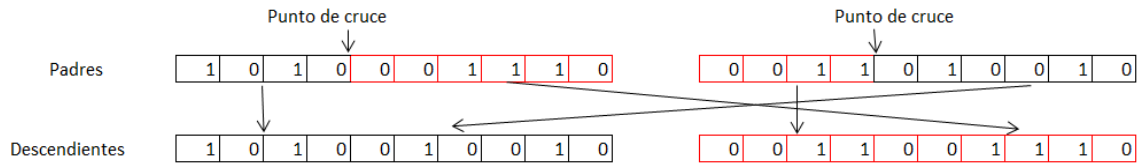
Los individuos seleccionados, también denominados padres, los cuáles entrarán en el proceso de los operadores genéticos, pueden o no reemplazar la totalidad de la población. En el algoritmo presentado en este trabajo la población es totalmente renovada generación por generación, en la cual los individuos más adaptados sobrevivirán a medida que transcurran las iteraciones. A este tipo de algoritmo genético se le denomina *AGs generacionales*.

En resumen, cada AV es evaluado según el método de selección para determinar si puede seguir siendo parte de la población y afectarse por los operadores genéticos, si esto no ocurre, este vector será eliminado de la población debido a su bajo nivel de adaptación.

A continuación se explicarán cada uno de los operadores genéticos implementados en el algoritmo propuesto. Estos operan de acuerdo a una tasa de ocurrencia y su objetivo principal es crear individuos que no estaban presentes en la población anterior para acceder a nuevas regiones en el espacio de búsqueda [13]. Para el algoritmo genético simple se planteó trabajar con los métodos de cruce y mutación.

2.2.2.5 Operador de cruce: Este operador selecciona dos padres y corta sus cadenas vectoriales en una posición escogida al azar, para producir dos tramos iniciales y dos tramos finales. Luego se intercambian los tramos finales de los padres en dicha posición, este tipo de cruce se le conoce como *cruce monopunto*. Ambos descendientes heredan genes de cada uno de los padres. La Figura 18 ejemplifica lo descrito anteriormente:

Figura 19. Ejemplo de cruce monopunto.



Fuente: Página web: Universidad del País Vasco. Algoritmos Genéticos [13].

El operador de cruce generalmente no se le aplica a todos los individuos, sino que se aplica de forma aleatoria con una probabilidad entre 0,5 y 1 por individuo, es decir, a cada individuo se le asigna un número aleatorio entre 1 y 0, luego este se compara con la tasa de cruce de acuerdo a (38) [14].

$$si \# aleatorio < tasa \ de \ cruce \ \rightarrow \ se \ selecciona \ individuo \ (38)$$

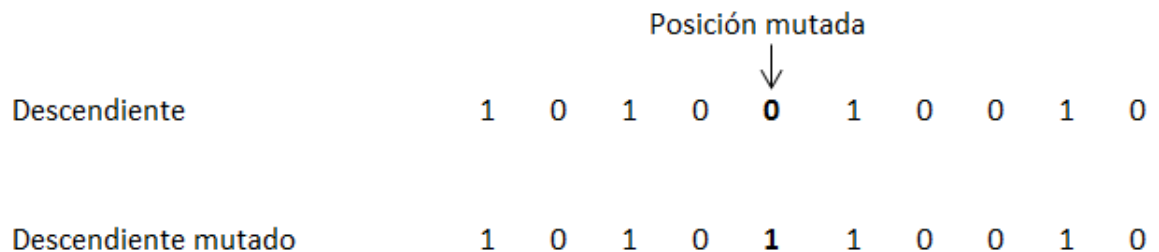
En el algoritmo propuesto no es posible que la pareja de padres sea conformada por el mismo individuo ni tampoco que se seleccione el mismo padre en la misma generación.

Existen otros tipos de operadores de cruce además del cruce monopunto, como el operador de cruce de dos puntos, el operador de cruce uniforme y el operador de cruce basado en la función objetivo.

2.2.2.6 Operador de mutación: La mutación se considera un operador básico, que proporciona un pequeño elemento de aleatoriedad en las cercanías de los individuos. Es aceptado que el operador de cruce efectúa la búsqueda a lo largo de las posibles soluciones del problema, sin embargo, varios investigadores han detectado que el operador de mutación gana importancia a medida que los individuos están cerca de converger [14].

La aplicación de la mutación consiste en cambiar el valor de una de las posiciones de la cadena, de tal forma que si es cero cambia a uno, y si es uno pasa a cero. Cada posición se escoge de forma aleatoria, el procedimiento descrito se muestra en la Figura 20.

Figura 20. Operador de mutación aleatoria bit a bit.



Fuente: Página web: Universidad del País Vasco. Algoritmos Genéticos [13].

Conforme se había indicado para la expresión de cruce (38), para cada posición de cada individuo se comprueba la tasa de mutación, y si se cumple se aplica el operador. Habitualmente la tasa de mutación es bastante pequeña (en torno al 0,1%) comparada con el operador de cruce, sin embargo esto no es una norma general [13].

2.2.2.7 Proceso de evaluación: Después de cada generación se revisa la adaptación de cada individuo, así como la adaptación media de la población, la adaptación relativa y se ubica el individuo que tenga la mayor adaptación en la población. El propósito de obtener estos parámetros consiste principalmente en identificar los individuos con la mayor adaptación como un parámetro de entrada para el mecanismo de selección explicado en la Sección 0, en el cuál los individuos a seleccionar son escogidos proporcionalmente al valor que le asigne la función de adaptación. También es necesario mantener un control en

cada generación, de tal forma que se pueda observar cuál es su evolución para hacer los análisis respectivos.

En la Sección 0 se mostrará la estructura general del método de observabilidad y proceso de optimización. A continuación se presentará la metodología propuesta como mejora de la presentada en [6].

2.3 MÉTODO PARA LA DETERMINACIÓN DE LAS NODOS CRÍTICOS A MEDIR EN LOS SISTEMAS DE DISTRIBUCIÓN

Debido a la naturaleza aleatoria de búsqueda de los algoritmos genéticos, los resultados obtenidos difieren entre uno y otro en cada ejecución. Por lo tanto, se encontrarán alternativas de configuraciones óptimas en diversas ocasiones, las cuáles compartirán el mismo valor en el criterio de decisión, el cual es el costo del sistema de monitorización. En consecuencia, es necesario obtener otro criterio de decisión que ayude a definir cuál es la configuración óptima, a partir de las ya obtenidas que tengan el mismo costo y número de monitores.

Por lo tanto se decidió adoptar la metodología presentada en [7], y se implementó en el sistema de distribución de 34 barras del IEEE.

La evaluación de las características de la red se evalúa de acuerdo a los siguientes parámetros:

- Topología de la red: red radial o red anillada.
- Impedancia de la red: longitud y tipos de conductores de línea aéreos.
- Existencia de fuentes con distorsión armónica: industriales o residenciales.

El procedimiento consiste en la evaluación de resultados obtenidos a través del software ATP, mediante las herramientas de regresión y correlación. Luego, a estos resultados se le realiza un análisis que permite valorar cada una de las posibles configuraciones. Estos análisis serán presentados a continuación.

2.3.1 Procedimiento de regresión y correlación. La metodología empieza con la localización de cargas armónicas, las cuales presentan valores predeterminados de corriente armónica inyectada en cada nodo del sistema, de tal forma que se obtenga la tensión armónica del sistema en todos los nodos por medio de (39).

$$\begin{matrix} V_{h1} & Z_{11} & \dots & Z_{1K} & I_{h1} \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ V_{hK} & Z_{K1} & \dots & Z_{KK} & I_{hK} \end{matrix} = \dots \quad (39)$$

Para la obtención de estos resultados, se utilizó el software ATP. El proceso que se implementa consiste en ubicar una carga que inyecte un flujo armónico a la red eléctrica en un nodo. Luego se registran las tensiones eficaces de los armónicos de interés para todos los nodos del sistema. Este proceso se debe repetir hasta que la carga que inyecta el flujo armónico se haya ubicado en todos los nodos del sistema, tomándose en cada ejecución el registro de las tensiones eficaces de los armónicos de interés para todos los nodos del sistema. Para este proyecto, se recolectaron las mediciones de tensión eficaz del tercer armónico para su análisis, debido a que es el armónico que presenta mayor magnitud después del armónico fundamental, de acuerdo a los resultados de las simulaciones realizadas en este mismo programa.

Una vez se hayan obtenido las medidas se realizan dos análisis paralelos: correlación y regresión.

- El análisis de correlación cuantifica la intensidad de la relación lineal y proporcionalidad entre dos variables estadísticas. En concreto si se tienen dos variables (X e Y) existe correlación si al aumentar los valores de X lo hacen también los de Y.

El coeficiente de correlación es dado en (40):

$$r_{xy} = \frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y})}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2 \sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2}} \quad (40)$$

Para un coeficiente de correlación $r_{xy} = 1$ los valores de las variables x e y son localizadas exactamente sobre una coherencia recta, para un coeficiente de correlación $r_{xy} = 0$ no hay una coherencia discernible de las variables disponibles. Para este proyecto se considera una buena correlación $r_{xy} > 0,8$, puesto que es importante una alta magnitud de este coeficiente.

- El análisis de regresión determina la influencia de una variable x en una variable y, ese decir, se modela la relación entre las dos variables. La Ecuación (41) establece la relación analítica entre las variables.

$$y = a_0 + a_1 * x \quad (41)$$

Los coeficientes de regresión para $a_1 = 1$ y $a_0 = 0$ indican un comportamiento idéntico de las variables medidas. Para las ejecuciones del siguiente trabajo los siguientes límites de a_1 fueron seleccionados: $0,8 < a_1 < 1,25$, donde a_1 mide la influencia que tiene la variables x sobre y. El parámetro a_0 no se tiene en cuenta en el análisis.

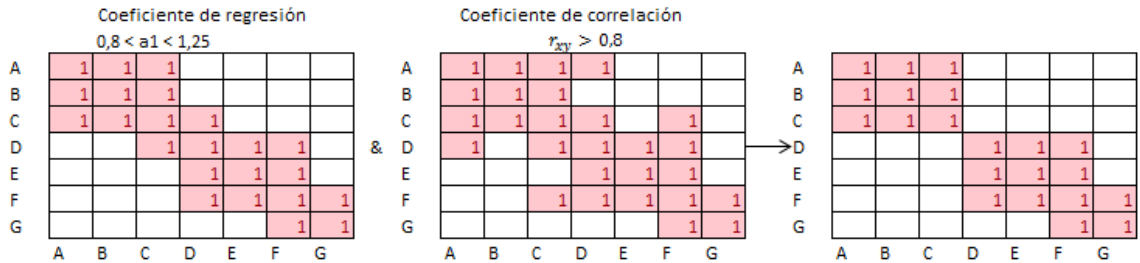
Los datos de entrada para los análisis de regresión y correlación son las tensiones nodales del tercer armónico, tal como fue explicado anteriormente. Los datos pueden ser organizados como se muestra en la Tabla 2, para un sistema de ejemplo de 7 barras. Donde se puede identificar que en las filas están ubicadas las variables de tensión.

Tabla 2. Posible agrupación para los datos de un sistema de 7 barras.

	Carga en A	Carga en B	Carga en C	Carga en D	Carga en E	Carga en F	Carga en G
Nodo A	VA	VA	VA	VA	VA	VA	VA
Nodo B	VB	VB	VB	VB	VB	VB	VB
Nodo C	VC	VC	VC	VC	VC	VC	VC
Nodo D	VD	VD	VD	VD	VD	VD	VD
Nodo E	VE	VE	VE	VE	VE	VE	VE
Nodo F	VF	VF	VF	VF	VF	VF	VF
Nodo G	VG	VG	VG	VG	VG	VG	VG

Para obtener los resultados de regresión y correlación, se efectúan las operaciones por columnas, en el caso que sean organizadas como en la Tabla 2. Posteriormente, los resultados se organizan de acuerdo a la Figura 21. A los resultados de cada posición de la matriz, se asigna un valor binario, según el intervalo en el que se encuentren que fue especificado anteriormente. Finalmente las dos matrices se combinan mediante una operación lógica AND, obteniéndose una matriz resultante. Para el caso de un sistema de 7 barras descrito anteriormente, la matriz resultante es la última que se ve en la Figura 20.

Figura 21. Representación matricial del modelo de correlación y regresión.



Fuente: Artículo de conferencia. Determination of the optimum measuring positions for power quality monitoring [7].

2.3.2 Análisis de los resultados obtenidos de los procesos de regresión y correlación. En la representación gráfica presentada en la Figura 20, se puede reconocer que en la matriz resultante se pueden identificar grupos de posiciones no-nulas, los cuales describen sectores de nodos con un comportamiento similar. Naturalmente estos nodos se sitúan en la vecindad de cada una.

La formación de grupos en la matriz binaria resultante indica una tendencia lineal entre las tensiones nodales analizadas, comparados con las regiones que no formen grupos entre sí. Por lo tanto, se afirmaría que los nodos que se encuentren dentro de los grupos necesitarían menos monitores comparado con los nodos que no están en ningún grupo.

Esto también se hace evidente mediante el análisis de la suma correspondiente a las filas de la matriz binaria resultante, ya que esas corresponden a las variables de tensión del sistema, obteniéndose un valor que identifica a cada nodo de la red. Este análisis permite establecer una comparación entre los nodos que conformen el sistema, estableciéndose que ante un mayor valor obtenido de un nodo determinado con respecto a otro, este podrá observar las variables de estado de

otro nodo con mayor precisión. Por lo tanto, se propone utilizar el valor de esta suma para establecer cuáles son los nodos críticos dentro del sistema, identificándose estos como los nodos en los cuales la suma sea menor con respecto a la de los demás. Esto se puede describir mediante la ayuda de la Figura 20. La Tabla 3 muestra la suma de las filas de la matriz resultante de acuerdo al sistema de la Figura 21.

Tabla 3. Sumatoria de filas para la Figura 2.20.

Sumatoria de Filas	
A	3
B	3
C	3
D	3
E	3
F	4
G	2

Del resultado de la Tabla 3 se puede identificar que el nodo G tiene el valor más bajo con respecto a los otros nodos, por lo tanto, este nodo será etiquetado como crítico y la localización de un medidor allí es requerida para una buena estimación del sistema.

Conforme a lo obtenido en la tabla anterior, se propone utilizar estos resultados para establecer una escala en la que se puedan comparar las configuraciones ya obtenidas con la metodología anterior, con el fin de establecer cuál de todas es la más óptima. Para este objetivo se plantea ponderar con un valor más alto los nodos a los cuáles la suma de filas sea más baja, esto se realiza mediante la asignación de un valor base presente en la tabla que corresponde al más alto obtenido, luego los demás valores se calculan a través de la división del valor

base entre el valor correspondiente a la posición específica, a estos valores se les etiquetara como en por unidad (p.u) y se ejemplificarán a través de la Tabla 4.

Tabla 4. Valores en p.u correspondiente al sistema de ejemplo.

Sumatoria Total de Filas	Valor en p.u	
A	3	0,75
B	3	0,75
C	3	0,75
D	3	0,75
E	3	0,75
F	4	1
G	2	0,5

Luego de obtener los valores en p.u para cada nodo, se invierte cada posición por medio de la división de 1 sobre el valor respectivo de cada nodo, los resultados obtenidos se muestran en la Tabla 5.

Tabla 5. Valores a comparar en el sistema de Figura 21..

