

UNIVERSIDAD RICARDO PALMA

FACULTAD DE INGENIERIA

ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA INFORMÁTICA

**“SISTEMA INFORMÁTICO PARA EL PLANEAMIENTO DE UN
ADECUADO SISTEMA DE MEDICIÓN EN UNA RED ELÉCTRICA
USANDO ALGORITMOS GENÉTICOS”**



TESIS PARA OPTAR EL

TÍTULO DE INGENIERO INFORMÁTICO

PRESENTADO POR:

JOHNNY EDWARD VILLAVICENCIO TAFUR

LIMA - PERÚ

A mis queridos papas Jorge y Lucila
y a mi querida hermana Erika, por todo el
apoyo, cariño, incentivo y comprensión en
esta lucha por lograr todos mis objetivos de
mi vida.

AGRADECIMIENTOS

Agradezco a Dios, por su constante presencia en mi vida siempre guiándome en todos los momentos de mi vida.

A mi abuelita María Gastelú de Villavicencio por siempre darme el apoyo y la fuerza para salir adelante.

A mi asesor Victor Beltran Saravia y al Director de Escuela Oswaldo Bravo Nelson por el apoyo y orientación para la conclusión de este trabajo.

A Luis Alberto Ulfe Vega y Gustavo Solis Vargas por su dedicación y aporte en mi desarrollo profesional.

A todos mis profesores de la facultad por el apoyo, orientación y dedicación para cumplir con este objetivo.

A mis amigos, por el incentivo y compañerismo en todas mis conquistas.

Y a todos aquellos que directa o indirectamente colaboraron en la elaboración de este trabajo

RESUMEN

El proceso de Estimación de Estado comprende aplicativos responsables por la construcción de una base de datos completa y confiable que es utilizada por funciones avanzadas en un Sistema de Gerenciamiento de Energía. La redundancia de datos es fundamental para el suceso de la Estimación de Estado. Con un nivel adecuado de redundancia, el proceso de Estimación de Estado puede lidiar con el problema de detección, identificación y eliminación de errores groseros, además de permitir que la pérdida temporal de medidas no afecte a la calida/confiabilidad de las estimativas producidas. La redundancia es evaluada considerándose el número, tipo y distribución topológica de los puntos de medición en una red eléctrica.

Siempre se requieren sistemas de medición altamente redundantes. Una vez que la cantidad de datos está directamente relacionada a la inversión de una empresa eléctrica en equipos de medición y transmisión de informaciones, muchas veces la redundancia sufre cortes presupuestales en la revisión de asignación de fondos. Por otro lado, durante la operación del sistema, cambios en la configuración de la red o un funcionamiento temporalmente inadecuado del sistema de adquisición de datos, reducen el nivel de redundancia para la Estimación de Estado. De esta manera, se pueden alcanzar niveles críticos, caracterizando situaciones de pérdida de observabilidad y consecuentemente un desempeño inadecuado de rutinas de procesamiento de errores groseros.

Este trabajo describe el desarrollo de un sistema informático para el planeamiento y evaluación de sistemas de medición destinados a la función de Estimación de Estado. Este sistema busca facilitar el análisis de diversas alternativas de interés de un proyectista, muchas veces con la necesidad de conciliación de aspectos conflictivos como la atención al requisito de desempeño de la Estimación de Estados en relación a los costos asociados.

ABSTRACT

State Estimation is responsible for constructing a complete and reliable database, which will be used by other functions in an Energy Management System. Data redundancy is crucial for the success of state Estimation. With an adequate redundancy, State Estimation can detect, identify and suppress bad data. Besides, the quality/reliability of the estimated quantities is not affected in case of a temporary loss of measurements. Redundancy level is evaluated considering the number, type and location of meters in the network.

Metering systems with a high redundancy level are always desirable. As it is related to the investments on metering and communication equipments, many times redundancy level is reduced due to financial constraints. On the other hand, during power systems operation, topology changes or data acquisition system malfunctions may also reduce the data redundancy for State Estimation. Even critical levels may be reached, where loss of observability is imminent and bad data processing routines do not work properly.

This work describes the development of a computational tool for the design and evaluation of metering systems. The developed tool aims to help the designer on the analyses of different metering plans, taking into account the need to establish adequate trade-offs between the expected performance of the State Estimation function employs and the associated investments costs.

Índice	Pag.
Capítulo 1 INTRODUCCIÓN	
1.1 Tematización	1
1.2 Problematización	2
1.3 Hipótesis	3
1.4 Objetivo	4
1.5 Importancia	4
1.6 Metodología	4
1.7 Esquema de Tesis	5
Capítulo 2 MARCO TEÓRICO	
2.1 Antecedentes	6
2.2 Estimación de estado	11
2.2.1 Etapas	12
2.2.1.1 Pre filtrado	12
2.2.1.2 Observabilidad	12
2.2.1.3 Filtrado	13
2.2.1.4 Análisis de Residuos	13
2.3 Estimación de Estado No Linear	14
2.4 Estimación de Estado Linear	16
2.5 Análisis de Observabilidad de la Red	17
2.6 Filtrado del Estado	20
2.7 Detección de Errores	21
2.8 Análisis de Residuos	22
2.9 Conclusiones	23
Capítulo 3 ALGORITMOS GENÉTICOS	
3.1 Conceptos Básicos	25
3.2 Operaciones	27
3.3 Componentes	29
3.3.1 Módulo de Evaluación	29
3.3.2 Modulo de Estructuración	29
3.3.3 Módulo de Reproducción	

3.4 Parámetros	33
3.4.1 Tamaño de la Población	34
3.4.2 Tasa de cruzamiento	34
3.4.3 Tasa de Mutación	34
3.5 Características	34
3.6 Conclusiones	35

Capítulo 4 PLANEAMIENTO Y EVALUACIÓN DE SISTEMAS DE MEDICIÓN

4.1 Formulación del Problema Matemático	36
4.2 Definición de Requisitos	38
4.3 Consideración de Áreas de Interés	39
4.4 Consideración de los Requisitos de Desempeño	40
4.4.1 Observabilidad	40
4.4.2 Ausencia de Medidas Críticas	41
4.4.3 Ausencia de Conjuntos Críticos	41
4.4.4 Comentarios	42
4.5 Consideración de Múltiples Escenarios Topológicos de Interés	43
4.5.1 Observabilidad	43
4.5.2 Ausencia de Medidas Críticas	43
4.5.3 Ausencia de medidas en Conjuntos Críticos	44
4.6 Definición de la función de Aptitud.	44
4.7 Codificación de la solución	47
4.9 Diagrama de Casos de Uso	48
4.10 Conclusiones	49