Sumatoria Total de Filas	Valor en p.u	Valor a Comparar	
A	3	0,75	1,33
B	3	0,75	1,33
C	3	0,75	1,33
D	3	0,75	1,33
E	3	0,75	1,33
F	4	1	1
G	2	0,5	2

Los valores resultantes representan el criterio de comparación que se efectuaran entre las distintas configuraciones, este proceso se llevara a cabo por medio de la asignación de los valores obtenidos a cada una de las barras a las cuales se localizaran los monitores, posteriormente estos valores se sumaran y la

configuración que obtenga el número más alto, será seleccionada como la más óptima.

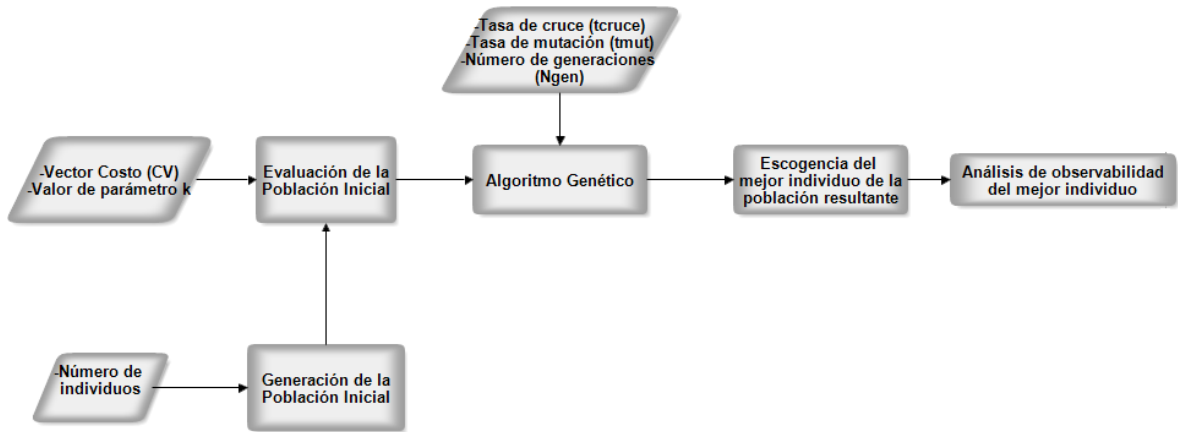
En la siguiente sección se mostrará de forma general el método, identificando sus rasgos más importantes y la relación concreta de esta con las otras dos presentadas anteriormente.

2.4 ESTRUCTURA DEL MÉTODO PROPUESTO

Se han descrito las tres partes constitutivas que hacen parte de la metodología general de la estrategia de localización óptima para monitores de calidad de la potencia para la estimación de estado armónico en sistemas de distribución de energía eléctrica. En la siguiente sección se mostrará la estructura general de los tres métodos la forma como estos se relacionan con la ayuda de diagramas de flujo.

2.4.1 Estructura general del método de observabilidad y proceso de optimización. La Figura 22 muestra de forma resumida la combinación de las estrategias de observabilidad y optimización presentadas en las secciones anteriores.

Figura 22. Estructura principal de la metodología.



A continuación se realiza una descripción de cada uno de los bloques que componen los métodos y sus características más importantes dentro de la localización óptima:

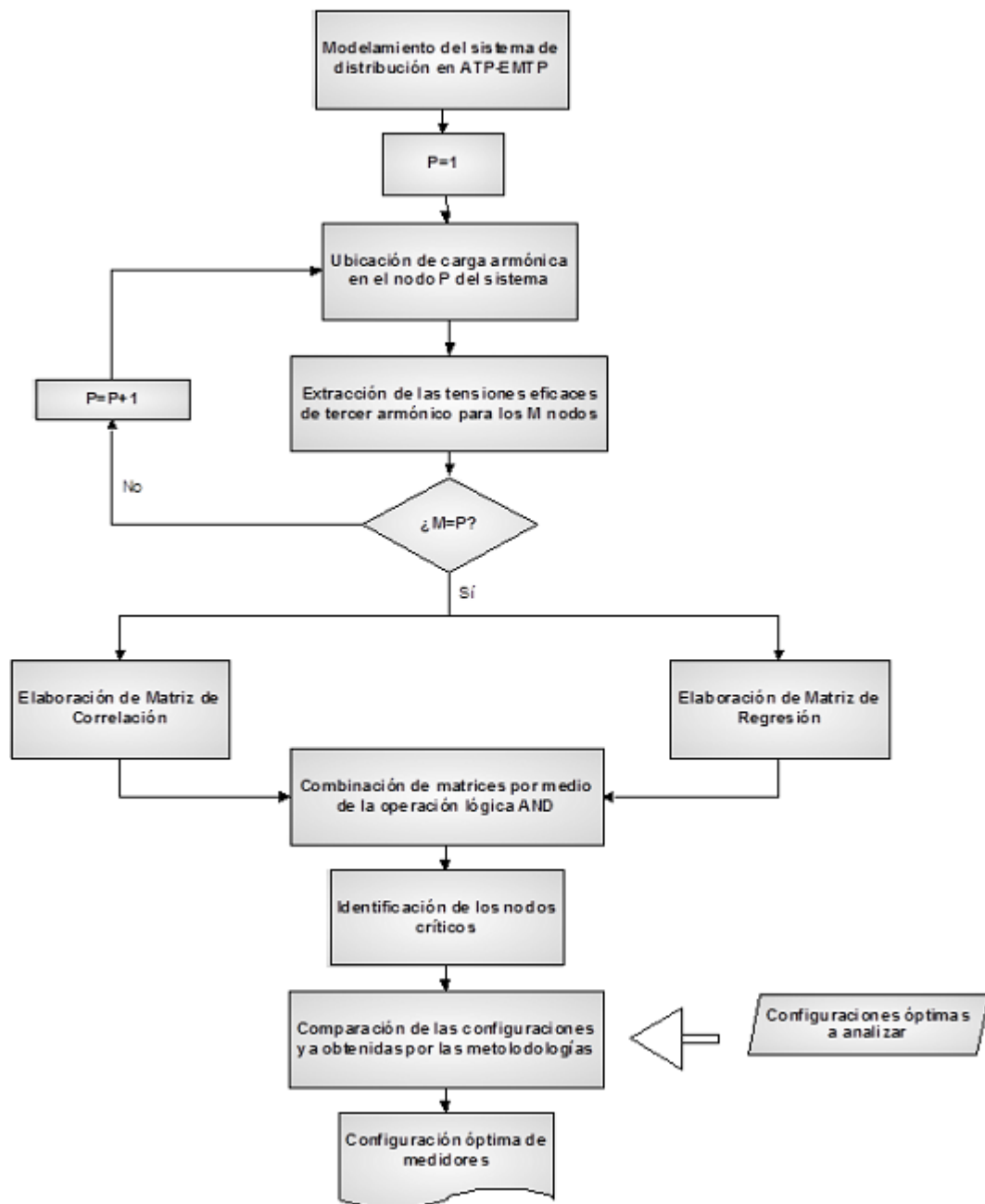
- 1. Generación de la población inicial:** Se genera la población inicial aleatoria, la cual consiste en alternativas de configuración de monitores representados en el vector AV agrupados en una matriz. El número de configuraciones a evaluar se define por el número de individuos que entran al proceso iterativo.
- 2. Evaluación de la población inicial:** Se realiza la evaluación de cada uno de las alternativas de configuración de monitores constituyentes de la población por medio de la Ecuación (34). De acuerdo a esta expresión, se cuantifica la adaptación de cada uno de las alternativas conforme a su valor en la función costo, descrito en la Ecuación (32), y el número de ceros presentes en OV, como el resultado del análisis de observabilidad realizado para cada uno de las alternativas de esta población. Este último proceso se efectúa según se muestra en la Figura 1.

- 3. Algoritmo genético:** Se realiza el proceso de optimización por medio de los resultados obtenidos de los bloques anteriores, puesto que la primera población se modificará a lo largo de cada una de las iteraciones del algoritmo genético, y la evaluación de esta población es necesaria para el proceso de selección realizado dentro del algoritmo con el fin de encontrar las alternativas de mayor valor para la función de evaluación. Además, se ingresan los valores de las tasas de mutación y cruce, y el número de generaciones a procesar. Para una mejor comprensión, el proceso de optimización llevado a cabo en el algoritmo genético se muestra en la Figura 18.
- 4. Escogencia del mejor individuo:** Cuando las iteraciones del algoritmo genético terminen, se revisa la población final resultante y se registran las configuraciones que ofrezcan el menor costo y menor número de medidores dentro de las alternativas de la población final resultante.
- 5. Análisis de observabilidad del mejor individuo:** Se revisan los vectores de observabilidad (OV) de las alternativas resultantes del bloque anterior con el fin de comprobar el cumplimiento de esta restricción. Si una configuración no cumple con la misma, esta no es tomada en cuenta para el análisis posterior de decisión entre las configuraciones con el mismo costo.

Finalmente, se extraen las configuraciones de monitores resultantes, estas van a ser procesadas de acuerdo a la metodología de detección de nodos críticos con el fin de obtener una única configuración que sea determinada como la configuración más óptima a implementar en el sistema de distribución.

2.4.2 Estructura general de detección de nodos críticos en sistemas de distribución de energía eléctrica. En la Figura 23 se muestra el diagrama de flujo para el método propuesto para la detección de los nodos críticos en los nodos del sistema, el resultado final de este método concluye con la solución única y definitiva para la configuración de monitores óptima que cumple con todos los requerimientos planteados.

Figura 23. Diagrama de flujo para la obtención de la configuración óptima de monitores.



El desarrollo del diagrama de flujo para el método es el siguiente:

- Se inicia con el modelamiento de la red eléctrica en ATP-EMTP teniendo en cuenta todos los parámetros de la topología, como impedancias de línea, cargas a tierra tanto monofásicas como trifásicas, barras, transformadores, entre otros.
- Se ubica una carga que genere armónicos pre-determinada, tomando en cuenta los diferentes cambios en el nivel de tensión del sistema, en cada uno de los nodos de la red.
- Se registran los valores eficaces de tensión de tercer armónico para cada nodo, habiéndose ubicado ya la carga armónica en la barra según el paso anterior, es decir, se deben obtener registros para los M nodos que contenga la red eléctrica por cada carga armónica ubicada.
- El término del bucle se da cuando se ha completado la localización de las cargas en los P nodos de la red, para todos los M registros que se obtuvieron.
- Una vez finalizado todo el registro de datos, estos se ordenan de acuerdo a lo establecido en la figura 21. Luego se realizan los cálculos correspondientes al análisis de correlación y regresión mencionado en (40) y (41). En conclusión, se aplican los criterios de evaluación presentados y se obtienen dos matrices del mismo tamaño, con elementos binarios (0 y 1) en cada una de sus posiciones.
- Las dos matrices se combinan por medio de la operación lógica AND en cada una de sus posiciones, de acuerdo a lo ilustrado en la Figura 20, resultando en una matriz final que será analizada posteriormente.
- Los resultados de la suma correspondiente a las filas de la matriz resultante se ordenan ascendentemente. De acuerdo a esto, los nodos a los cuáles el valor de la suma sea menor con respecto a los demás se etiquetarán como los nodos críticos de la red. Todos los nodos recibirán un valor de acuerdo a la posición en que se encuentren siguiendo el procedimiento descrito en la Sección 0.
- Las configuraciones obtenidas de la metodología presentada en la Figura 22 son evaluadas a partir del procedimiento realizado en el paso anterior. En este bloque se elabora una tabla que contiene cada uno de los nodos pertenecientes a éstas, posteriormente se asigna a cada una de las posiciones de la tabla los

valores obtenidos para cada nodo en el paso anterior, según corresponda a las barras incluidas en la tabla.

- La configuración de monitores en la cual la suma total de las posiciones de la tabla realizada en el bloque anterior, tenga un mayor valor con respecto a las otras configuraciones en estudio, es considerada como la mejor y el problema de localización óptima estará resuelto.

Conforme a lo anterior, se procederá a validar los métodos expresados a través de dos casos de estudio: el sistema de transmisión de 14 barras del IEEE y el sistema de distribución de 34 barras del IEEE.

3. IMPLEMENTACIÓN DEL MÉTODO PROPUESTO

El método para la localización óptima de monitores de calidad de potencia para la estimación de estado armónico en sistemas de distribución de energía eléctrica es puesta a prueba por medio de los sistemas de prueba del IEEE de 14 y 34 barras. Cabe aclarar que el sistema de 14 barras del IEEE corresponde a una topología de transmisión, sin embargo, debido al extenso uso que se le ha dado en la literatura referente al tema a tratar, en este proyecto fue utilizado como caso de estudio.

3.1 SISTEMA DE 14 BARRAS DEL IEEE

Se utilizó el sistema de 14 barras de la IEEE como una red de prueba para validación de resultados debido a que en [6] esta misma se implementó, por lo tanto, se comparan los resultados obtenidos, puesto que se realizaron algunas modificaciones a los argumentos de entrada del algoritmo genético. En este caso de estudio no fue incluido el análisis de detección de nodos críticos. Este fue realizado solamente para el sistema de 34 barras.

Según los resultados reportados en [6], el número óptimo de monitores es de 7 y la localización de los mismos se presenta en la Tabla 6.

Tabla 6. Configuración del sistema de monitorización para el sistema de 14 barras.

Barras a Medirse	Secciones a Medirse	
	Desde la Barra	A la Barra
2	2	3
5	5	1
6	6	9
8	7	8
9	4	9
10	10	11
14	13	14

Fuente: Artículo de revista: Harmonic State Estimation Through Optimal Monitoring Systems [6].

En las siguientes secciones se muestran los datos de entrada para la metodología, la configuración encontrada como óptima y la comprobación de la observabilidad de esta según el procedimiento mostrado en la Figura .

3.1.1 Datos de entrada y configuración obtenida. Conforme al esquema general mostrado en la Figura 18., los valores de entrada para el algoritmo genético son mostrados en la Tabla 7.

Tabla 7. Datos de entrada para la simulación del sistema de 14 barras.

Parámetro	Valor
Tasa de cruce	75%
Tasa de mutación	1%
Número de generaciones	200
Número de individuos	100
K	250

Para la asignación del costo a cada barra del sistema según (22), se optó por ingresar valores en p.u conforme a los niveles de tensión presentes en la red eléctrica, seleccionando una jerarquía para cada uno de ellos, estos valores se suponen puesto que no se tiene información acerca de los costos ingresados en [6]. El vector de costo implementado se muestra en la Tabla 8.

Tabla 8. Vector costo ingresado en la metodología de 14 barras.

Vector Costo	
Barras	Valor p.u
1-2-3-4-5	1
8	0,7
6-9-10-11-12-13-14	0,8

Conforme a los datos ingresados en la Tabla 7, se ejecutó el algoritmo genético, obteniéndose diversas configuraciones de monitorización, llegándose a uno en común que requiere la instalación de 4 monitores, lo cual mejora el resultado presentado en [6], este se muestra en la Tabla 9.

Tabla 9. Resultados obtenidos para el sistema de 14 barras.

Barras a Medirse	Secciones a Medirse	
	Desde la Barra	A la Barra
4	4	7
5	5	2
9	9	10
13	13	6

Según se describió en el Capítulo 2, se mostrarán los distintos vectores que intervinieron en el proceso de obtención de la configuración óptima monitores, que hacen parte de la metodología de observabilidad.

3.1.2 Desarrollo del método de observabilidad con la configuración obtenida para el sistema de 14 barras. De acuerdo a la Tabla 9, la cual es el resultado del proceso de optimización elaborado, el vector de localización (AV) para esta configuración es el mostrado en la Tabla 10.

De acuerdo a la topología que se muestra en la Figura 23, se puede identificar la presencia de un transformador tridevanado. Este tiene una barra *ficticia* que hace parte del modelado circuital del mismo. Considerando esta propiedad, en esta barra se aplicó la restricción de no localizar un transformador de potencial porque esta no es accesible físicamente. Sin embargo, la corriente de las líneas que ingresan a la barra pueden ser observadas a través de la ubicación de transformadores de corriente en las barras adyacentes a la barra ficticia. Este análisis se utilizó para la elaboración de AV, en cada una de las posiciones correspondientes.

Las posiciones del AV son indicadas en la última columna de la Tabla 10, en la cual, las posiciones no-nulas de la última columna corresponden a la ubicación de las barras donde se localizan los monitores que se presentan en la Tabla 9.

Tabla 10. Vector de localización (AV) para la configuración encontrada

Medidor			
Tensión	Corriente		AV
1	1	2	0
1	1	5	0
2	2	1	0
2	2	3	0
2	2	4	0
2	2	5	0
3	3	2	0
3	4	4	0
4	4	2	0
4	4	3	0
4	4	5	0
4	4	7	1
4	4	9	0
5	5	1	0
5	5	2	1
5	5	4	0
5	6	6	0
6	6	5	0
6	6	11	0
6	6	12	0
6	6	13	0
8	8	7	0
9	9	4	0
9	9	7	0
9	9	10	1
9	9	14	0
10	10	9	0
10	10	11	0
11	11	6	0
11	11	10	0
12	12	13	0
13	13	6	1
13	13	12	0
13	13	14	0
14	14	9	0
14	14	13	0
12	12	6	0

El vector de conectividad (CnV), que se obtiene a través de la matriz CnM y se relaciona con AV por medio de (11), se muestra en la última columna de la Tabla 11.

Tabla 11. Vector de conectividad para sistema de 14 barras.

Variables de estado		CnV	
Tensión	1	0	
	2	1	
	3	0	
	4	1	
	5	1	
	6	1	
	7	1	
	8	0	
	9	2	
	10	0	
	11	1	
	12	0	
	13	1	
	14	1	
Corriente	1	2	0
	1	5	0
	2	3	0
	2	4	0
	2	5	1
	3	4	0
	4	5	0
	4	7	0
	4	9	1
	5	6	0
	6	11	1
	6	12	0
	6	13	0
	7	8	0
	7	9	1
	9	10	0
	9	14	0
10	11	0	
12	13	0	
13	14	1	

A continuación se muestra el vector RV y CcV resultantes a través de la Tabla 12 y la Tabla 13, respectivamente, estos vectores corresponden a la última columna de cada una de las tablas.

Tabla 12. RV para configuración de 14 barras

Variables de estado			RV
Tensión	1		0
	2		0
	3		0
	4		0
	5		0
	6		0
	7		0
	8		0
	9		0
	10		0
	11		0
	12		0
	13		0
	14		0
Corriente	1	2	0
	1	5	0
	2	3	0
	2	4	1
	2	5	1
	3	4	0
	4	5	1
	4	7	1
	4	9	2
	5	6	0
	6	11	1
	6	12	0
	6	13	0
	7	8	0
	7	9	2
	9	10	0
	9	14	2
	10	11	0
	12	13	0
13	14	1	

Tabla 13. CcV para configuración de 14 barras.

Variables de estado		CcV	
Tensión	1	1	
	2	0	
	3	1	
	4	0	
	5	0	
	6	0	
	7	0	
	8	1	
	9	0	
	10	2	
	11	0	
	12	1	
	13	0	
	14	2	
Corriente	1	2	0
	1	5	0
	2	3	0
	2	4	0
	2	5	0
	3	4	0
	4	5	0
	4	7	0
	4	9	0
	5	6	0
	6	11	0
	6	12	0
	6	13	0
	7	8	0
7	9	0	
9	10	0	
9	14	0	
10	11	0	
12	13	0	
13	14	0	

De acuerdo a (18), la suma de los tres vectores tiene como resultado el Vector de Pre-Observabilidad (POV), este es mostrado en la última columna de la Tabla 14.

Tabla 14. POV para la configuración de 14 barras resultante.

Variables de estado		POV	
Tensión	1	1	
	2	1	
	3	1	
	4	1	
	5	1	
	6	1	
	7	1	
	8	1	
	9	2	
	10	2	
	11	1	
	12	1	
	13	1	
	14	3	
Corriente	1	2	0
	1	5	0
	2	3	0
	2	4	1
	2	5	2
	3	4	0
	4	5	1
	4	7	1
	4	9	3
	5	6	0
	6	11	2
	6	12	0
	6	13	0
	7	8	0
	7	9	3
	9	10	0
	9	14	2
	10	11	0
	12	13	0
13	14	2	

Posteriormente, se obtuvo el vector de observabilidad (OV), teniendo en cuenta la Ecuación (19), el cual se muestra en la última columna Tabla 15.

Tabla 15. Vector de Observabilidad (OV) para la configuración de 14 barras

Variables de estado		OV	
Tensión	1	1	
	2	1	
	3	1	
	4	1	
	5	1	
	6	1	
	7	1	
	8	1	
	9	2	
	10	2	
	11	1	
	12	1	
	13	1	
	14	3	
Corriente	1	2	1
	1	5	1
	2	3	1
	2	4	1
	2	5	2
	3	4	1
	4	5	1
	4	7	1
	4	9	3
	5	6	1
	6	11	2
	6	12	1
	6	13	1
	7	8	1
	7	9	3
	9	10	4
	9	14	2
	10	11	2
12	13	1	
13	14	2	

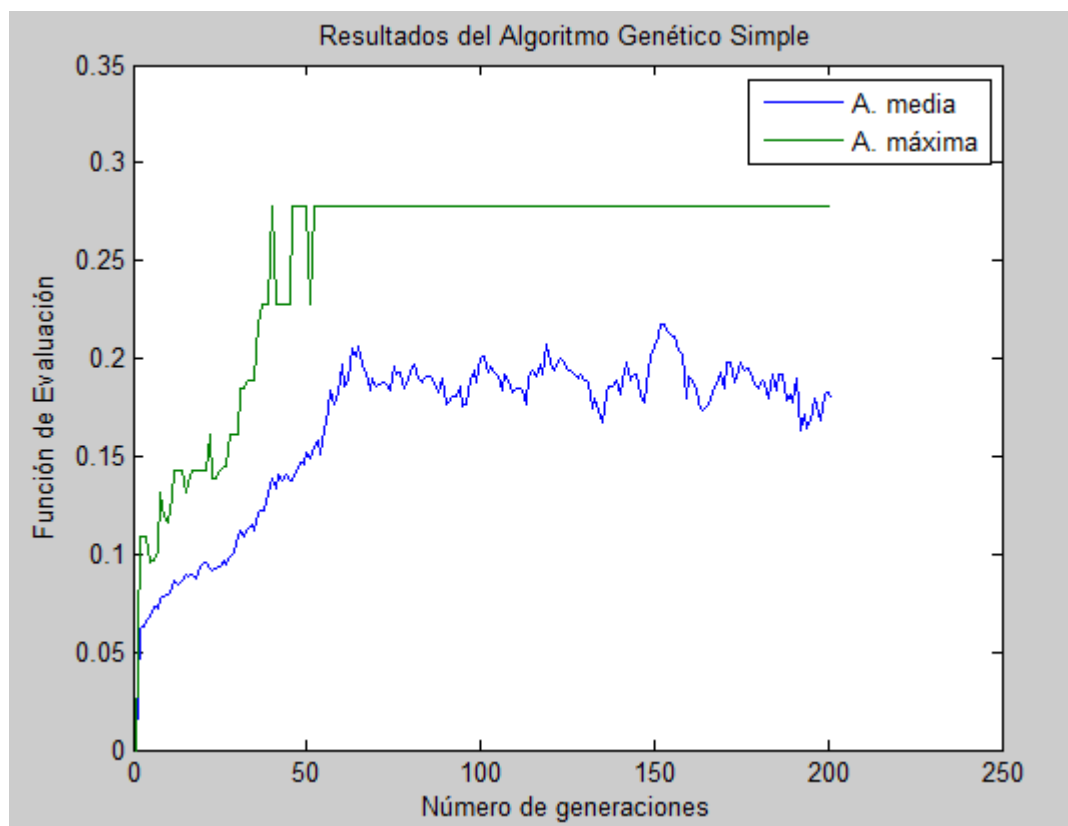
De acuerdo a la Tabla 15, se puede observar que el vector OV no contiene ninguna posición nula, por lo tanto está comprobada la observabilidad por medio de esta condición.

De acuerdo a los resultados obtenidos en [6], se obtuvo una disminución en el número de medidores. Este resultado se obtiene a través del mismo método presentado en este trabajo, sin embargo para el trabajo de grado hubo diferencias

en los datos de entrada para el algoritmo genético. Específicamente se encontró que a medida que se aumentaba el número de generaciones, los individuos de la población resultante convergían hacia configuraciones con menor número de monitores, cumpliendo estas con la restricción de observabilidad.

En cuanto al proceso iterativo del Algoritmo Genético Simple, se registraron los resultados de la función de evaluación o adaptaciones, calculándose las adaptaciones medias y máximas para cada generación, las cuales se muestran en la Figura 25.

Figura 25 Análisis de resultados del Algoritmo Genético Simple para el sistema de 14 barras.



Aunque para la adaptación media se tiene una gran variación, debido al operador de mutación en gran medida, la adaptación máxima se mantuvo constante durante casi todas las generaciones. A causa de esto se obtuvieron varias configuraciones similares en la última generación. Otra característica importante es el poco acercamiento de la adaptación media y máxima a medida que transcurren las generaciones, lo que evita que todas las alternativas resultantes sean iguales entre sí, para evitar esto se seleccionaron los mejores individuos en la última generación, como los de menor número de monitores y menor costo, para la expresión de los resultados del algoritmo.

3.2 SISTEMA DE 34 BARRAS DEL IEEE

Se utilizó el sistema de 34 barras de la IEEE como caso de estudio principal de este trabajo de grado. Para su análisis se implementó la metodología principal junto con el análisis adicional representado en la determinación de las posiciones óptimas de monitores respecto a las configuraciones que tuvieran el mismo costo.

3.2.1 Localización óptima de monitores para el sistema de 34 barras del IEEE. Los parámetros de entrada para la metodología se describen por medio de la Tabla 16.

Tabla 16. Parámetros de entrada para el sistema de 34 barras del IEEE.

Parámetro	Valor
Tasa de cruce	75%
Tasa de mutación	0,5%
Número de generaciones	700
Número de individuos	100
K	500

En el Anexo A se encuentra detallada las tres matrices de entrada para la metodología de observabilidad (CnM, RFM y RTM).

Para el vector costo se tuvo en cuenta la disminución en transformadores de instrumentación debido a la presencia de nodos monofásicos con respecto a los trifásicos, así como los cambios en el nivel de tensión. Los costos son asumidos en p.u. y la obtención de estos valores se muestra en el Anexo B. El vector de costo se muestra en la Tabla 17.

Tabla 17. Vector costo de entrada para la metodología de 34 barras.

Vector Costo 34 Barras		
Tipo de Nodos	Número Barras	Costo p.u
Trifásicos	800 - 802 - 806 - 808	1
Monofásicos	810 - 818 - 820 - 822	0.44
Baja tensión	888 – 890	0.534

Conforme a estos datos de entrada, y siendo consecuentes con que la metodología correspondiente al algoritmo genético converge a diversas soluciones en cada una de sus ejecuciones, se muestran tres de las configuraciones obtenidas como óptimas en las tablas Tabla 18 y 19.

Tabla 18. Primera configuración de monitores obtenida para el sistema de 34 barras.

Nodo del medidor De Voltaje	Nodos del medidor de Corriente		Medidor Trifásico	Medidor Monofásico
	Nodo A	Nodo B		
802	802	800	X	
808	808	806	X	
850	850	814	X	
820	820	818		X
824	824	826	X	
854	854	830	X	
888	888	832	X	
858	858	834	X	
846	846	844	X	
862	862	836	X	

Tabla 19. Segunda configuración alternativa de monitores para el sistema de 34 barras.

Nodo del medidor De Voltaje	Nodos del medidor de Corriente		Medidor Trifásico	Medidor Monofásico
	Nodo A	Nodo B		
802	802	800	X	
808	808	812	X	
816	816	850	X	
818	818	820		X
824	824	828	X	
852	852	854	X	
888	888	890	X	
834	834	858	X	
846	846	844	X	
836	836	862	X	

Tabla 20. Tercera configuración alternativa de monitores para el sistema de 34 barras

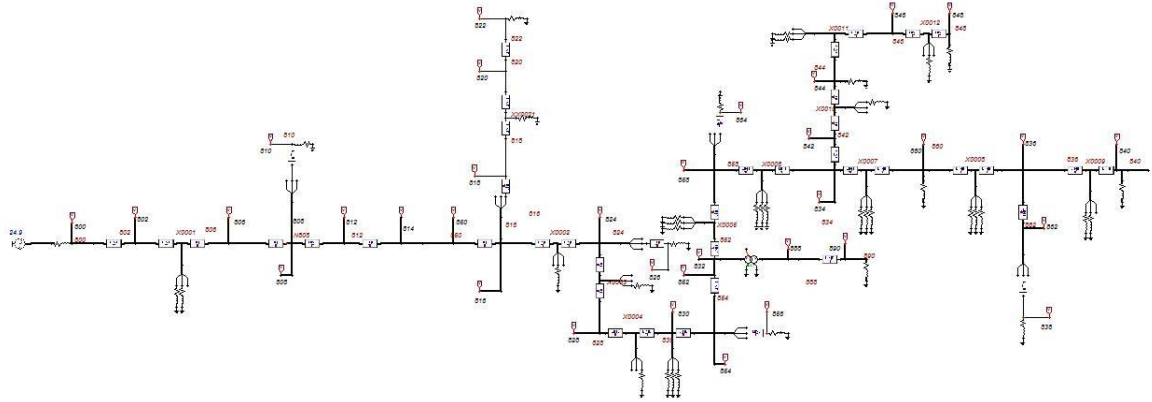
Nodo del medidor De Voltaje	Nodos del medidor de Corriente		Medidor Trifásico	Medidor Monofásico
	Nodo A	Nodo B		
806	806	802	X	
808	808	806	X	
850	850	814	X	
820	820	818		X
824	824	828	X	
852	852	854	X	
888	888	832	X	
858	858	834	X	
844	844	846	X	
862	862	836	X	

En el Anexo C se presenta el código implementado para la obtención de los resultados mostrados anteriormente. Este contiene el procedimiento del método de observabilidad y el proceso de optimización representado por el algoritmo genético.

Las tres configuraciones obtenidas son validadas a continuación por medio de lo presentado en la Sección 0.

3.2.2 Detección de nodos críticos para la obtención de la configuración óptima para el sistema de 34 barras. La Figura 26 muestra una imagen del sistema de 34 barras simulado en ATP.

Figura 26. Sistema de 34 barras implementado en ATP.



Las características de la carga que se implementó para el método son las presentadas en la Tabla:

Tabla 21. Características de la carga ingresada en ATP.