Capítulo 5 IMPLEMENTACIÓN DEL SISTEMA INFORMÁTICO VISUAL PLANMED

5.1 Antecedentes	50
5.2 Sistema Informático Visual PLANMED	53
5.3 Especificación Funcional	53
5.3.1 Asistente para Configuración de Escenarios Topológicos	55
5.3.1.1 Definición del Escenario Principal.	56
5.3.1.2 Organización del Mapa Topológico	59

5.3.1.3 Escenarios Topológicos Alternativos	60
5.3.1.4 Áreas de Interés	61
5.3.1.5 Medidores Existentes	63
5.3.1.6 Resumen del Sistema	64
5.3.2 Planeamiento del Sistema de Medición	65
5.3.2.1 Requisitos para la evaluación de cada escenario topológico.	66
5.3.2.2 Selección de Áreas de Interés Consideradas Prioritarias.	68
5.3.2.3 Definición de Parámetros	68
5.3.2.4 Selección del Tipo de Evaluación	71
5.3.2.5 Ejecución del AG	72
5.3.2.6 Resultado Gráfico del Sistema de Medición	75
5.3.3 Evaluación del Sistema de Medición	77
5.4 Conclusiones	82
Capítulo 6 SIMULACIONES Y RESULTADOS	
6.1 Simulación con el sistema IEEE-14	84
6.1.1 Sin Considerar Áreas de Interés	86
6.1.2 Considerando Áreas de Interés	91
6.1.2.1 Simulación Considerando el área 1 con prioridad	92
6.1.2.2 Simulación Considerando el área 2 con prioridad	94
6.1.2.3 Simulación Considerando el área 3 con prioridad	96
6.1.3 Considerando Escenarios Alternativos de Interés	98
6.2 Análisis Comparativo de las simulaciones	100
6.2.1 Consideración de Áreas de Interés	100
6.2.2 Planeamiento con escenarios topológicos alternativos	101
6.3 Comentarios sobre los resultados de las simulaciones	102
Capítulo 7 CONCLUSIONES Y TRABAJOS FUTUROS	
7.1 Principales Contribuciones	105
7.2 Propuestas para trabajos futuros	106
Referencias Bibliográficas	107

LISTA DE LOS PRINCIPALES SÍMBOLOS Y ABREVIATURAS

nb	Número de barras
m	Número de medidas
n	Número de variables de estado
z	Vector de medidas
x	Vector de estado
\hat{X}	Vector de estado filtrado
\hat{Z}	Vector de medidas filtradas
h	Vector de las funciones no lineales que relaciona “x” y “z”
ε	Vector de errores en las medidas
R	Matriz de covarianza de ε
$E\{.\}$	Operador de valor esperado
H	Matriz Jacobiana
G	Matriz de Gaño
r	Vector de residuos
r_N	Residuo normalizado
E	Matriz de covarianza de residuos
U	Matriz de identidad
C_{med}	Costo de los medidores a instalar
C_{UTR}	Costo de las unidades terminales remotas a instalar
P_{obs}	Penalidad impuesta a planos de medición no observables
N_{med}	Número de medidas críticas presentes en un plano de medición
P_{med}	Penalidad asociada a la presencia de medidas críticas.
$N_{med_{conj}}$	Número total de medidas pertenecientes a conjuntos críticos
P_{conj}	Penalidad asociada a la presencia de conjuntos críticos
P_{area}	Peso de la prioridad del área de interés
m_{Crit}	Número de medidas críticas pertenecientes a un plano de medición
c_{Crit}	Número de medidas en conjuntos críticos del plano de medición
SCADA	Supervisory Control and Data Acquisition
EE	Estimación de Estado
COS	Centro(s) de Operación de Sistemas

EG	Error Grosero
MQP	Mínimos Cuadrados Ponderados
UTR	Unidad Terminal Remota
AG	Algoritmo Genético
SGE	Sistema de Gerenciamiento de Energía

INTRODUCCIÓN

En los últimos tiempos ocurrieron cambios en el sector eléctrico que alteraron significativamente la forma de actuar de las empresas de energía eléctrica. Estos cambios se originaron principalmente por el deseo gubernamental de introducir agentes privados en el sector eléctrico, buscando mejorar la atención a los consumidores que buscan, quienes demandan una opción de suministro del servicio contratado a precios accesibles. Estos cambios buscan atender la necesidad de suministro de energía en tiempo más corto, usando menos recursos (capital, personal, instalaciones y equipos).

En lo que concierne a los Centros de Operación de Sistemas (COS), se requiere desarrollar una nueva generación de herramientas para Sistemas de Gerenciamiento de Energía (SGE), tomando en cuenta dificultades como: la captura en tiempo real de los datos provenientes de diversas fuentes, con la debida corrección de posibles errores; ajustes de algoritmos necesarios para reparar las posibles fallas de convergencia y producción de resultados con significado practico; evaluación de costos y riesgos en la toma de decisiones.

1.1 Tematización:

Una de las principales herramientas para SGE que se consideró fue la función de Estimación de Estados (EE). Ésta se tornó fundamental y de mucha importancia para la operación en tiempo real de los sistemas de potencia actuales, por ser capaz de ofrecer datos confiables para otras funciones avanzadas (por ejemplo, aquellas que se ocupan de las tareas de seguridad y optimización), integrantes de un SGE.

La función de EE actúa básicamente como un filtro para suavizar errores estadísticamente pequeños, inherentes a la medición; suprimir Errores Groseros (EGs), eventuales causados por un funcionamiento inadecuado del Sistema de Adquisición de Datos (SCADA). Como parte del proceso de estimación, se determina también la configuración actual de la red eléctrica y su observabilidad [Mont99].

La redundancia de los datos es uno de los principales requisitos para el éxito de la función de EE. El término de redundancia se refiere a un excedente de medidas realizadas en el sistema, en relación al número mínimo de medidas necesarias para estimar las variables de estado. Con un adecuado nivel de redundancia, la función de EE puede lidiar con el problema de detección, identificación y eliminación de EGs, así como también permite que la pérdida temporal de medidas no comprometa la calidad y confiabilidad de las estimaciones producidas. La redundancia es evaluada considerándose el número, tipo y distribución topológica de medidores en la red eléctrica bajo supervisión [Sarm94].

1.2 Problematización:

Para planear el sistema de medición de una red eléctrica es necesario atender ciertos requisitos de redundancia. Estos requisitos son los de: observabilidad, identificación de medidas críticas y medidas en conjuntos críticos. Las medidas deben ser localizadas en distintos puntos del sistema y son determinadas en términos de tipo, distribución topológica y redundancia.

Esta planeación implica efectuar una serie compleja de cálculos matemáticos en tiempos mínimos que implica la solución de un problema combinatorio puro. Para resolver problemas del tipo combinatorio puro, se requiere el apoyo de técnicas matemáticas basadas en reglas heurísticas, entre las cuales se pueden mencionar las siguientes: Recocimiento Simulado, Búsqueda Tabú y Algoritmos Genéticos.

Existe un sistema desarrollado en FORTRAN [Souz05], planteado por: J.C.S. Souza, M.B. Do Coutto Filho, E. M. Th. Schilling, Ch. Capdeville, titulado: Optimal metering systems for monitoring power networks under multiple topological scenarios, publicado en el IEEE Transactions Power Systems, en Noviembre del 2005. Este

sistema usa la técnica de algoritmos genéticos para llegar a una aproximación válida y confiable de aceptación de un plan cercano al óptimo.

En base a este sistema, se ha desarrollado esta tesis que reformula el modelo matemático en su función objetivo y restricciones planteado por los autores, adicionando restricciones para la consideración de áreas topológicas de interés y escenarios topológicos alternativos.

Se ha creado un sistema informático en Visual Basic 6 que recopila la información necesaria para ser presentada mediante una interfase al modelo matemático en FORTRAN. Los resultados del modelamiento se muestran en reportes gráficos del Visual Basic.

Las mejoras planteadas en esta tesis, en relación al sistema original de los autores conducen a cálculos de mayor confiabilidad, buscando la mejor relación de costo/beneficio del sistema de medición y la atención a los requisitos de desempeño.

1.3 Hipótesis

a) Para el modelo matemático:

La inserción de la restricción para la inclusión de escenarios topológicos alternativos permite obtener un sistema de medición más confiable;

La utilización de áreas topológicas de interés permite obtener un sistema de medición a menor costo, garantizando la confiabilidad del sistema en áreas consideradas prioritarias.

b) Para el sistema computacional visual:

La utilización de un sistema informático visual, facilita definir rápidamente parámetros y características topológicas requeridas para el planeamiento, análisis de resultados y rápida identificación de posibles errores en la topología

1.4 Objetivo

El objetivo de este estudio es de extender la investigación descrita en la referencia [Souz05], creando restricciones en el modelo matemático de planeamiento incluyendo las opciones para el planeamiento de sistemas de medición ante diversos escenarios topológicos y áreas de interés; así como el desarrollo un sistema informático en un ambiente visual, de tal modo que facilitar al usuario la entrada de datos numéricos y la visualización de los resultados gráficos del planeamiento y evaluación de sistemas de medición, que servirá para un adecuado proceso de la función de Estimación de Estados.

1.5 Importancia

Esta herramienta computacional busca facilitar el análisis de las diversas alternativas de interés de un proyectista, que nacen de la necesidad de conciliación entre aspectos contradictorios como la atención de requisitos de desempeño de la función de Estimación de Estados en relación a los costos asociados de un adecuado sistema de medición.

1.6 Metodología

El planeamiento de sistemas de medición será formulado como un problema de optimización y será utilizada la metodología de resolución basado en la técnica de Algoritmos Genéticos. El sistema informático será modelado según la metodología propuesta en UML.

1.7 Esquema de Tesis

Para el desarrollo de esta tesis serán considerados los siguientes aspectos:

Capítulo 1:

- Introducción.

Capítulo 2:

- Marco Teórico: revisión de aspectos teóricos básicos del problema de Estimación de Estados en redes eléctricas de transmisión, buscando caracterizar algunos elementos necesarios para la construcción de planos de medición adecuados.

Capítulo 3:

- Serán tratados conceptos de Algoritmos Genéticos, que será aplicado en el problema de optimización referente al planeamiento de sistemas de medición.

Capítulo 4:

- Metodología utilizada para el planeamiento de sistemas de medición.

Capítulo 5:

- Describirá los antecedentes y las principales características de la implementación del sistema informático Visual PLANMED para el planeamiento y evaluación de sistemas de medición.

Capítulo 6:

- Resultados de las simulaciones realizadas en el sistema de planeamiento de acuerdo a la metodología descrita e implementada en los capítulos 3 y 4.

Capítulo 7:

- Se describirán las principales conclusiones y sugerencias para trabajos futuros, así como las fuentes de información y bibliografía.

CAPITULO 2

MARCO TEÓRICO

2.1 Antecedentes

Los COS actuales muestran el progreso significativo alcanzado por el área de tecnologías de información; computadoras con alta capacidad de procesamiento y almacenamiento de informaciones distribuidas en redes, con facilidades graficas, permiten mejoras en los SGEs. Las funciones básicas de estos sistemas dicen respecto a: adquisición y visualización de informaciones acerca de la red eléctrica bajo supervisión en tiempo real; tratamiento de mensajes y alarmas; telecomando de abertura y cierre de llaves y disyuntores, etc.

Las aplicaciones de Análisis de Redes son las que presentan funcionalidades más reconocidas, y están siempre entre las más requeridas por las empresas de energía eléctrica en la implementación de SGE. Para ejecutar cualquier programa de análisis de redes, se debe conocer la configuración actual de la red bajo supervisión. El programa configurador de la red es responsable de esta tarea, procesando las informaciones relativas a las conexiones físicas de los elementos componentes de la red y los estados (abierto/cerrado) de éstas (mediante tele-señalizaciones). Conociendo la configuración de la red, se procede a la obtención del estado operativo del sistema, caracterizado por las tensiones nodales complejas (ángulo y magnitudes de tensión en las barras). El programa responsable de esta tarea se denomina Estimador de Estado.

La función de EE procesa periódicamente medidas de flujo e inyección de potencia activa y reactiva, así como magnitudes de tensión. Tradicionalmente el proceso

de estimación es realizado a través del método de los Mínimos Cuadrados Ponderados [Bose87], [Mont99]. A fin de que este procesamiento sea efectivo, es necesario que el referido conjunto de medidas sea redundante o suficiente para que se obtengan estimaciones confiables y que correspondan a toda la red bajo supervisión. La distribución en la red de tales medidas, considerando tipo y cantidad, es considerada como un problema que se busca resolver en esta tesis.

El problema de planeamiento de sistemas de medición para fines de supervisión en tiempo real es muy complejo; no siempre posible debido a la dimensión del problema (de naturaleza combinatoria, en razón del elevado número posible de configuraciones del sistema de medición), si no también, por la necesidad de establecer un compromiso entre el desempeño del estimador de estado y el costo del sistema de medición, necesarios para garantizar tal desempeño. Las medidas deben ser localizadas en diversos puntos del sistema e integradas al sistema de adquisición de datos (SCADA – Supervisory Control and Data Acquisition) para que estos datos obtenidos en tiempo real lleguen al COS para su procesamiento. Estas medidas son determinadas en términos de tipo, distribución topológica y redundancia, considerando los siguientes requisitos:

- Observabilidad - para permitir que el sistema sea supervisado como un todo;
- Confiabilidad – para tornar posible la detección, identificación y eliminación de EGs;
- Calidad – de modo a garantizar cierto nivel de precisión para las medidas estimadas;
- Robustez – para asegurar un nivel de redundancia, a través del cual los requisitos anteriores (observabilidad, confiabilidad o calidad) todavía sean atendidos, caso exista indisponibilidad de medidas, cambios en la configuración de la red y/o funcionamiento inadecuado del sistema de adquisición de datos;
- Costo – para que el total de la inversión en el sistema de medición (medidores, UTRs, sistemas de comunicación, etc.) sea minimizado.