Corriente armónica	Magnitud [A]
I_1	2
I_3	0
I_5	0.4
I_7	0.2857
I_9	0
I_{11}	0.1818
I_{13}	0.1538

Los valores de fase para las corrientes armónicas presentados en la Tabla 21 se asignan de acuerdo a la fase en que se ubique la carga. Para la fase A se asigna un valor de 0 grados, y para las fases B y C se desfasan en -120 y 120 grados respectivamente, para todas las corrientes armónicas.

El modelo de carga anterior se ubica en un nodo del sistema, registrándose las tensiones eficaces de tercer armónico para todos los nodos de la red eléctrica. Este proceso se repite hasta que se ha ubicado la carga en cada nodo del sistema, este procedimiento se describe también a través de la Figura 23.

El resultado obtenido se procesa hasta obtener la matriz correspondiente para la fase A, por ser la fase con mayor carga monofásica conectada. La Figura 26 muestra la matriz resultante obtenida luego de efectuar el procedimiento expresado en la Sección 0 y la Figura 23, específicamente los análisis de regresión y correlación.

Figura 27. Matriz obtenida para la fase A.

	800	802	806	808	812	814	816	818	820	822	824	828	830	854	852	888	890	858	864	834	842	844	846	848	860	836	840	862
800	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0	0	0	0	1	0	1	0	0	1	1	1	1	1	1	1	0
802	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0	0	0	0	1	0	1	0	0	1	1	1	1	1	1	1	0
806	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0	0	0	0	1	0	1	0	0	1	1	1	1	1	1	1	0
808	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0	0	0	0	1	0	1	0	0	1	1	1	1	1	1	1	0
812	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0	0	0	0	0	0	1	0	0	1	1	1	1	1	1	1	0
814	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0	0	0	0	0	0	1	0	0	1	1	1	1	1	1	1	0
816	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0	0	0	0	0	0	1	0	0	1	1	1	1	1	1	1	0
818	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0	0	0	0	0	0	1	0	0	1	1	1	1	1	1	1	0
820	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0	0	0	0	0	0	1	0	0	1	1	1	1	1	1	1	0
822	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0	0	0	0	0	0	1	0	0	1	1	1	1	1	1	1	0
824	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0	0	0	0	0	0	1	0	0	1	1	1	1	1	1	1	0
828	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0	1	0	1	1	1	1	1	1	1	1	1
830	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0	0	1	1	0	0	0	0	0	0	0	1
854	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0	0	1	1	0	0	0	0	0	0	0	1
852	1	1	1	1	1	1	0	0	0	0	0	1	1	1	1	0	0	0	1	1	0	0	0	0	0	0	0	1
888	1	1	1	1	1	1	0	0	0	0	0	1	1	1	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
890	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
858	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0	0	0	0	0	1	0	0	1	1	1	1	1	1	1	1	
864	1	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	1	1	0	0	0	1	1	0	0	0	0	0	0	0	1
834	1	1	1	1	1	1	0	0	0	0	0	1	1	1	1	0	0	0	1	1	0	0	0	0	0	0	0	1
842	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0	0	0	0	0	1	0	0	1	1	1	1	1	1	1	1	0
844	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0	0	0	0	0	1	0	0	1	1	1	1	1	1	1	1	0
846	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0	0	0	0	0	0	1	0	0	1	1	1	1	1	1	1	0
848	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0	0	0	0	0	0	1	0	0	1	1	1	1	1	1	1	0
860	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0	0	0	0	0	0	1	0	0	1	1	1	1	1	1	1	0
836	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0	0	0	0	0	0	1	0	0	1	1	1	1	1	1	1	0
840	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0	0	0	0	0	0	1	0	0	1	1	1	1	1	1	1	0
862	1	1	1	1	1	1	0	0	0	0	0	1	1	1	1	0	0	0	1	1	0	0	0	0	0	0	0	1

En la matriz de la fase A, se pueden identificar ciertos nodos, los cuales presentan una correlación y regresión alta, mientras que otros difieren de estos, incluso para algunos nodos que se encuentran en las vecindades. Entonces, el análisis

mostrado en la Sección 0 es oportuno utilizarlo para la matriz obtenida para la fase A.

Para explicar de forma más comprensible lo arrojado por la matriz descrita en la Figura 27. Se muestran las Figuras 28 y 29.

Figura 28. Comparación de los datos obtenidos para los nodos 800 y 840.

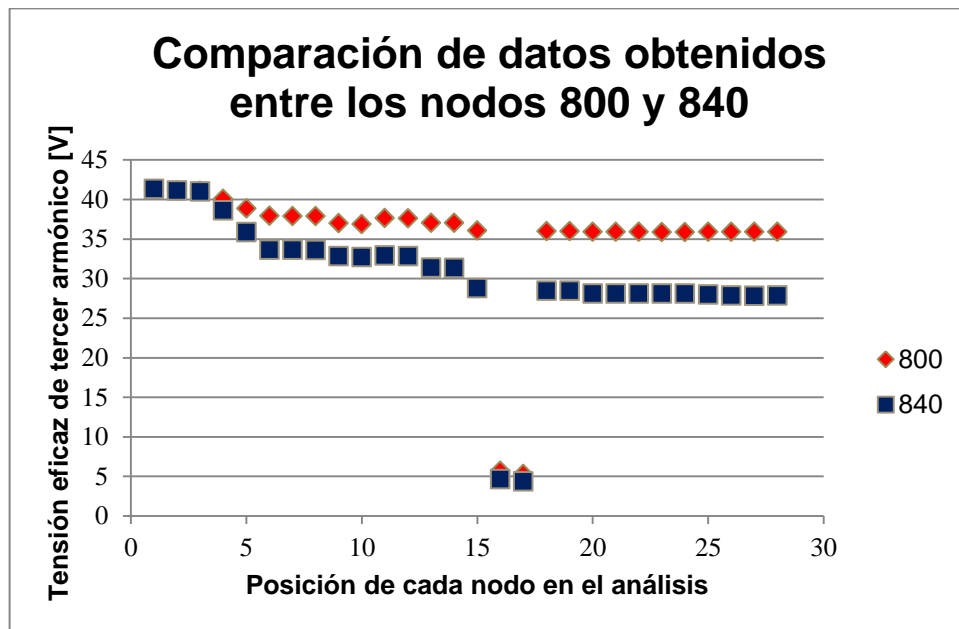
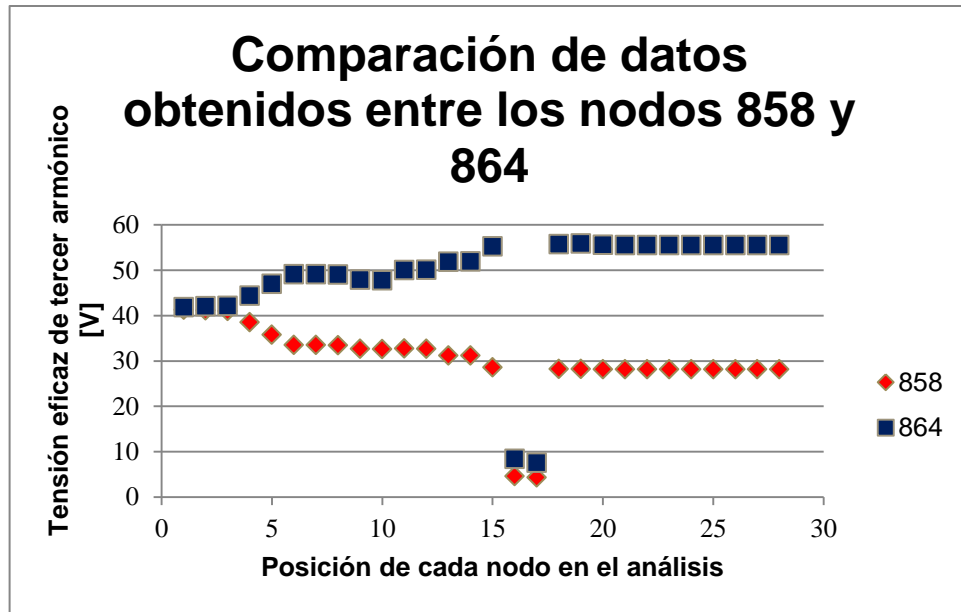


Figura 29. Comparación de los datos obtenidos para los nodos 858 y 864.



Estas figuras consisten en las gráficas de dispersión de los datos obtenidos entre nodos a los cuales les fueron asignados los mismos valores en la tabla resultante. Específicamente, se puede observar en la Figura 28 que entre los nodos 800 y 840 las tensiones eficaces de cada uno de los nodos no tienen la misma magnitud, sin embargo, las curvas tienen el mismo comportamiento, lo que indica una relación lineal entre los nodos a los cuáles se les asigno la carga, esto se ve reflejado en la valoración de no-nula entre estas dos variables. De otra parte, en la Figura 29 se observa que entre los nodos 858 y 864 no se puede establecer un comportamiento proporcional entre las gráficas, esto se ve reflejado con el valor asignado en la matriz, el cual es nulo. En resumen, los nodos a los cuales se les asigno un valor no-nulo en las filas respectivas posterior al análisis pueden ser estimados correctamente de acuerdo al proceso establecido en el método de observabilidad, puesto que este método confía en la obtención de una variable no monitorizada a través de las leyes de Kirchhoff,. Mientras que a los nodos a los cuales se les asigno un valor nulo en cada una de la fila de la matriz resultante no

pueden ser estimados a través de las leyes de Kirchhoff de manera exacta, debido a que se observa un comportamiento no lineal con respecto a la comparación de los resultados con los otros nodos. La valoración de los nodos con mayoría de posiciones nulas, serán etiquetados como nodos críticos y serán utilizados en la determinación de la configuración óptima.

En la Tabla 22 se muestra el resultado de la sumatoria de las filas para la Figura 27.

Tabla 22. Sumatoria de filas de la matriz resultante para la fase A.

Nodo	\sum Filas
800	20
802	20
806	20
808	20
812	19
814	19
816	19
818	19
820	19
822	19
824	19
828	26
830	19
854	19
852	12
888	9
890	1
858	19
864	10
834	12
842	19
844	19
846	19
848	19
860	19
836	19
840	19
862	12

En la Tabla 22 se puede identificar en la sumatoria de filas respectiva para cada nodo de la red eléctrica de la fase A. Después de haber efectuado la suma de las filas para cada nodo, se identifica el valor más grande de este grupo. Este valor corresponde a 26, por lo tanto es utilizado como el valor base. Posteriormente, todos los elementos de la columna de dividen en el valor base para obtener un valor en por unidad de cada nodo. Esto se muestra en la Tabla 23.

Tabla 23. Valores obtenidos para la comparación de configuraciones.

Nodo	Valor en	Valor
890	0,04	26
888	0,35	2,89
864	0,38	2,60
852	0,46	2,17
834	0,46	2,17
862	0,46	2,17
812	0,73	1,37
814	0,73	1,37
816	0,73	1,37
818	0,3	1,37
820	0,73	1,37
822	0,73	1,37
824	0,3	1,37
830	0,73	1,37
854	0,73	1,37
858	0,73	1,37
842	0,73	1,37
844	0,73	1,37
846	0,73	1,37
848	0,73	1,37
860	0,73	1,37
836	0,73	1,37
840	0,73	1,37
800	0,77	1,30
802	0,77	1,30
806	0,77	1,30
808	0,77	1,30
828	1	1

Los valores en por unidad, son mostrados en la segunda columna de la Tabla 23. Estos son ordenados en orden ascendente para identificar los nodos más críticos a tener en cuenta en el sistema de monitorización. Posteriormente, se invierten

estos valores para obtener los resultados mostrados en la tercera columna de la Tabla 23. Estos valores se asignaran a cada nodo que pertenezca a las alternativas de configuración de monitores. Esto se muestra en la Tabla 24.

Tabla 24. Tabla comparativa de configuraciones según la metodología propuesta.

1ra configuración		2da configuración		3ra configuración	
888	2,89	888	2,89	888	2,89
862	2,17	834	2,17	852	2,17
854	1,37	852	2,17	862	2,17
846	1,37	836	1,37	844	1,37
858	1,37	846	1,37	858	1,37
814	1,37	816	1,37	814	1,37
820	1,37	818	1,37	820	1,37
824	1,37	824	1,37	824	1,37
808	1,30	808	1,30	808	1,30
802	1,30	802	1,30	806	1,30
TOTAL	15,88		16,68		16,68

La Tabla 24 muestra cada uno de los valores asignados a cada uno de los nodos que están presentes en las diferentes configuraciones de monitores. Cada grupo de valores para cada alternativa se suman y se comparan teniendo en cuenta como criterio decisorio el mayor valor obtenido entre las tres. En consecuencia se obtienen dos configuraciones como óptimas, representadas por la segunda y tercera configuración.

Con la intención de comprobar el cumplimiento de la metodología de observabilidad, se escogerá aleatoriamente una de las configuraciones obtenidas para este desarrollo.

3.2.3 Desarrollo del método de observabilidad con la configuración óptima para el sistema de 34 barras. La configuración seleccionada para ser comprobada por el método de observabilidad es la segunda alternativa mostrada en la Tabla 19. En la Figura 30 se puede observar un diagrama de la topología del sistema junto con el esquema de monitorización encontrado.

Para la elaboración del vector AV, se tuvo en cuenta que existen ciertos sectores dentro de la topología en la cual se pasa de cargas trifásicas a monofásicas, por lo tanto, es necesario aplicar la restricción interpuesta en la Sección 0. Esta hace referencia a la observabilidad ante monitores ubicados en nodos monofásicos y líneas monofásicas que no pueden calcular tensiones o corrientes trifásicas en sistemas de distribución.

El vector de localización (AV) es mostrado en la Tabla 25, se puede identificar de forma sencilla el nodo y línea que representan cada sección, junto con el vector que se ubica en la última columna.

Para los vectores de conectividad, redundancia, co-conectividad, pre-observabilidad y observabilidad se muestran las variables de estado correspondientes para cada posición en la primera columna y el vector en la última columna.

El vector de conectividad es mostrado en la Tabla 26.

El vector de redundancia es mostrado en la Tabla 27

El vector de co-conectividad es mostrado en la Tabla 28

El vector de pre-observabilidad es mostrado en la Tabla 29

El vector de observabilidad es mostrado en la Tabla 30

Figura 30. Topología del sistema de 34 barras con el esquema de monitorización encontrado.