De esta forma, el planeamiento de un sistema de medición es una tarea de vital importancia y una de las mas difíciles para la construcción de un proceso exitoso de la función de EE, no sólo por la dimensión del problema, sino también por su carácter

antagónico existente entre el costo de inversión y otros requisitos. Debido a que en muchos casos, la formulación del problema de localización óptima de medidores, ha sido realizada de manera poco rigurosa o incompleta [Clem90].

La literatura técnica muestra una serie de métodos que abordan el problema de la localización óptima de medidores para la EE. En adelante, se describirán algunos métodos mencionados por investigadores del área.

Los primeros métodos propuestos para proyectar un sistema de medición, consideran el desempeño de la EE evaluado a través de criterios tales como: matriz de covarianza del error en la estimación del estado [Schw70], condicionamiento numérico de la matriz de ganancia [Edel75] y disponibilidad de puntos de medición [Aria75]. En [Hand75], fue propuesto un criterio para la selección de medidores que permiten aumentar la capacidad de procesamiento de EGs. Tales métodos adoptaron la técnica de tentativa de error para seleccionar puntos de medición, sin garantizar que el óptimo global fuera alcanzado. También, el requisito de costo fue tratado como un problema de forma separada.

Un abordaje más amplio con relación a las referencias citadas anteriormente, permitiendo en principio considerar aspectos técnicos y financieros, fue propuesto en [Kog175]. El requisito de calidad fue definido en relación a las medidas de interés definidas por el proyectista del sistema y el proceso de optimización realizado a través de la eliminación sistemática de las posibles medidas del sistema. En [Aam83], el método de Koglin fue extendido para la obtención de un sistema de medición más adecuado en términos de la indisponibilidad de medidas y su confiabilidad. En esta referencia se encuentra también una comparación entre algunos métodos para la localización de medidores. En [Park88], se utilizó el algoritmo de Koglin para considerar conjuntamente los requisitos de calidad y costo.

Otras referencias del periodo inicial de la investigación para localización óptima de medidores están en [Fetz75] y [Phua77]. Fetzter creó un método en el cual un sistema de medición es ampliado a partir de medidas seleccionadas a través de los autovalores de una matriz de observabilidad para la red en supervisión. Phua y Dillon introdujeron

un método con base en un criterio de evaluación de entropía, a través del cual, los requisitos de calidad y costo fueron considerados explícitamente.

En [Clem82, 83] fue propuesto un método de refuerzo de un sistema de medición basado en la observabilidad topológica de la red en supervisión. Con el mismo objetivo, en [Mont85a,b], fue presentada una teoría completa sobre observabilidad de una red, seguida de un algoritmo para la identificación de islas observables y selección de un conjunto mínimo de medidas adicionales para restablecer la observabilidad de la red.

En [Korr84], un sistema de medición fue perfeccionado tomando en cuenta los requisitos de observabilidad, confiabilidad y robustez. En [Sarm94], fue propuesto un método para la localización de Unidades Terminales Remotas (UTRs) que considera la observabilidad de la red, la existencia de medidas críticas y la pérdida de puntos de medición.

En [Bara95], se muestra un método para la localización de medidores que combinan los requisitos de calidad, confiabilidad, robustez y costo. Este método comprende tres etapas: en la primera de ellas, un conjunto mínimo de medidas es seleccionado, observándose el requisito de calidad; en seguida son adicionados medidores para cubrir el requisito de indisponibilidad de UTRs; finalizando, son seleccionados mas medidores para garantizar la confiabilidad del proceso de estimación.

En [Çeli95] fue propuesto un algoritmo para la consideración incremental de medidas, de manera para obtener estimaciones de mejor calidad para las variables de estado. En éstas, las barras con estimaciones de baja calidad son identificadas a partir de las variancias del error en la estimación de los componentes del estado. Para reducir tales varianzas fue sugerida la definición de una lista de medidas posibles.

Para planear un nuevo sistema de medición o reforzar algún existente, en [Crai90] se puede encontrar un enfoque algebraico para la determinación de la robustez del sistema. Se presentan expresiones generales para la obtención del número mínimo de medidas necesarias y para la realización de una estimación adecuada, en caso que ocurra la indisponibilidad de una o varias medidas.

En [Abur99], se muestra un método para el proyecto de sistemas de medición que no sólo torna el sistema bajo supervisión observable, sino también preserva la observabilidad, cuando existan alteraciones en la topología de la red. La solución del problema se obtiene a través de la construcción de un algoritmo de programación lineal que ofrece una configuración de medidores para un sistema completamente observable. En una segunda etapa, fue propuesto un procedimiento sistemático de adicionar un número mínimo de medidas que asegure la observabilidad, incluso cuando exista alguna contingencia simple de cualquiera de las líneas de la red. En un trabajo posterior [Magn00], los autores propusieron un método para la actualización de un sistema de medición que garantice la condición de observabilidad, cuando ocurre la pérdida de una línea de la red o una medida. El método utilizado fue numérico que toma como base la triangularización de la matriz jacobiana del proceso de estimación resultante de la modificación provocada por una alteración en el escenario topológico.

Recientemente, trabajos con las aplicaciones de Algoritmo Genéticos (AG) están siendo usados en problemas de sistemas de potencia, éstas son mostradas en las referencias [Srin96] y [Mira96]. En [Gold89], se describe los aspectos teóricos que permiten utilizar con éxito los AGs en diversos problemas de modelamiento complejo, que son suficientemente flexibles para adaptar casi todas las funciones-criterio usadas en proyectos de sistemas. En [Ricc99a,b], fue propuesto un método de solución para el problema de localización de medidores a través de AGs. Este método contempló los requisitos de calidad, disponibilidad de mediciones y costo. En [Cose00], fue propuesto planos de medición observables, libre de medidas y conjuntos críticos.

En la referencia [Souz03], el uso de AGs garantizan un alto grado de confiabilidad en el planeamiento de un sistema de medición específicamente para un escenario topológico, garantizando la ausencia de medidas críticas y conjuntos críticos a un mínimo costo.

Otro método heurístico para la solución del problema de localización óptima de medidores se encuentra en [Mori99]. El problema fue formulado como de optimización combinatoria, con su solución propuesta por el enfoque de la Búsqueda Tabú (BT) [Glov89,90]. El objetivo fue minimizar los términos de la diagonal de la matriz de covarianza de los residuos.