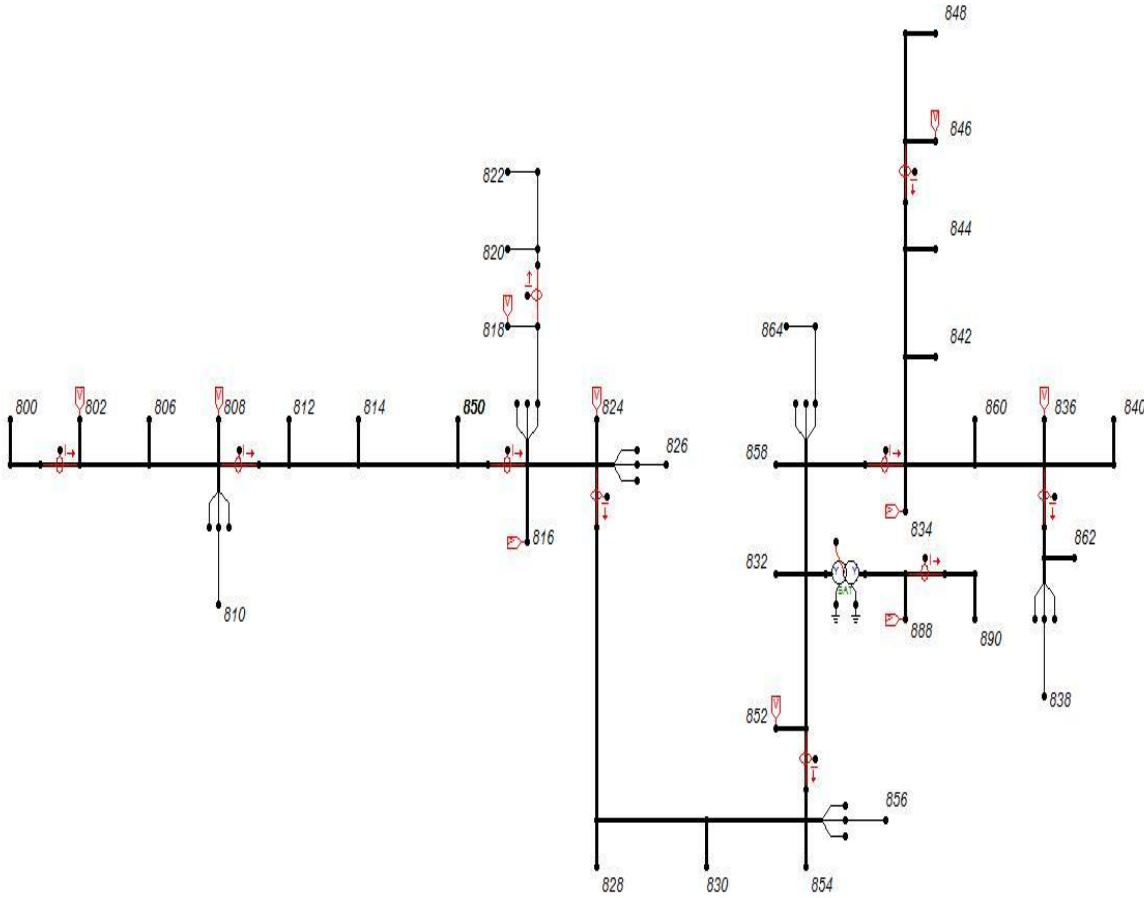


Tabla 25. Vector de localización AV para la configuración óptima.

Medidor			
Tensión	Corriente		Vector AV
800	800	802	0
802	802	800	1
802	802	806	0
806	806	802	0
806	806	808	0
808	808	806	0
808	808	810	0
810	810	808	0
808	808	812	1
812	812	808	0
812	812	814	0
814	814	812	0
814	814	850	0
850	850	814	0
850	850	816	0
816	816	850	1
816	816	818	0
816	816	824	0
818	818	816	0
818	818	820	1
820	820	818	0
820	820	822	0
822	822	820	0
824	824	816	0
824	824	826	0
824	824	828	1
826	826	824	0
828	828	824	0
828	828	830	0
830	830	828	0
830	830	854	0
854	854	830	0
854	854	856	0

Medidor			
Tensión	Corriente		Vector AV
854	854	852	0
856	856	854	0
852	852	854	1
852	852	832	0
832	832	852	0
832	832	888	0
832	832	858	0
888	888	832	0
888	888	890	1
890	890	888	0
858	858	832	0
858	858	864	0
858	858	834	0
864	864	858	0
834	834	858	1
834	834	842	0
834	834	860	0
842	842	834	0
842	842	844	0
844	844	842	0
844	844	846	0
846	846	844	1
846	846	848	0
848	848	846	0
860	860	834	0
860	860	836	0
836	836	860	0
836	836	840	0
836	836	862	1
840	840	836	0
862	862	836	0
862	862	838	0
838	838	862	0

Tabla 26. Vector de conectividad para la configuración óptima.

Variables de estado		CnV
Tensión	800	1
	802	1
	806	0
	808	1
	810	0
	812	1
	814	0
	850	1
	816	1
	818	1
	820	1
	822	0
	824	1
	826	0
	828	1
	830	0
	854	1
	856	0
	852	1
	832	0
	888	1
	890	1
	858	1
	864	0
	834	1
	842	0
	844	1
	846	1
	848	0
	860	0
836	1	
840	0	
862	1	

Variables de estado			CnV
Tensión	838		0
	800	802	1
Corriente	802	806	0
	806	808	0
	808	810	0
	808	812	1
	812	814	0
	814	850	0
	850	816	1
	816	818	0
	816	824	0
	818	820	1
	820	822	0
	824	826	0
	824	828	1
	828	830	0
	830	854	0
	854	856	0
	854	852	1
	852	832	0
	832	888	0
	832	858	0
	888	890	1
	858	864	0
	858	834	1
	834	842	0
	834	860	0
	842	844	0
	844	846	1
	846	848	0
860	836	0	
836	840	0	
836	862	1	
862	838	0	

Tabla 27. Vector de redundancia para la configuración óptima.

Variables de estado		RV
Tensión	800	0
	802	0
	806	0
	808	0
	810	0
	812	0
	814	0
	850	0
	816	0
	818	0
	820	0
	822	0
	824	0
	826	0
	828	0
	830	0
	854	0
	856	0
	852	0
	832	0
	888	0
	890	0
	858	0
	864	0
	834	0
	842	0
	844	0
	846	0
	848	0
	860	0
836	0	
840	0	
862	0	

Variables de estado			RV
Tensión	838		0
	800	802	1
Corriente	802	806	0
	806	808	0
	808	810	0
	808	812	1
	812	814	0
	814	850	0
	850	816	1
	816	818	1
	816	824	1
	818	820	1
	820	822	0
	824	826	0
	824	828	1
	828	830	0
	830	854	0
	854	856	0
	854	852	1
	852	832	0
	832	888	0
	832	858	0
	888	890	1
	858	864	0
	858	834	1
	834	842	0
	834	860	0
	842	844	0
	844	846	1
	846	848	0
860	836	0	
836	840	0	
836	862	1	
862	838	0	

Tabla 28. Vector de co-conectividad para la configuración óptima.

Variables de estado		CcV
Tensión	800	1
	802	0
	806	1
	808	0
	810	1
	812	0
	814	1
	850	0
	816	1
	818	1
	820	0
	822	1
	824	0
	826	1
	828	0
	830	1
	854	0
	856	1
	852	0
	832	1
	888	0
	890	1
	858	0
	864	1
	834	0
	842	1
	844	0
	846	0
	848	1
	860	1
836	0	
840	1	
862	0	

Variables de estado			CcV
Corriente	Tensión	838	1
	800	802	0
	802	806	0
	806	808	0
	808	810	0
	808	812	0
	812	814	0
	814	850	0
	850	816	0
	816	818	0
	816	824	0
	818	820	0
	820	822	0
	824	826	0
	824	828	0
	828	830	0
	830	854	0
	854	856	0
	854	852	0
	852	832	0
	832	888	0
	832	858	0
	888	890	0
	858	864	0
	858	834	0
	834	842	0
	834	860	0
	842	844	0
	844	846	0
	846	848	0
860	836	0	
836	840	0	
836	862	0	
862	838	0	

Tabla 29. Vector de Pre-observabilidad para la configuración óptima.

Variables de estado		POV
Tensión	800	2
	802	1
	806	1
	808	1
	810	1
	812	1
	814	1
	850	1
	816	2
	818	2
	820	1
	822	1
	824	1
	826	1
	828	1
	830	1
	854	1
	856	1
	852	1
	832	1
	888	1
	890	2
	858	1
	864	1
	834	1
	842	1
	844	1
	846	1
	848	1
	860	1
836	1	
840	1	
862	1	

Variables de estado			POV
Corriente	Tensión	838	1
	800	802	2
	802	806	0
	806	808	0
	808	810	0
	808	812	2
	812	814	0
	814	850	0
	850	816	2
	816	818	1
	816	824	1
	818	820	2
	820	822	0
	824	826	0
	824	828	2
	828	830	0
	830	854	0
	854	856	0
	854	852	2
	852	832	0
	832	888	0
	832	858	0
	888	890	2
	858	864	0
	858	834	2
	834	842	0
	834	860	0
	842	844	0
	844	846	2
	846	848	0
860	836	0	
836	840	0	
836	862	2	
862	838	0	

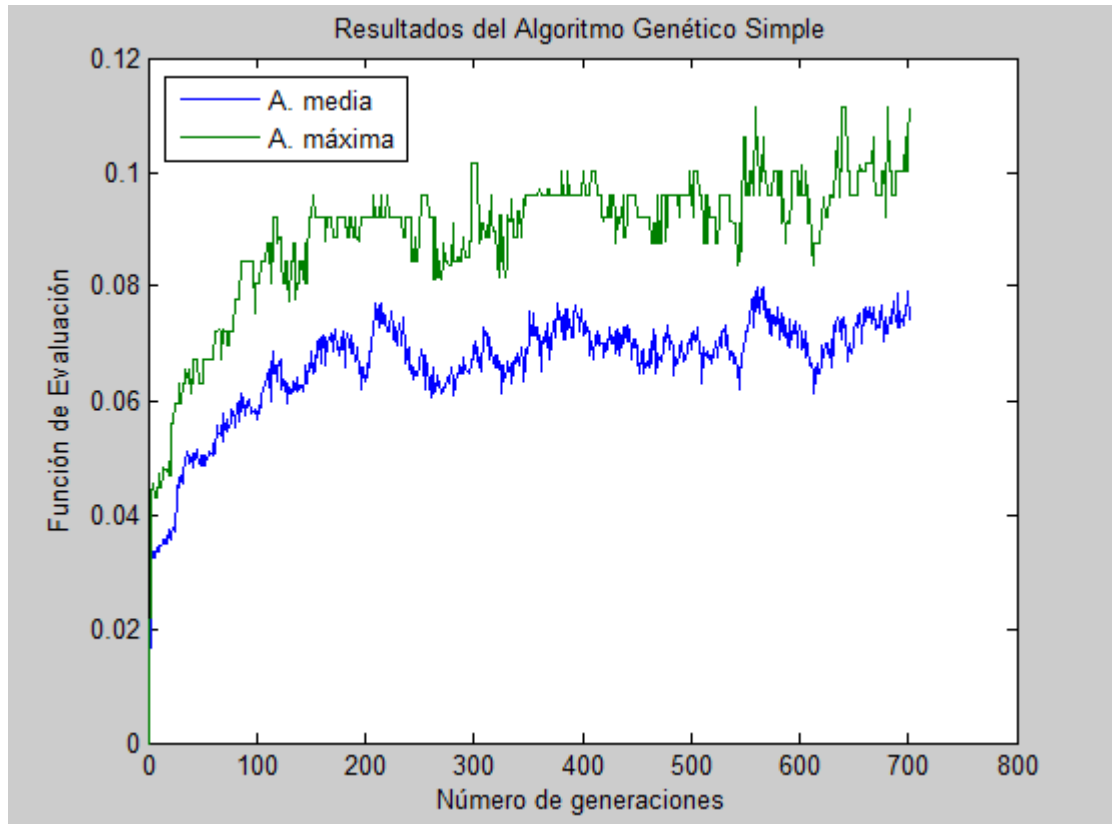
Tabla 30. Vector de Observabilidad para la configuración óptima.

Variables de estado		OV
Tensión	800	2
	802	1
	806	1
	808	1
	810	1
	812	1
	814	1
	850	1
	816	2
	818	2
	820	1
	822	1
	824	1
	826	1
	828	1
	830	1
	854	1
	856	1
	852	1
	832	1
	888	1
	890	2
	858	1
	864	1
	834	1
	842	1
	844	1
	846	1
	848	1
	860	1
836	1	
840	1	
862	1	

Variables de estado			OV
Tensión	838		1
	800	802	2
Corriente	802	806	1
	806	808	1
	808	810	1
	808	812	2
	812	814	1
	814	850	1
	850	816	2
	816	818	1
	816	824	1
	818	820	2
	820	822	1
	824	826	1
	824	828	2
	828	830	1
	830	854	1
	854	856	1
	854	852	2
	852	832	1
	832	888	1
	832	858	1
	888	890	2
	858	864	2
	858	834	2
	834	842	1
	834	860	1
	842	844	1
	844	846	2
	846	848	1
860	836	1	
836	840	1	
836	862	2	
862	838	1	

De acuerdo a la Tabla 30 se puede evidenciar que la configuración proporcionada en la Tabla 19, cumple con la restricción de observabilidad para el sistema de estudio, al no encontrarse ningún elemento con valor 0.

Figura 31. Resultados del Algoritmo Genético Simple.



De acuerdo a la Figura 31, se evidencia una gran variabilidad entre las variables de adaptación media y máxima, debido principalmente al operador de mutación, cuando el algoritmo tiende a alcanzar el número máximo de generaciones la adaptación máxima de la misma tiende a aumentar produciendo la configuración de monitores deseada.

3.3 ANÁLISIS GENERAL DE LOS RESULTADOS DE LOS CASOS DE ESTUDIO

Tras la aplicación de la metodología correspondiente, se concluyen algunos resultados importantes para los casos de estudio:

- Para el sistema de 14 barras del IEEE, se obtuvo una disminución en el número de monitores a ubicar con respecto a los resultados obtenidos en [6]. Esto se debe principalmente a la modificación de los parámetros de entrada en el algoritmo genético. Se identificó que a medida que se aumentaba el número de generaciones en el algoritmo genético, se obtenían resultados de configuraciones con menor número de monitores. Además, se pudo evidenciar en las múltiples ejecuciones de la metodología, que el algoritmo convergía hacia un número de monitores y ciertas posiciones específicas en la topología del sistema de 14 barras
- Las configuraciones obtenidas para el sistema de 34 nodos del IEEE, cumplieron exitosamente la restricción referente a los diferentes sectores monofásicos que presenta la topología de dicho sistema, esto comprueba que la metodología se adapta hacia las diferentes topologías que se pueden presentar en las redes eléctricas.
- Mediante un análisis estadístico se pudo comprobar cuales nodos del sistema de 34 barras del IEEE tienen mayor importancia al momento de la localización de monitores para la estimación de estado armónico. En la cual se establece un parámetro de comparación entre las configuraciones obtenidas del algoritmo genético con el mismo costo.

En general, la metodología presentada permite la identificación de la localización de los monitores a instalar dentro del sistema de distribución, con miras al desarrollo de la estimación de estado armónico. En la cual, la localización aporta

uno de los primeros análisis a realizarse dentro de lo que es la implementación del sistema de monitorización del estado del espectro de las señales de tensión y corriente dentro del sistema, para vigilancia y mitigación de los problemas relacionados con armónicos.

4. CONCLUSIONES

Se ha desarrollado un método para la localización óptima de monitores de calidad de potencia orientado hacia la estimación de estado armónico en sistemas de distribución de energía eléctrica, basándose principalmente en la optimización del costo de ubicar un medidor en cada posición del sistema. Las conclusiones más relevantes del trabajo de grado son las siguientes:

- El método desarrollado puede ser utilizado tanto por los operadores de red de los sistemas eléctricos, ya sea de distribución o afines, como también por usuarios interesados en la monitorización y registro de la calidad de la energía eléctrica, en la cual es necesario encontrar el menor número de monitores posibles para estimar el estado armónico de la red de forma satisfactoria.
- La metodología presentada en este trabajo es de fácil entendimiento e interpretación para quien desee implementarla, ya que solamente es necesario tener claro la topología del sistema, permitiendo una sencilla adecuación de la metodología a diferentes redes eléctricas.
- Para la selección de la metodología adoptada se prefirió trabajar con un método que fuera explícito, donde se basara en la topología del sistema y se asociara con una variable conocida como el costo de la localización de los monitores en puntos específicos de la red.
- El algoritmo genético simple empleado como herramienta de optimización en el desarrollo del presente trabajo, resolvió de forma adecuada los diferentes casos de estudios propuestos; en especial se puede resaltar la reducción el número de monitores con respecto al resultado dado en [6].
- Para ambos casos de estudio, los resultados de la metodología localizaban los monitores dentro de ciertos sectores específicos, que variaban la ubicación de

estos entre barras adyacentes, manteniéndose constante el número de medidores y el costo de estas configuraciones.

- De acuerdo a los resultados obtenidos para el caso de estudio del sistema de 34 barras del IEEE, se obtuvieron dos configuraciones óptimas de acuerdo a los resultados de la metodología, este resultado invita a la utilización del desarrollo de la estimación de estado armónico con el fin de comparar resultados y observar cuál de las dos muestran un mejor desempeño en cuanto a este cálculo.
- El desarrollo de este trabajo de grado representa una herramienta importante hacia el desarrollo como ingenieros de los dos autores, puesto que el manejo de software como ATP-EMTP y MATLAB son programas frecuentemente utilizados hacia el análisis y caracterización de las redes eléctricas, además, la temática abordada en este trabajo de grado es una temática novedosa y de pronta aplicación dentro de los operadores de la red eléctrica.

5. TRABAJOS FUTUROS

- **ESTIMACIÓN DE ESTADO ARMÓNICO CON LAS CONFIGURACIONES DE MONITORES OBTENIDAS:** La implementación de la estimación de estado armónico con las configuraciones de monitores permite la evaluación de los resultados de esta herramienta a partir de la comparación de factores como el error en la estimación, permitiendo una valoración completa a través de la determinación de la configuración óptima y la estimación del estado armónico de la red en condiciones actuales.
- **COMPARACIÓN DE CONFIGURACIONES ÓPTIMAS DE MONITORES DE CALIDAD DE POTENCIA OBTENIDAS PARA ESTIMACIÓN DE ESTADO ARMÓNICO Y OTRAS PERTURBACIONES:** La determinación de la localización de monitores para eventos que afectan la calidad de la potencia eléctrica como hundimientos y elevaciones de tensión es preciso compararla con la obtenida para estimación de estado armónico, con el fin unificar la información aportada por ambas y ofrecer un sistema de monitorización que ofrezca información referente a ambas características de forma acertada y sin ninguna interferencia.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] TEJADA, A. y LLAMAS, A. Efectos de las armónicas en los sistemas eléctricos, [En línea]. <http://www.mty.itesm.mx/etie/deptos/ie/profesores/allamas/cursos/ueee/armonicas/07Efectarm.PDF>. [Último acceso: 5 Abril 2015].
- [2] FERREYRA, D. M. Implementación de Técnicas de Estado Armónico en Sistemas Eléctricos de Distribución, Córdoba República Argentina, 2014.
- [3] RUIZ VALLEJO, J. M. y ORTIZ QUINTERO, F. H. Estimación de Estado Armónico, de *Metodologías para identificar fuentes armónicas en sistemas eléctricos*, Pereira, 2007, pp. 136-140.
- [4] ARRILLAGA, J.; BOLLEN, M. H. J. y NEVILLE, W. Power Quality Following Deregulation, *IEEE Preceedings*, vol. 88, nº 2, pp. 240-260, 2000.
- [5] ZHANG, Y. y XU, Y. Resarch on Power Harmonic State Estimation, *IEEE*, 2011. pp. 596-600.
- [6] ALMEIDA, C. F. M.; y KAGAN, N. «Harmonic State Estimation Through Optimal Monitoring Systems,» *IEEE Transactions*, vol. 4, nº 1, 2013. pp. 467-478.
- [7] AMMER, C. y HERWIG, R. «Determination of the optimum measuring positions for power quality monitoring,» de *International Conference on Harmonics and Quality of Power*, 2004

[8] PALACIOS CARABALÍ, A. CHOCONTÁ VALDÉS, J. J. Algoritmo del Filtro de Kalman de *Metodología para la identificación de la fuente armónica dominante en las subestaciones de EMCALI*, Santiago de Cali, 2013, pp. 70-85.

[9] MUSCAS, C. PILO, F. PISANO G. y SULIS, S. Optimal Measurement Devices Allocation for Harmonic State Estimation Considering Parameters Uncertainty in Distribution Networks, de *Electrical Power Quality and Utilisation*, Barcelona, 2007

[10] KUMAR, A. DAS, B. y SHARMA, J. Simple technique for placement of meters for estimation of harmonics in electric power system. *IEEE Proceedings*, vol. 152, nº 1, 2005. pp. 67-78.

[11] SHAFIEE RAD, M. y KARIMI, H. An Optimal Measurement Placement Method for Power System Harmonic State Estimation, de *International Conference and Exposition on Electrical and Power Engineering*, Iasi, 2012

[12] AMIN ELDERY, M. EL-SAADANY, E. SALAMA, M. y VANNELLI, A. A Novel Power Quality Monitoring Allocation Algorithm, *IEEE Transactions on Power Delivery*, vol. 21, nº 2, 2006. pp. 768-777.

[13] ARAUJO, L. y CERVIGÓN, C. Algoritmos Evolutivos. Un enfoque práctico, México D.F: Alfaomega, 2009

[14] Universidad del País Vasco, Algoritmos Genéticos, 2014. [En línea]. Available: <http://www.sc.ehu.es/ccwbayes/docencia/mmcc/docs/temageneticos.pdf>. [Último acceso: 30 Marzo 2015].

[15] ABUR, A. y GÓMEZ EXPÓSITO, A. Power System State Estimation Theory and Implementation, New York: Marcel Dekker, Inc., 2004

BIBLIOGRAFÍA

ABUR, A. y GÓMEZ EXPÓSITO, A. Power System State Estimation Theory and Implementation, New York: Marcel Dekker, Inc., 2004

ALMEIDA, C. F. M.; y KAGAN, N. «Harmonic State Estimation Through Optimal Monitoring Systems,» *IEEE Transactions*, vol. 4, nº 1, 2013. pp. 467-478.

AMIN ELDERY, M. EL-SAADANY, E. SALAMA, M. y VANNELLI, A. A Novel Power Quality Monitoring Allocation Algorithm, *IEEE Transactions on Power Delivery*, vol. 21, nº 2, 2006. pp. 768-777.

AMMER, C. y HERWIG, R. «Determination of the optimum measuring positions for power quality monitoring,» de *International Conference on Harmonics and Quality of Power*, 2004

ARAUJO, L. y CERVIGÓN, C. Algoritmos Evolutivos. Un enfoque práctico, México D.F: Alfaomega, 2009

ARRILLAGA, J.; BOLLEN, M. H. J. y NEVILLE, W. Power Quality Following Deregulation, *IEEE Preceedings*, vol. 88, nº 2, pp. 240-260, 2000.

FERREYRA, D. M. Implementación de Técnicas de Estado Armónico en Sistemas Eléctricos de Distribución, Córdoba República Argentina, 2014.

KUMAR, A. DAS, B. y SHARMA, J. Simple technique for placement of meters for estimation of harmonics in electric power system. *IEEE Proceedings*, vol. 152, nº 1, 2005. pp. 67-78.

MUSCAS, C. PILO, F. PISANO G. y SULIS, S. Optimal Measurement Devices Allocation for Harmonic State Estimation Considering Parameters Uncertainty in Distribution Networks, de *Electrical Power Quality and Utilisation*, Barcelona, 2007

PALACIOS CARABALÍ, A. CHOCONTÁ VALDÉS, J. J. Algoritmo del Filtro de Kalman de *Metodología para la identificación de la fuente armónica dominante en las subestaciones de EMCALI*, Santiago de Cali, 2013, pp. 70-85.

RUIZ VALLEJO, J. M. y ORTIZ QUINTERO, F. H. Estimación de Estado Armónico, de *Metodologías para identificar fuentes armónicas en sistemas eléctricos*, Pereira, 2007, pp. 136-140.

SHAFIEE RAD, M. y KARIMI, H. An Optimal Measurement Placement Method for Power System Harmonic State Estimation, de *International Conference and Exposition on Electrical and Power Engineering*, Iasi, 2012

TEJADA, A. y LLAMAS, A. Efectos de las armónicas en los sistemas eléctricos, [En línea].
<http://www.mty.itesm.mx/etie/deptos/ie/profesores/allamas/cursos/ueee/armonicas/07Efectarm.PDF>. [Último acceso: 5 Abril 2015].

Universidad del País Vasco, Algoritmos Genéticos, 2014. [En línea]. Available: <http://www.sc.ehu.es/ccwbayes/docencia/mmcc/docs/temageneticos.pdf>. [Último acceso: 30 Marzo 2015].

ZHANG, Y. y XU, Y. Resarch on Power Harmonic State Estimation, *IEEE*, 2011. pp. 596-600,

ANEXOS

ANEXO A. Matrices implementadas para el método de observabilidad

Estas matrices no fueron incluidas puesto que tienen dimensiones muy grandes y van a ser mostradas en formato digital. En este formato se presentará las matrices para el análisis de observabilidad de ambos casos de estudio, específicamente, las matrices CnM, RFM y RTM.

ANEXO B. Análisis de costos

Los costos relacionados para el proyecto en el análisis del sistema de 34 barras fueron los siguientes:

Los precios unitarios asociados a cada barra son:

- Para el nivel de 4.16 [kV] en los nodos 888 y 890

Tabla 0.1 **Valores unitarios para nivel de tensión de 4.16 [kV].**

CARACTERÍSTICA	Precio Unitario
Transformador de corriente MT 17 kV	\$ 917.750,00
Transformador de potencial 17,5 kV	\$ 2.327.338,00
PQMII Power Quality Meter en pesos	\$ 3.209.092,61
Computador	\$ 1.000.000,00
TOTAL UNITARIO	\$ 7.454.180,61

- Para el nivel 24.9 [kV] en los nodos restantes

Tabla 0.2 **Valores unitarios para nivel de tensión de 24.9 [kV].**

CARACTERÍSTICA	Precio Unitario
Transformador de corriente SHFE CHFE 35 kV	\$ 2.844.799,00
Transformador de potencial 35 kV	\$ 4.450.688,00
PQMII Power Quality Meter en pesos	\$ 3.209.092,61
Computador	\$ 1.000.000,00
TOTAL UNITARIO	\$ 11.504.579,61

Teniendo en cuenta que se tiene que establecer un costo por localización de monitor en la topología del sistema, las tablas de costos presentadas anteriormente de acuerdo a los siguientes criterios:

- Para los sectores trifásicos el valor de los transformadores de corriente y potencial se aumenta en 3 debido al aumento en la cantidad de los mismos.
- El computador recoge los datos provenientes de cada uno de los monitores de acuerdo a cada nivel de tensión, por lo tanto, para cada posición no se tiene en cuenta este valor.

Los costos tenidos en cuenta en la metodología para cada tipo de sector son los siguientes:

- Para los nodos trifásicos de tensión 24.9 [kV]

Tabla 0.3 Precio estimado para los nodos de tensión trifásicos de 24.9 [kV].

CARACTERÍSTICA	Precio Unitario
Transformador de corriente SHFE CHFE 35 kV	\$ 8.534.397,00
Transformador de potencial 35 kV	\$ 13.352.064,00
PQMII Power Quality Meter en pesos	\$ 3.209.092,61
TOTAL	\$ 25.095.553,61

- Para los nodos monofásicos de tensión 24.9 [kV]

Tabla 0.4 Precio estimado para los nodos de tensión monofásicos de 24.9 [kV].

CARACTERÍSTICA	Precio Unitario
Transformador de corriente SHFE CHFE 35 kV	\$ 2.844.799,00
Transformador de potencial 35 kV	\$ 4.450.688,00
PQMII Power Quality Meter en pesos	\$ 3.209.092,61
TOTAL	\$ 10.504.579,61

- Para los nodos trifásicos de tensión 4.16 [kV]

Tabla 0.5 **Precio estimado para los nodos de tensión trifásicos de 4.16 [kV].**

CARACTERÍSTICA	Precio Unitario
Transformador de corriente MT 17 kV	\$ 2.753.250,00
Transformador de potencial 17,5 kV	\$ 6.982.014,00
PQMII Power Quality Meter en pesos	\$ 3.209.092,61
TOTAL	\$ 12.944.356,61

Con el fin de normalizar los valores de costo de cada uno de los sectores, se plantea una análisis en por unidad de los mismos. El valor base para este análisis es el total indicado para el nodo trifásico de tensión 24.9 [kV]. Posteriormente, este valor base se divide entre cada uno de los otros valores totales. Los valores en p.u resultantes luego del análisis es el siguiente.

Tabla 0.6 **Precios en p.u para ingresar a código.**

VALORES EN P.U. PARA INSERTAR A CÓDIGO	
Nodo trifásico de 4.16 [kV]	0,515802792
Nodo monofásico de 24.5 [kV]	0,418583299
Nodo trifásico de 24.5 [kV]	1

ANEXO C. Códigos implementados en MATLAB

Los códigos que se implementaron en el software MATLAB contienen el procedimiento del método de observabilidad y el proceso de optimización. Se realizaron dos códigos correspondientes a cada uno de los casos de estudio representados en los sistemas de 14 y 34 barras de la IEEE.

Ambos códigos comparten las siguientes características iniciales:

- El método de observabilidad está expresado a través de una función en MATLAB, la cual recibe como entradas las matrices expresadas en este método (CnM, RFM y RTM), así como la población que contiene cada uno de las alternativas de configuración de monitores representada por AV. La salida de esta función consiste en un vector en la que cada una de sus posiciones representa el número de ceros encontrados en el OV para cada una de las alternativas de la población.
- La función costo que realiza la operación expresada en (32), teniendo como entrada también la población y el vector costo definido en (30).

Una vez se han obtenido estos parámetros comienzan las iteraciones del algoritmo genético a través de un ciclo *while* que finaliza una vez se han alcanzado el número total de generaciones. Finalmente, a través de la función *find* se encuentra en cuales filas de la población resultante contienen el menor número de medidores, las posiciones en la que se encuentran los unos en estas filas, el número de ceros que contiene cada OV respectivo de las filas, la suma de los unos de las filas escogidas representando el menor número de medidores que se encuentra en la población final. Por último, se realiza la gráfica de las adaptaciones medias y máximas, es decir, el cálculo de la función expresada en (34), encontradas en cada generación de la población.

A continuación se mostrarán los códigos implementados para cada uno de los casos de estudio.

C.1 CÓDIGO DEL CASO DE ESTUDIO DE 14 BARRAS

A continuación se muestra la función de observabilidad implementada en MATLAB para este caso de estudio, esta recibe como nombre *observabilidad*. Luego, se muestra el algoritmo genético implementado, una vez se haya mostrado la función costo correspondiente, esta misma es empleada para ambos casos de estudio.