En [Anto01], fue propuesta una función objetivo simple, considerando la distribución y el costo de instalación de medidores, cuya minimización se alcanza a través de la técnica de Simulated Annealing definido en [Laar87]. En [Anto00] también se utilizó la técnica de optimización microcanónica estudiada por [Barn87].

Del análisis bibliográfico presentado sobre el problema de localización óptima de medidores para la función de EE se puede concluir que:

- Se trata de un problema de optimización bastante complejo, si son considerados todos los requisitos necesarios para un planeamiento adecuado de puntos de medición;
- Las técnicas que utilizan meta heurísticas aparentan ser más apropiadas a proyectos de sistemas computacionales, debido a sus características de: simplicidad, flexibilidad y robustez. Dentro de éstas, se destacan como más promisorias aquellas que se apoyan en AGs.

2.2 Estimación de estado

La concepción del problema de EE en sistemas de potencia fue hecha por Schweppe en los años 70 [Schw70]. En la actualidad, la EE puede ser considerada como una herramienta fundamental en cualquier SGE.

La Estimación de Estado tiene como objetivo procesar datos analógicos (medidas) y digitales (estado) de una red eléctrica obtenida a través de un sistema de adquisición de datos (SCADA), para obtener el estado más probable de operación del sistema eléctrico.

La implementación de la función de EE ofrece al operador las condiciones de:

- Monitorear el sistema en forma adecuada, evitando tomar decisiones basadas en medidas erróneas;
- Determinar todas las Grandezas eléctricas de interés para la operación y también aquellas que no sean medidas;

- Obtener información completa y confiable sobre el sistema para uso de otras funciones de supervisión y control.

La EE actúa como un filtro para suavizar errores estadísticamente pequeños y comunes, inherentes a la medición; principalmente para suprimir Errores Groseros (EGs) eventuales causados por un funcionamiento inadecuado del sistema de adquisición de datos. Como parte del proceso de estimación también se determinó la configuración actual de la red eléctrica y su estado de observabilidad; para cumplir este objetivo, el proceso de EE requiere fundamentalmente medidas redundantes (flujos, inyecciones de potencia y magnitudes de tensión), indicaciones correctas del *status* (estado) de llaves y disyuntores de acuerdo con la configuración de la red.

2.2.1 Etapas

El proceso de EE en sistemas de potencia puede ser descrito por las siguientes etapas: Pre-filtrado, Observabilidad, Filtrado y Análisis de residuos.

2.2.1.1 Pre filtrado

Consiste en la verificación de límites de accesibilidad para valores de las Grandezas Eléctricas. De esta manera se deberán eliminar medidas con errores que sobrepasen los límites físicos de los equipos de medición.

2.2.1.2 Observabilidad

Se evalúa el conjunto de medidas disponibles, en un instante dado, si la Estimación de Estado es posible en toda la red; en caso de no ser posible observar la red como un todo, se identifican las islas observables y las medidas no disponibles necesarias para tornar el sistema completamente observable a través de la utilización de seudo medidas.

2.2.1.3 Filtrado

Es la etapa donde la estimación del estado de operación se obtiene efectivamente a partir del conocimiento de un conjunto de Grandezas Eléctricas medidas y de la configuración de la red.

2.2.1.4 Análisis de Residuos

En esta etapa se realizan pruebas estadísticas para detectar e identificar posibles errores en la configuración de la red y EGs en las Grandezas Eléctricas medidas.

Las informaciones procesadas por el Estimador de Estado, se encuentran usualmente en dos bases de datos conforme se describe a continuación:

Base de datos estadísticos:

- Parámetros eléctricos de los elementos de la red (líneas de transmisión, transformadores, etc.);
- Conexiones entre terminales de todos los elementos;

Base de datos dinámica:

- Magnitudes de tensión y corriente;
- Inyección de potencia activa y reactiva;
- Flujo de potencia activa y reactiva;
- Estado actual de las llaves y disyuntores.

Se debe resaltar que los resultados del proceso de Estimación de Estado son fundamentales para la ejecución de las demás funciones de análisis de redes en tiempo real [Wu90], tales como análisis de seguridad, control correctivo, etc. figura 2.1

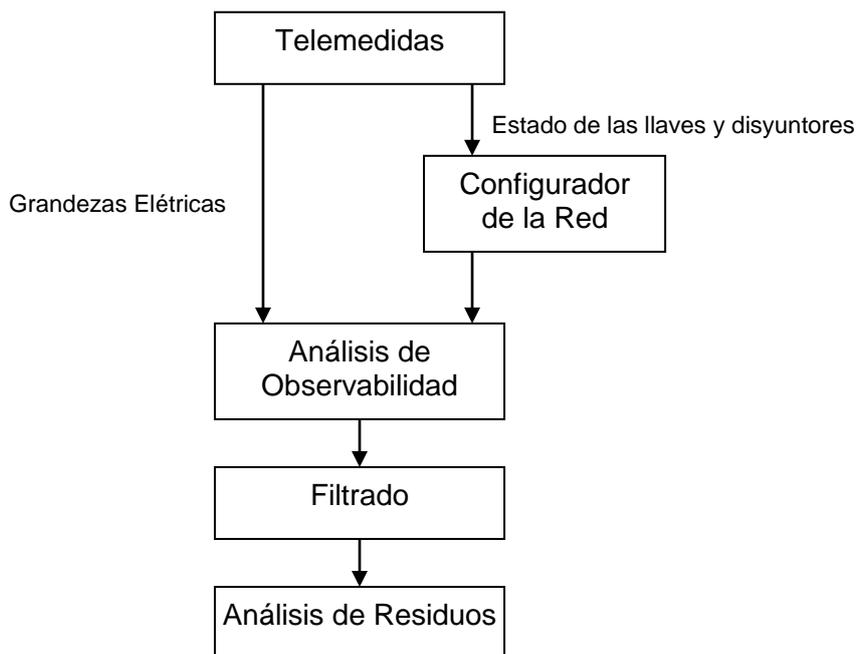


Figura 2.1 Etapas básicas del proceso de EE

2.3 Estimación de Estado No Linear

De manera general el estado de un sistema de potencia es caracterizado por el módulo y ángulo de las tensiones de las barras de sistema, la relación entre las medidas del sistema y su estado verdadero se establece con la siguiente ecuación:

$$z = h(x) + \varepsilon \quad (2.1)$$

Donde:

- z - vector de medidas, de dimensión $m \times 1$; m = número de medidas;
- $h(.)$ - vector de funciones no lineales, de dimensión $m \times 1$, que relacionan el estado verdadero con medidas del sistema no corrompidas;
- x - vector de estado de dimensión $n \times 1$, representando módulos y ángulos de las tensiones nodales;
- n = $2nb - 1$ (una barra del sistema es considerada como referencia angular y por lo tanto su ángulo no forma parte del proceso de estimación);

nb = numero de barra de la red.