C.1.1 MÉTODO DE OBSERVABILIDAD PARA EL CASO DE ESTUDIO DE 14 BARRAS

```
function [ num_0 ] = observabilidad( AV, CnM, RTM, RFM )

%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
%%%%%%%%%% Vector de conectividad por fila
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
CnV=CnM*AV';

%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
%%%%%%%%%% Vector de co-conectividad por fila
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%

CcV=zeros(size(CnV));

for x=1:100
if CnV(2,x) && CnV(5,x) >= 1
CcV(1,x)=CnV(2,x)*CnV(5,x);
end

if CnV(1,x) && CnV(3,x) && CnV(4,x) && CnV(5,x) >= 1
CcV(2,x)=CnV(1,x)*CnV(3,x)*CnV(4,x)*CnV(5,x);
end

if CnV(2,x) && CnV(4,x) >= 1
CcV(3,x)=CnV(2,x)*CnV(4,x);
end

if CnV(2,x) && CnV(3,x) && CnV(5,x) && CnV(7,x) >= 1
CcV(4,x)=CnV(2,x)*CnV(3,x)*CnV(5,x)*CnV(7,x);
end
```

```

if CnV(1,x) && CnV(2,x) && CnV(4,x) && CnV(6,x) >= 1
CcV(5,x)=CnV(1,x)*CnV(2,x)*CnV(4,x)*CnV(6,x);
end

if CnV(5,x) && CnV(11,x) && CnV(12,x) && CnV(13,x) >= 1
CcV(6,x)=CnV(5,x)*CnV(11,x)*CnV(12,x)*CnV(13,x);
end

if CnV(4,x) && CnV(8,x) && CnV(9,x) >= 1
CcV(7,x)=CnV(4,x)*CnV(8,x)*CnV(9,x);
end

if CnV(7,x)>= 1
CcV(8,x)=CnV(7,x);
end

if CnV(7,x) && CnV(10,x) && CnV(14,x) >= 1
CcV(9,x)=CnV(7,x)*CnV(10,x)*CnV(14,x);
end

if CnV(9,x) && CnV(11,x) >= 1
CcV(10,x)=CnV(9,x)*CnV(11,x);
end

if CnV(6,x) && CnV(10,x) >= 1
CcV(11,x)=CnV(6,x)*CnV(10,x);
end

if CnV(6,x) && CnV(13,x) >= 1
CcV(12,x)=CnV(6,x)*CnV(13,x);
end

if CnV(6,x) && CnV(12,x) && CnV(14,x) >= 1
CcV(13,x)=CnV(6,x)*CnV(12,x)*CnV(14,x);
end

if CnV(9,x) && CnV(13,x) >= 1
CcV(14,x)=CnV(9,x)*CnV(13,x);
end

end

RTV=RTM*AV';
RFV=RFM*AV';

RV=zeros(size(RTV));

for x=1:100
    for y=1:34

```

```

        RV(y,x)=RTV(y,x).*RFV(y,x);

    end
end

%%%%% Obtención del vector de pre-observabilidad
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
POV=zeros(size(RTV));
for x=1:100
    for y=1:34
        POV(y,x)=CnV(y,x)+CcV(y,x)+RV(y,x);

    end
end

%%%%% Vector de observabilidad
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%

OV=zeros(size(POV));
for x=1:100
    if POV(15,x)>=1
        OV(15,x)=POV(15,x);
    elseif POV(1,x) && POV(2,x) >=1
        OV(15,x)=POV(1,x)*POV(2,x);
    end

    if POV(16,x)>=1
        OV(16,x)=POV(16,x);
    elseif POV(1,x) && POV(5,x) >=1
        OV(16,x)=POV(1,x)*POV(5,x);
    end

    if POV(17,x)>=1
        OV(17,x)=POV(17,x);
    elseif POV(2,x) && POV(3,x) >=1
        OV(17,x)=POV(2,x)*POV(3,x);
    end

    if POV(18,x)>=1
        OV(18,x)=POV(18,x);
    elseif POV(4,x) && POV(2,x) >=1
        OV(18,x)=POV(4,x)*POV(2,x);
    end

    if POV(19,x)>=1
        OV(19,x)=POV(19,x);
    elseif POV(5,x) && POV(2,x) >=1
        OV(19,x)=POV(5,x)*POV(2,x);
    end

    if POV(20,x)>=1

```

```

        OV(20,x)=POV(20,x);
elseif POV(3,x) && POV(4,x) >=1
    OV(20,x)=POV(3,x)*POV(4,x);
end

if POV(21,x)>=1
    OV(21,x)=POV(21,x);
elseif POV(4,x) && POV(5,x) >=1
    OV(21,x)=POV(4,x)*POV(5,x);
end

if POV(22,x)>=1
    OV(22,x)=POV(22,x);
elseif POV(4,x) && POV(7,x) >=1
    OV(22,x)=POV(1,x)*POV(2,x);
end

if POV(23,x)>=1
    OV(23,x)=POV(23,x);
elseif POV(4,x) && POV(9,x) >=1
    OV(23,x)=POV(4,x)*POV(9,x);
end

if POV(24,x)>=1
    OV(24,x)=POV(24,x);
elseif POV(5,x) && POV(6,x) >=1
    OV(24,x)=POV(5,x)*POV(6,x);
end

if POV(25,x)>=1
    OV(25,x)=POV(25,x);
elseif POV(11,x) && POV(6,x) >=1
    OV(25,x)=POV(11,x)*POV(6,x);
end

if POV(26,x)>=1
    OV(26,x)=POV(26,x);
elseif POV(12,x) && POV(6,x) >=1
    OV(26,x)=POV(6,x)*POV(12,x);
end

if POV(27,x)>=1
    OV(27,x)=POV(27,x);
elseif POV(6,x) && POV(13,x) >=1
    OV(27,x)=POV(6,x)*POV(13,x);
end

if POV(28,x)>=1
    OV(28,x)=POV(28,x);
elseif POV(7,x) && POV(8,x) >=1
    OV(28,x)=POV(7,x)*POV(8,x);
end

```

```

if POV(29,x)>=1
    OV(29,x)=POV(29,x);
elseif POV(7,x) && POV(9,x) >=1
    OV(29,x)=POV(7,x)*POV(9,x);
end

if POV(30,x)>=1
    OV(30,x)=POV(30,x);
elseif POV(9,x) && POV(10,x) >=1
    OV(30,x)=POV(9,x)*POV(10,x);
end

if POV(31,x)>=1
    OV(31,x)=POV(31,x);
elseif POV(9,x) && POV(14,x) >=1
    OV(31,x)=POV(9,x)*POV(14,x);
end

if POV(32,x)>=1
    OV(32,x)=POV(32,x);
elseif POV(10,x) && POV(11,x) >=1
    OV(32,x)=POV(10,x)*POV(11,x);
end

if POV(33,x)>=1
    OV(33,x)=POV(33,x);
elseif POV(12,x) && POV(13,x) >=1
    OV(33,x)=POV(12,x)*POV(13,x);
end

if POV(34,x)>=1
    OV(34,x)=POV(34,x);
elseif POV(14,x) && POV(13,x) >=1
    OV(34,x)=POV(14,x)*POV(13,x);
end

end

OV(1:14,:)=POV(1:14,:);

cuenta_0=zeros(34,100);

for x=1:34
    for y=1:100
        if OV(x,y)==0
            cuenta_0(x,y)=1;
        end
    end
end

end

```

```

num_0=zeros(1,100);
for x=1:100
    num_0(x)=sum(cuenta_0(:,x));

end

end

```

C.1.2 FUNCIÓN COSTO PARA EL CASO DE ESTUDIO DE 14 BARRAS Y 34 BARRAS

```

function [ Adap ] = costo( AV,CV )

Adap=AV*CV';

end

```

C.1.3 ALGORITMO GENÉTICO PARA EL CASO DE ESTUDIO DE 14 BARRAS

```

clc;

%%% Parámetros supuestos en el desarrollo del algoritmo genético %%%
t_cruces=0.75; t_mut=0.01; N_gen=200;

%%% Creación del vector aleatorio de ubicación de medidores %%%
AV=randi([0 1],100,37); k=250;

%%% Costo supuesto de la implementación %%%
CV=zeros(1,37);
CV(1:17)=1; CV(18)=0.7; CV(19:37)=0.8;

%%% Evaluación de la Primera generación %%%
num_0=observabilidad(AV,CnM,RTM,RFM);

TC=costo(AV,CV);

TC_1=zeros(100,1);
for x=1:100
    TC_1(x)=1/(TC(x)+k*num_0(x));
end

```

```

end

%%% Comienzo de las iteraciones de GA y observabilidad %%%%%%%%%%%
iter=1;

A_m=zeros(1,N_gen); A_max=zeros(1,N_gen);

while iter<=N_gen

%%%%%%%%%% Proceso de selección por ruleta
%%%%%%%%%%

lon_TC=numel(TC_1);
sum_TC=sum(TC_1);
prob=zeros(1,lon_TC);
pun=zeros(1,lon_TC);

for x=1:100
    prob(x)=TC_1(x)/sum_TC;
    pun(x)=sum(prob);
end

q=[0,pun];

escg=rand(100,1);

AV_1=zeros(100,37); conteo_1=zeros(1,100);
for x=1:100
    for y=1:100
        if escg(x) > q(y) && escg(x) < q(y+1)
            AV_1(x,:)=AV(y,:);
        end
    end
end

end

%%%%%%%%%% CRUCE %%%%%%%%%%%
%%%%%%%%%% Proceso de reproducción %%%%%%%%%%%

rep=rand(100,1);
num_pad=zeros(1,100);

for x=1:100
    if rep(x) > t_cruces
        num_pad(x)=1;
    end
end

```

```

end

%%%% Proceso de selección de padres
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%

p_padres=find(num_pad==1);
t_padres=size(p_padres,2);

if rem(t_padres,2)==0
    p_padres;
else
    p_padres=p_padres(1:t_padres-1);
end

rt_padres=length(p_padres);

pa_padres=randperm(rt_padres);

num_par=rt_padres/2;

pa1_padres=pa_padres(1:rt_padres/2);
pa2_padres=pa_padres((rt_padres/2)+1:rt_padres);

m_padres=[pa1_padres;pa2_padres]';

p_cruce=randi(37,num_par,1);

M=zeros(num_par,37);
N=zeros(num_par,37);

for x=1:num_par
    M(x,p_cruce(x):37)=AV_1(m_padres(x,1),p_cruce(x):37);
    N(x,p_cruce(x):37)=AV_1(m_padres(x,2),p_cruce(x):37);
end

for x=1:num_par
    AV_1(m_padres(x,1),p_cruce(x):37)=N(x,p_cruce(x):37);
    AV_1(m_padres(x,2),p_cruce(x):37)=M(x,p_cruce(x):37);
end

%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
%

%%%%%% MUTACIÓN
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
%%%%%%%%%% Operador de mutación %%%%%%%%%%%
mut=rand(100,37);
num_mut=zeros(100,37);
for x=1:100
    for y=1:37

```

```

        if mut(x,y) < t_mut
            num_mut(x,y)=1;
        end
    end
end

for x=1:100
    for y=1:37
        if num_mut(x,y)==1
            AV_1(x,y)=not(AV_1(x,y));
        end
    end
end

%%%% Nuevo fenotipo tras selección %%%%%%%%%%%

num_1=observabilidad(AV_1,CnM,RTM,RFM);

TC_2=costo(AV_1,CV);

TC_3=zeros(100,1);
for x=1:100
    TC_3(x)=1/(TC_2(x)+k*num_1(x));
end

AV=AV_1;
TC_1=TC_3;

iter=iter+1;

A_m(iter)=prom(TC_3);
A_max(iter)=max(TC_3);

end

n=1:201;

% Gráfica de adaptación media y adaptación máxima en cada generación
%%%%%%%%%
plot(n,A_m,'r',n,A_max);
title('Adaptación media y Adaptación máxima');
xlabel('Número de generaciones');
ylabel('Costo del sistema de monitorización');

%Número de medidores en la población resultante
%%%%%%%%%

```

```

suma_AV=zeros(1,100);

for x=1:100
    suma_AV(x)=sum(AV_1(x,:));
end
%%%%%%%%% Mínimo de la suma de medidores de la última generación
%%%%%%%%%
NMO=min(suma_AV);
disp(NMO)
%%%%%%%%% Posiciones en la cual están estos medidores
%%%%%%%%%
P_NMO=find(suma_AV==NMO);

%%%%%%%%% Observabilidad, costo y matriz de vector ubicación de dichas
%%%%%%%%% configuraciones %%%%%%%%%%
OP_NMO=num_1(P_NMO);
disp(OP_NMO);
AV_min=AV_1(P_NMO,:);
CM=TC_2(P_NMO);

```

C.2 CÓDIGO DEL CASO DE ESTUDIO DE 34 BARRAS

De la misma forma que para el código de 14 barras, se presentará el método de observabilidad, a través de la función *observabilidad_proyecto*, y el algoritmo genético implementado.

C.2.1 MÉTODO DE OBSERVABILIDAD PARA EL CASO DE ESTUDIO DE 34 BARRAS

```

function [ num_0 ] = observabilidad_proyecto( AV, CnM, RTM, RFM )

%%%%%%%%% Vector de conectividad por fila
%%%%%%%%%
CnV=CnM*AV';

%%%%%%%%% Vector de co-conectividad por fila
%%%%%%%%%

CcV=zeros(size(CnV));

for x=1:100
    if CnV(2,x) >= 1
        CcV(1,x)=CnV(2,x);
    end

    if CnV(1,x) && CnV(3,x) >= 1
        CcV(2,x)=CnV(1,x)*CnV(3,x);
    end
end

```

```

end

if CnV(2,x) && CnV(4,x) >= 1
CcV(3,x)=CnV(2,x)*CnV(4,x);
end

if CnV(3,x) && CnV(5,x) && CnV(4,x) >= 1
CcV(4,x)=CnV(3,x)*CnV(5,x)*CnV(4,x);
end

if CnV(4,x) >= 1
CcV(5,x)=CnV(4,x);
end

if CnV(4,x) && CnV(7,x) >= 1
CcV(6,x)=CnV(4,x)*CnV(7,x);
end

if CnV(8,x) && CnV(6,x) >= 1
CcV(7,x)=CnV(8,x)*CnV(6,x);
end

if CnV(7,x) && CnV(9,x) >= 1
CcV(8,x)=CnV(7,x)*CnV(9,x);
end

if CnV(8,x) && CnV(10,x) && CnV(13,x) >= 1
CcV(9,x)=CnV(8,x)*CnV(10,x)*CnV(13,x);
end

if CnV(9,x) && CnV(11,x) >= 1
CcV(10,x)=CnV(9,x)*CnV(11,x);
end

if CnV(10,x) && CnV(12,x) >= 1
CcV(11,x)=CnV(10,x)*CnV(12,x);
end

if CnV(11,x) >= 1
CcV(12,x)=CnV(11,x);
end

if CnV(9,x) && CnV(14,x) && CnV(15,x) >= 1
CcV(13,x)=CnV(9,x)*CnV(14,x)*CnV(15,x);
end

if CnV(13,x) >= 1
CcV(14,x)=CnV(13,x);
end

if CnV(13,x) && CnV(16,x) >= 1
CcV(15,x)=CnV(13,x)*CnV(16,x);