ε - vector de errores e insertazas asociadas a las medidas z, modelado como variable aleatoria con distribución normal de valor esperado cero y matriz de covarianza R;

R = E [$\varepsilon \cdot \varepsilon^T$] = diag. (σ_i^2), siendo E [.] el operador esperado σ_i^2 la varianza de la i-ésima medida.

El método normalmente empleado para el proceso de Estimación de Estado [Bose87] es de los Mínimos Cuadrados Ponderados (MCP) que utiliza la siguiente función objetivo:

$$J(x) = \sum_{i=1}^m \varepsilon_i^2 \cdot \alpha_i = \sum_{i=1}^m (z_i - h(x))^2 \alpha_i \quad (2.2)$$

Siendo:

J(x) = función objetivo;

z_i = i-ésima medida;

α_i = peso atribuido a la i-ésima medida;

m = número de medidas.

En notación matricial:

$$J(x) = [z - h(x)]^T R^{-1} [z - h(x)] \quad (2.3)$$

El problema consiste en obtener una estimativa para el estado \hat{X} que minimice la función objetivo establecido en la ecuación (2.3):

$$J(\hat{x}) = \min_x [z - h(x)]^T R^{-1} [z - h(x)] \quad (2.4)$$

Para minimizar la siguiente condición debe ser atendida:

$$\left. \frac{\partial J(x)}{\partial x} \right|_{x=\hat{x}} = 0 \quad (2.5)$$

Aplicando la condición (2.5) en (2.3):

$$H^T R^{-1} [z - h(\hat{x})] = 0 \quad (2.6)$$

Definiendo $f(x) = H^T R^{-1} [z - h(x)]$ y usando el método de Newton-Raphson para encontrar \hat{X} en (2.6), se llega al siguiente proceso iterativo:

$$x^{(i+1)} = x^{(i)} + K^i \cdot [z - h(x^{(i)})] \quad (2.7)$$

Siendo:

i = contador de iteraciones;

$$K = G^{-1} H^T R^{-1}$$

$G = [H^T R^{-1} H]$ matriz Gauss, evaluada en $x = x^{(i)}$;

$H = \frac{\partial h}{\partial x}$, matriz Jacobiana.

La convergencia del proceso establecido por (2.7) es evaluada verificándose si la norma del vector desvío $|\Delta x^i| = |x^{(i+1)} - x^{(i)}|$ atiende una tolerancia predefinida.

2.4 Estimación de Estado Linear

Esta clase de estimador está construida a partir de la linearización de las ecuaciones de las medidas.

Para una determinada configuración de la red eléctrica, el estado operativo del sistema y las tele-medidas que serán procesadas, se relacionan a través de:

$$z = Hx + \varepsilon \quad (2.8)$$

Siendo:

z - vector de medidas, de dimensión $m \times 1$;

x - vector de estado verdadero, de dimensión $n \times 1$;

ε - vector de errores asociados a las medidas z ;

H - matriz Jacobiana, de dimensión $m \times n$, obtenida a través de la linearización de las ecuaciones de flujo de potencia.

La función objetivo según el método de los Mínimos Cuadrados Ponderadores (MCP) asume la siguiente forma:

$$J(\hat{x}) = [z - H\hat{x}]^T R^{-1} [z - H\hat{x}] \quad (2.9)$$

Se busca entonces, a partir de la función objetivo definido por (2.9), obtener el vector de estado \hat{X} que minimice la referida función:

$$-2[z - H\hat{X}]^T R^{-1} H = 0^T \quad (2.10)$$

$$H^T R^{-1} [z - H\hat{X}] = 0 \quad (2.11)$$

$$\hat{X} = G^{-1} H^T R^{-1} z \quad (2.12)$$

Siendo:

$$G = (H^T R^{-1} H) \quad (2.13)$$

La utilización de Estimadores Lineales es más simple, presenta un bajo costo computacional y puede ser atrayente para el análisis de observabilidad e identificación de medidas y conjuntos críticos, problemas que pueden ser enfocados sobre el punto de vista estructural [Simo90].

2.5 Análisis de Observabilidad de la Red

El Estimador de Estado tiene como parte integrante un módulo para el análisis de observabilidad de la red, que permite informar si es posible estimar el estado del sistema como un todo, a partir de los datos colectados en tiempo real [Mont85]. El éxito del proceso de EE depende de la disponibilidad de un conjunto de medidas en cantidad suficiente (redundancia de medidas) y de su adecuada distribución en la red.

Si n variables deben ser observadas, entonces deberán existir n ecuaciones lineales independientes relacionando tales variables. Antes de la etapa de filtrado, se debe verificar las condiciones de observabilidad de la red en supervisión, considerando

las telemidas recibidas para el procesamiento. El análisis de observabilidad consiste por lo tanto en:

- Verificar la existencia de telemidas suficientes para garantizar la observabilidad de toda la red.
- Identificar cuándo la red no es observable, y en que áreas es posible estimar el estado;
- Escoger un conjunto mínimo de seudo medidas que permitan estimar el estado de toda la red, sin alterar los resultados de las áreas que eran observables originalmente.

Cuando la red no es observable como un todo, o apenas se observa parte de ellas, son denominadas “Islas Observables”. Se debe diferenciar el concepto de “Isla Observable” con “Isla Física” de un sistema. Una “Isla Física” es una parte conectada de una red, que opera independientemente en relación a las demás islas del sistema. Una “Isla Observable”, es una isla del sistema para el cual los flujos de potencia/corriente en todas sus conexiones, pueden ser calculados a partir de medidas disponibles. Luego, el sistema es llamado observable si los flujos de potencia/corriente pueden ser calculados en todos los ramos.

Una isla física puede contener una o más islas observables, además de uno o más conexiones y nodos no observables. La utilización de seudo medidas [Cout99][Mira00] pueden mejorar la observabilidad de una Isla Física o talvez restaurar la observabilidad del sistema. Estas seudo medidas provienen de informaciones adicionales obtenidas de datos típicos/históricos, previsión de carga, etc. Estas informaciones pueden ser utilizadas como medidas ficticias en regiones de la red que presentan deficiencia en la medición, particularmente en puntos donde la inserción de una medida causará la mejora de la observabilidad. De esta manera, se puede aumentar la redundancia de los datos a ser procesados durante la EE, siendo importante el beneficio para la etapa de detección e identificación de EGs.

La observabilidad de una red depende únicamente del conjunto de medidas disponibles para la EE, de su localización geográfica y de la topología de la red, independiente de las condiciones de operación. Durante la supervisión en tiempo real,

este conjunto de medidas puede aun sufrir alteraciones, debido a problemas tales como: fallas en el sistema de telecomunicaciones, pérdidas de UTRs; pérdidas de telemedidas; descarte de medidas con EGs y cambios en la topología de la red.

Existen dos abordajes para la realización del análisis de observabilidad [Mont99]. La primera utiliza un análisis topológico, mientras que la segunda se basa en operaciones numéricas. El análisis topológico envuelve métodos combinatorios complejos y procedimientos lógicos, que no son influenciados por problemas debidos a errores numéricos. La observabilidad numérica a su vez se basa en la aritmética de punto flotante y su determinación está incluida en el propio proceso de EE.

La verificación de deficiencia de medidas para la observabilidad es realizada tomando en cuenta el desacoplamiento entre los conjuntos de Grandezas $P - \theta$ (potencia activa – ángulo) y $Q - V$ (potencia reactiva – magnitudes de tensión) [Clem83]. Considerando medidas tomadas a los pares (activa y reactiva), se puede hacer el análisis apenas por el conjunto $P - \theta$. Por simplicidad de notación, a partir de este punto $P\theta$ será omitido.

Como lo que se desea verificar es la interdependencia de naturaleza estructural entre los componentes del vector de estado y de medidas, serán adoptadas las siguientes simplificaciones:

- $R = U$ (matriz de identidad)
- $B_{ik} = 1$ (parámetro de elemento que conecta las barras i e k en la red);
- Elementos de H asociados a l -ésima medida:

$$\begin{array}{ll} \text{Flujo } P_{ik} \Rightarrow H(l,i) = -b_{ik} & H(l,k) = -b_{ik} \\ \text{Inyección } P_i \Rightarrow H(l,i) = \sum_k b_{ik}, i \neq k & H(l,k) = -b_{ik} \end{array}$$

Siendo $k = \text{índice de las barras conectadas a la barra } i$.

Las columnas de H son correspondientes a los ángulos de las barras; la referencia angular no pertenece a la matriz.

Se dice que un sistema es observable si la Matriz de Gaño $G=H^T H$ es invertible, lo que puede ser verificado durante su factorización por la ausencia de pivots nulos. La letra T, representa la transposición matricial.

Además de la verificación binaria (si o no), se pueden establecer diferentes grados de observabilidad, asociados al nivel de criticabilidad de las medidas procesadas. La identificación de medidas y conjuntos críticos permite que se evalúen mejor las condiciones de observabilidad de un sistema bajo supervisión, además de revelar en qué medidas no será posible garantizar la confiabilidad del proceso de estimación de estado. Una medida es definida como crítica si su ausencia del conjunto de medidas disponibles para el procesamiento torna al sistema no observable. El mismo concepto de criticabilidad individual de medidas puede ser extendido para grupos de medidas. Un conjunto crítico está definido como un conjunto formado por medidas no críticas, en la que la eliminación de cualquier medida que le pertenezca torne críticas las demás [Cout01].

2.6 Filtrado del Estado

La estimativa del estado \hat{x} que minimiza $J(x)$ puede ser obtenida por:

$$H^T R^{-1} [z - h(\hat{x})] = 0 \quad (2.14)$$

$$\hat{x} = G^{-1} H^T R^{-1} z \quad (2.15)$$

Donde $G = (H^T R^{-1} H)$ es conocido como Matriz de Gaño.

Las ecuaciones (2.14) y (2.15) son idénticas a las (2.6) y (2.12), respectivamente, teniendo que ser repetidas para facilitar la lectura de este documento.

Aplicando el operador de valor esperado a la ecuación (2.1) y usando (2.15), el vector de medidas filtradas se puede obtener:

$$\hat{z} = H \hat{x} \quad (2.16)$$

2.7 Detección de Errores

La presencia de medidas conteniendo EGs puede comprometer el proceso de EE, tornando sus resultados no confiables. Por esta razón, es necesario tener medios para detectar la presencia de tales errores, identificar la medida portadora de error, eliminarla o, si es posible, sustituirla. Algunos procedimientos simples pueden ser capaces de identificar medidas con EGs en ciertas situaciones. Algunos de estos procedimientos son:

- Verificación del estado de llaves/disyuntores del circuito donde se toma la medida de flujo;
- Comparación de los valores de la medidas con limites de escala;
- Comparación entre valores de flujo en los dos extremos de un circuito.

Los procedimientos mencionados consisten en *tests* preliminares de consistencia muy simple y capaz de descartar medidas notablemente erróneas. Por eso, en ciertos casos no puede ser posible identificar medidas falsas utilizando tales procedimientos. En estos casos la detección e identificación de medidas portadoras de errores groseros deben ser realizadas durante el proceso de EE [Souz96].

En el método de los MCP la detección de la presencia de una o mas medidas con error grosero puede ser realizada a través de un *test* que utiliza la función objetivo $J(x)$. En la ausencia de medidas con EGs, $J(x)$ tendrá una distribución Chi-cuadrado; para realizar el test en $J(x)$, se adopta un parámetro λ (nivel de detección) tal que:

- Si $J(x) \leq \lambda$, entonces no existen medidas con EGs;
- Si $J(x) > \lambda$, entonces existen medidas con EGs;

El valor de λ define una probabilidad de tomarse una decisión equivocada, esto es, considerar que no haya medidas con EGs, cuando en verdad existen. En la práctica, la distribución Chi-cuadrado es aproximada por la distribución Normal.

2.8 Análisis de Residuos

Después de la estimación de medidas se realiza la evaluación de la consistencia de los resultados obtenidos, a través del análisis de los residuos. El vector de los residuos de la estimación r es definido como la diferencia entre el valor medido y el valor correspondiente estimado:

$$r = z - \hat{z} \quad (2.17)$$

$$r = z - H(\hat{x}) \quad (2.18)$$

El vector de los residuos puede ser interpretado como una variable aleatoria con Distribución Normal, valor esperado cero y matriz de covarianza E , dada por:

$$E = R - H(H^T R^{-1} H)^{-1} H^T \quad (2.19)$$

En presencia de solo un EG, la medida errónea es aquella que presenta el mayor residuo normalizado [Hand75]. Esto justifica la utilización del *test* de los residuos normalizados con un método de detección e identificación de EGs.

El vector de los residuos r es normalizado y sometido al siguiente *test* de validación:

$$r_M(i) = \frac{|r(i)|}{\sigma_E(i)} \leq \gamma \quad (2.20)$$

$$\sigma_E(i) = \sqrt{E(i,i)} \quad (2.21)$$

Donde $\sigma_E(i)$ representa el desvío padrón del i -ésimo componente del vector de los residuos y γ , el límite de detección. Residuos normalizados que violan el límite establecido indican la presencia de EGs.

A pesar que existen otros *tests* para la evaluación de los resultados del proceso de filtrado, por ejemplo $J(x)$ y de los residuos ponderados [Hand75], en este trabajo se utilizará el *test* de los residuos normalizados, por ser el más confiable.