```

```

end

if CnV(15,x) && CnV(17,x) >= 1
CcV(16,x)=CnV(15,x)*CnV(17,x);
end

if CnV(16,x) && CnV(18,x) && CnV(19,x) >= 1
CcV(17,x)=CnV(16,x)*CnV(18,x)*CnV(19,x);
end

if CnV(17,x) >= 1
CcV(18,x)=CnV(17,x);
end

if CnV(20,x) && CnV(17,x) >= 1
CcV(19,x)=CnV(20,x)*CnV(17,x);
end

if CnV(23,x) && CnV(19,x) && CnV(21,x) >= 1
CcV(20,x)=CnV(23,x)*CnV(19,x)*CnV(21,x);
end

if CnV(20,x) && CnV(22,x) >= 1
CcV(21,x)=CnV(20,x)*CnV(22,x);
end

if CnV(21,x) >= 1
CcV(22,x)=CnV(21,x);
end

if CnV(24,x) && CnV(25,x) && CnV(20,x) >= 1
CcV(23,x)=CnV(24,x)*CnV(25,x)*CnV(20,x);
end

if CnV(23,x) >= 1
CcV(24,x)=CnV(23,x);
end

if CnV(23,x) && CnV(26,x) && CnV(30,x) >= 1
CcV(25,x)=CnV(23,x)*CnV(26,x)*CnV(30,x);
end

if CnV(25,x) && CnV(27,x) >= 1
CcV(26,x)=CnV(25,x)*CnV(27,x);
end

if CnV(28,x) && CnV(26,x) >= 1
CcV(27,x)=CnV(28,x)*CnV(26,x);
end

if CnV(29,x) && CnV(27,x) >= 1
CcV(28,x)=CnV(29,x)*CnV(27,x);

```

```

end

if CnV(28,x) >= 1
CcV(29,x)=CnV(28,x);
end

if CnV(25,x) && CnV(31,x) >= 1
CcV(30,x)=CnV(25,x)*CnV(31,x);
end

if CnV(30,x) && CnV(32,x) && CnV(33,x) >= 1
CcV(31,x)=CnV(30,x)*CnV(32,x)*CnV(33,x);
end

if CnV(31,x) >= 1
CcV(32,x)=CnV(31,x);
end

if CnV(31,x) && CnV(34,x) >= 1
CcV(33,x)=CnV(31,x)*CnV(34,x);
end

if CnV(33,x) >= 1
CcV(34,x)=CnV(33,x);
end

end

RTV=RTM*AV';
RFV=RFM*AV';

RV=zeros(size(RTV));

for x=1:100
    for y=1:67
        RV(y,x)=RTV(y,x).*RFV(y,x);
    end
end

%%%%% Obtención del vector de pre-observabilidad %%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
POV=zeros(size(RTV));
for x=1:100
    for y=1:67
        POV(y,x)=CnV(y,x)+CcV(y,x)+RV(y,x);
    end
end
end

```

```
%%%% Vector de observabilidad %%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
```

```
OV=zeros(size(POV));  
for x=1:100  
    if POV(35,x)>=1  
        OV(35,x)=POV(35,x);  
    elseif POV(1,x) && POV(2,x) >=1  
        OV(35,x)=POV(1,x)*POV(2,x);  
    end  
  
    if POV(36,x)>=1  
        OV(36,x)=POV(36,x);  
    elseif POV(2,x) && POV(3,x) >=1  
        OV(36,x)=POV(2,x)*POV(3,x);  
    end  
  
    if POV(37,x)>=1  
        OV(37,x)=POV(37,x);  
    elseif POV(4,x) && POV(3,x) >=1  
        OV(37,x)=POV(3,x)*POV(4,x);  
    end  
  
    if POV(38,x)>=1  
        OV(38,x)=POV(38,x);  
    elseif POV(4,x) && POV(5,x) >=1  
        OV(38,x)=POV(4,x)*POV(5,x);  
    end  
  
    if POV(39,x)>=1  
        OV(39,x)=POV(39,x);  
    elseif POV(4,x) && POV(6,x) >=1  
        OV(39,x)=POV(4,x)*POV(6,x);  
    end  
  
    if POV(40,x)>=1  
        OV(40,x)=POV(40,x);  
    elseif POV(6,x) && POV(7,x) >=1  
        OV(40,x)=POV(6,x)*POV(7,x);  
    end  
  
    if POV(41,x)>=1  
        OV(41,x)=POV(41,x);  
    elseif POV(7,x) && POV(8,x) >=1  
        OV(41,x)=POV(7,x)*POV(8,x);  
    end  
  
    if POV(42,x)>=1  
        OV(42,x)=POV(42,x);  
    elseif POV(8,x) && POV(9,x) >=1  
        OV(42,x)=POV(8,x)*POV(9,x);  
    end  
end
```

```

if POV(43,x)>=1
    OV(43,x)=POV(43,x);
elseif POV(9,x) && POV(10,x) >=1
    OV(43,x)=POV(9,x)*POV(10,x);
end

if POV(44,x)>=1
    OV(44,x)=POV(44,x);
elseif POV(9,x) && POV(13,x) >=1
    OV(44,x)=POV(9,x)*POV(13,x);
end

if POV(45,x)>=1
    OV(45,x)=POV(45,x);
elseif POV(10,x) && POV(11,x) >=1
    OV(45,x)=POV(10,x)*POV(11,x);
end

if POV(46,x)>=1
    OV(46,x)=POV(46,x);
elseif POV(11,x) && POV(12,x) >=1
    OV(46,x)=POV(11,x)*POV(12,x);
end

if POV(47,x)>=1
    OV(47,x)=POV(47,x);
elseif POV(13,x) && POV(14,x) >=1
    OV(47,x)=POV(13,x)*POV(14,x);
end

if POV(48,x)>=1
    OV(48,x)=POV(48,x);
elseif POV(13,x) && POV(15,x) >=1
    OV(48,x)=POV(13,x)*POV(15,x);
end

if POV(49,x)>=1
    OV(49,x)=POV(49,x);
elseif POV(15,x) && POV(16,x) >=1
    OV(49,x)=POV(15,x)*POV(16,x);
end

if POV(50,x)>=1
    OV(50,x)=POV(50,x);
elseif POV(16,x) && POV(17,x) >=1
    OV(50,x)=POV(16,x)*POV(17,x);
end

if POV(51,x)>=1
    OV(51,x)=POV(51,x);
elseif POV(17,x) && POV(18,x) >=1
    OV(51,x)=POV(17,x)*POV(18,x);
end

```

```

end

if POV(52,x)>=1
    OV(52,x)=POV(52,x);
elseif POV(17,x) && POV(19,x) >=1
    OV(52,x)=POV(17,x)*POV(19,x);
end

if POV(53,x)>=1
    OV(53,x)=POV(53,x);
elseif POV(19,x) && POV(20,x) >=1
    OV(53,x)=POV(20,x)*POV(19,x);
end

if POV(54,x)>=1
    OV(54,x)=POV(54,x);
elseif POV(20,x) && POV(21,x) >=1
    OV(54,x)=POV(20,x)*POV(21,x);
end

if POV(55,x)>=1
    OV(55,x)=POV(55,x);
elseif POV(20,x) && POV(23,x) >=1
    OV(55,x)=POV(20,x)*POV(23,x);
end

if POV(56,x)>=1
    OV(56,x)=POV(56,x);
elseif POV(22,x) && POV(21,x) >=1
    OV(56,x)=POV(21,x)*POV(22,x);
end

if POV(57,x)>=1
    OV(57,x)=POV(57,x);
elseif POV(23,x) && POV(24,x) >=1
    OV(57,x)=POV(10,x)*POV(11,x);
end

if POV(58,x)>=1
    OV(58,x)=POV(58,x);
elseif POV(23,x) && POV(25,x) >=1
    OV(58,x)=POV(23,x)*POV(25,x);
end

if POV(59,x)>=1
    OV(59,x)=POV(59,x);
elseif POV(25,x) && POV(26,x) >=1
    OV(59,x)=POV(25,x)*POV(26,x);
end

if POV(60,x)>=1
    OV(60,x)=POV(60,x);
elseif POV(25,x) && POV(30,x) >=1

```

```

        OV(60,x)=POV(25,x)*POV(30,x);
    end

    if POV(61,x)>=1
        OV(61,x)=POV(61,x);
    elseif POV(26,x) && POV(27,x) >=1
        OV(61,x)=POV(26,x)*POV(27,x);
    end

    if POV(62,x)>=1
        OV(62,x)=POV(62,x);
    elseif POV(27,x) && POV(28,x) >=1
        OV(62,x)=POV(27,x)*POV(28,x);
    end

    if POV(63,x)>=1
        OV(63,x)=POV(63,x);
    elseif POV(28,x) && POV(29,x) >=1
        OV(63,x)=POV(28,x)*POV(29,x);
    end

    if POV(64,x)>=1
        OV(64,x)=POV(64,x);
    elseif POV(30,x) && POV(31,x) >=1
        OV(64,x)=POV(30,x)*POV(31,x);
    end

    if POV(65,x)>=1
        OV(65,x)=POV(65,x);
    elseif POV(31,x) && POV(32,x) >=1
        OV(65,x)=POV(31,x)*POV(32,x);
    end

    if POV(66,x)>=1
        OV(66,x)=POV(66,x);
    elseif POV(31,x) && POV(33,x) >=1
        OV(66,x)=POV(33,x)*POV(31,x);
    end

    if POV(67,x)>=1
        OV(67,x)=POV(67,x);
    elseif POV(33,x) && POV(34,x) >=1
        OV(67,x)=POV(33,x)*POV(34,x);
    end

end

OV(1:34,:)=POV(1:34,:);

cuenta_0=zeros(67,100);

```

```

for x=1:67
    for y=1:100
        if OV(x,y)==0
            cuenta_0(x,y)=1;

        end
    end

end

num_0=zeros(1,100);
for x=1:100
    num_0(x)=sum(cuenta_0(:,x));

end

end

```

C.2.2 ALGORITMO GENÉTICO PARA EL CASO DE ESTUDIO DE 34 BARRAS

```

clc;

%%% Parámetros supuestos en el desarrollo del algoritmo genético %%%
t_cruces=0.75; t_mut=0.005; N_gen=700;

%%% Creacion del vector aleatorio de ubicacion de medidores %%%
AV=randi([0 1],100,66); k=500; %%%Genotipo %%%

%%% Costo supuesto de la implementación (en por unidad) %%%
CV=zeros(1,66);
CV(1:7)=1; CV(8)=0.418; CV(9:18)=1; CV(19:23)=0.418; CV(24:26)=1;
CV(27)=0.418;
CV(28:34)=1; CV(35)=0.418; CV(36:46)=1; CV(47)=0.418; CV(41:43)=0.515;
CV(48:65)=1;
CV(66)=0.418;

%%% Comienzo de las iteraciones de GA y observabilidad %%%
iter=1;
%%% Adaptación de la primera generación %%%

```

```

%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
%

%%% Observabilidad de la generación inicial
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
num_0=observabilidad_proyecto( AV, CnM, RTM, RFM );

%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
%%

%%%%%%%%% Función objetivo
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%

TC=costo(AV,CV);

TC_1=zeros(100,1);
for x=1:100
TC_1(x)=1/(TC(x)+k*num_0(x));
end
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
%
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
%%
A_m=zeros(1,N_gen);
A_max=zeros(1,N_gen);

while iter<=N_gen

%%%%%%%%%% Inicio del algoritmo genético %%%%%%%%%%%

%%%%%%%%%% SELECCIÓN
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
%%%%%%%%%% Proceso de selección por ruleta
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%

lon_TC=numel(TC_1);
sum_TC=sum(TC_1);
prob=zeros(1,lon_TC);
pun=zeros(1,lon_TC);

for x=1:100
    prob(x)=TC_1(x)/sum_TC;
    pun(x)=sum(prob);
end

q=[0,pun];

escg=rand(100,1);

```

```

%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%% Reducción Simple (Se reemplaza toda la población inicial
por los individuos más adaptados)
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
AV_1=zeros(100,66);
for x=1:100
    for y=1:100
        if escg(x) > q(y) && escg(x) < q(y+1)
            AV_1(x,:)=AV(y,:);
        end
    end
end
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%

%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%% CRUCE %%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%% Proceso de reproducción %%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%

rep=rand(100,1);
num_pad=zeros(1,100);

for x=1:100
    if rep(x) > t_cruces
        num_pad(x)=1;
    end
end

%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%% Proceso de seleccion de padres
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%

p_padres=find(num_pad==1);
t_padres=size(p_padres,2);

if rem(t_padres,2)==0
    p_padres;
else
    p_padres=p_padres(1:t_padres-1);
end

rt_padres=length(p_padres);

pa_padres=randperm(rt_padres);

num_par=rt_padres/2;

pa1_padres=pa_padres(1:rt_padres/2);
pa2_padres=pa_padres((rt_padres/2)+1:rt_padres);

m_padres=[pa1_padres;pa2_padres]';

p_cruce=randi(66,num_par,1);

```

```

M=zeros(num_par,66);
N=zeros(num_par,66);

for x=1:num_par
    M(x,p_cruce(x):66)=AV_1(m_padres(x,1),p_cruce(x):66);
    N(x,p_cruce(x):66)=AV_1(m_padres(x,2),p_cruce(x):66);
end

for x=1:num_par
    AV_1(m_padres(x,1),p_cruce(x):66)=N(x,p_cruce(x):66);
    AV_1(m_padres(x,2),p_cruce(x):66)=M(x,p_cruce(x):66);
end

%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
%

%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
%
% MUTACIÓN
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
%
% Operador de mutación %%%%%%%%%
mut=rand(100,66);
num_mut=zeros(100,66);
for x=1:100
    for y=1:66
        if mut(x,y) < t_mut
            num_mut(x,y)=1;
        end
    end
end

for x=1:100
    for y=1:66
        if num_mut(x,y)==1
            AV_1(x,y)=not(AV_1(x,y));
        end
    end
end

%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
%

%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
%
% EVALUACIÓN
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
%
% Nuevo fenotipo tras selección %%%%%%%%%

num_k=observabilidad_proyecto( AV_1, CnM, RTM, RFM );

TC_2=costo(AV_1,CV);

```

```

TC_3=zeros(100,1);
for x=1:100
TC_3(x)=1/(TC_2(x)+k*num_k(x));

end

%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
%

AV=AV_1;
TC_1=TC_3;
iter=iter+1;

A_m(iter)=prom(TC_3);

A_max(iter)=max(TC_3);

end

%Número de medidores en la población resultante
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
suma_AV=zeros(1,100);

for x=1:100
    suma_AV(x)=sum(AV_1(x,:));
end
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
% Mínimo de la suma de medidores de la última generación
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
NMO=min(suma_AV);

%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
% Posiciones en la cual están estos medidores
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
P_NMO=find(suma_AV==NMO);

%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
% Observabilidad, costo y matriz de vector ubicación de dichas
% configuraciones %%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
OP_NMO=num_k(P_NMO);
AV_min=AV_1(P_NMO,:);
CM=TC_2(P_NMO);

disp('El costo de esta configuración es')
disp(CM)

disp('Las posiciones en las que se encuentran dichos medidores en AV_1
son')

```

```

disp(P_NMO)

disp('El número de variables no observables cada configuración es ')
disp(OP_NMO)

disp('El vector de ubicación de medidores de dichas configuraciones es')
disp(AV_min)

disp(OP_NMO)

disp('El menor número de medidores encontrados fueron')
disp(NMO)

n=1:701;

% Gráfica de adaptación media y adaptación máxima en cada generación
%%%%%%%%%
plot(n,A_m,'r',n,A_max);
title('Adaptación media y Adaptación máxima');
xlabel('Número de generaciones');
ylabel('Costo del sistema de monitorización');

```