Después de la detección de la presencia de EGs en el conjunto de medidas, es necesario realizarse la identificación y la eliminación/sustitución de las medidas

portadoras de estos errores. Se debe recordar que la eliminación de medidas puede provocar la pérdida de observabilidad del sistema o surgimiento de medidas y conjuntos críticos, trayendo dificultades para el proceso de EE. Esto es por que la capacidad del estimador en detectar e identificar EGs a través de los *tests* de los residuos normalizados se agota en situaciones de baja redundancia (niveles críticos).

2.9 Conclusiones

En este capítulo se describieron las principales etapas inmersas en el proceso de Estimación de Estado. La redundancia de los datos es un requisito fundamental para el éxito de cualquier proyecto e implementación de la función de Estimación de Estado en COS. En situaciones de baja redundancia, se compromete la capacidad de procesar eficientemente EGs o hasta incluso la estimación del estado del sistema. En general, tales situaciones están asociadas a la presencia de medidas y conjuntos críticos o a la pérdida de observabilidad del sistema. Los sistemas de medición deben ser proyectados de modo que puedan hacer frente a situaciones como éstas.

CAPITULO 3

ALGORITMOS GENÉTICOS

Charles Darwin construyó la “Teoría de la Evolución”, en la cual afirma que las especies naturales van evolucionando para adaptarse al medio en que viven. Aquellos individuos que mejor se adapten tendrán mayor probabilidad de procrear y sobrevivir hasta la edad adulta, haciendo así que sus características genéticas pasen de generación en generación.

Los Algoritmos Genéticos (AGs) constituyen una clase de procedimientos estocásticos de Inteligencia Artificial, basados en el modelo de evolución de sistemas naturales: preservación de información genética y búsqueda de sobrevivencia a través de la adaptación al ambiente [Mic96]. Fueron concebidos por Holland [Hol75] con la idea de simular la evolución de un conjunto de individuos vivos en un ambiente natural, percibiéndose posteriormente, su potencial como una técnica para optimización global.

Antes del desenvolvimiento de los AGs, diversos científicos en computación utilizaban otros sistemas evolutivos para resolver problemas de optimización en Ingeniería [Mitch96]. Posteriormente, la innovación de someter, secuencialmente, un conjunto de individuos a un vector de operaciones llamadas genéticas [Gold89], distinguió los AGs de los algoritmos evolutivos hasta entonces existentes.

Algunas ventajas asociados comúnmente a ellos son:

- Posibilitar la búsqueda global en funciones multinodales;
- Permitir el tratamiento simultáneo de variables reales y enteras;

- Dispensar la evaluación de derivadas, siendo aplicables las funciones no diferenciales o no convexas.

Por otro lado, de acuerdo a su naturaleza probabilística, no hay garantía en la obtención de solución óptima, ya que han sido descritas simulaciones en las cuales se obtuvo un óptimo local y no global [Gold89].

Según [Mich96], el éxito o fracaso del AG depende de la capacidad en equilibrar dos objetivos aparentemente antagónicos:

- 1) Exploración de varias regiones del dominio;
- 2) Perturbación de las informaciones contenidas en la población vigente.

Ensayos de carácter experimental en relación a estudios teóricos, han sido desarrollados para mejorar el entendimiento de los operadores genéticos. Por mucho tiempo el teorema fundamental de los algoritmos genéticos [Hold75] constituyó la base teórica para el análisis de los AGs, entre tanto este teorema tiene limitaciones que son poco perceptibles a primera vista.

La limitación del teorema fundamental de los AGs motivó trabajos recientes que buscan mejorar su entendimiento teórico, tratándolos como procesos estocásticos modelados analíticamente. Los resultados obtenidos por estos trabajos, a pesar que representan un avance teórico notable en relación a la base original propuesta, aun no explican satisfactoriamente el modo cómo los operadores genéticos actúan, no permitiendo establecer estrategias prácticas definitivas de ajuste de los parámetros de los AGs.

3.1 Conceptos Básicos

Los AGs son una familia de modelos computacionales inspirados en la evolución, los cuales modelan una solución para un problema específico, en una estructura de datos como la de un cromosoma. En ellos se aplican operadores que recombinan estas estructuras preservando informaciones críticas durante el proceso de búsqueda de una mejor solución.

Los AGs combinan el principio de sobrevivencia de los más aptos con el intercambio de informaciones genéticas entre individuos para el desarrollo de métodos de optimización simples y robustos. La estrategia de búsqueda es paralela, estructurada y más aleatoria, dada en función al esfuerzo de la búsqueda de puntos de “alta aptitud”, es decir, de puntos en los cuales la función a ser minimizada o maximizada tiene valores relativamente bajos o altos.

A través de procesos iterativos, son exploradas informaciones históricas para encontrar nuevos puntos de búsqueda donde son esperados mejores desempeños. Cada iteración es llamada generación.

En una población de candidatos, son aplicados los principios de selección y se determinan cuáles individuos se conseguirán reproducir, generando un número determinado de descendientes para la próxima generación, como una probabilidad determinada por su índice de aptitud. Aquellos individuos con mayor aptitud tienen mayores posibilidades de reproducirse.

Este proceso adaptativo puede ser usado para resolver problemas de optimización combinatoria, sobre un complejo espacio de búsqueda, formulado como:

$$\begin{aligned} & \text{Max } f(x) \\ & \text{s/a } \quad g_i(x) = 0, \quad i = 1, 2, \dots, m \\ & \quad \quad h_j(x) \leq 0, \quad j = 1, 2, \dots, r \\ & \quad \quad x \in S \end{aligned}$$

Donde:

$f(x)$ - función objetivo

$g_i(x)$ - restricción de igualdad

$h_j(x)$ - restricción de desigualdad

$x = \{x_1, x_2, \dots, x_n\}$ - conjunto de variables del problema

S - espacio de búsqueda n -dimensional

En la representación de un problema se busca codificar las informaciones de manera análoga a los cromosomas biológicos. La mayor parte de las representaciones son genotípicas, utilizando vectores de tamaño finito y un alfabeto finito.

En la representación a través de vectores binarios, cada elemento de un vector denota la presencia (1) o ausencia (0) de una determinada característica (genotipo). Estos elementos también pueden ser combinados formando las características reales del individuo (fenotipo). En la representación de vectores binarios, las operaciones patrón pueden ser utilizadas facilitando su empleo en diferentes clases de problemas.

El criterio de selección hace que después de muchas generaciones, el conjunto inicial de individuos genere otros más aptos. A través de los operadores genéticos, una población dada consigue generar poblaciones sucesivas que mejoren su aptitud con el tiempo. Los operadores principales son: cruzamiento y mutación. Con estos operadores se obtiene una generación totalmente nueva que posee de alguna forma, características de adaptación adquiridas a través de las generaciones. El operador de elitismo es utilizado para prevenir que los mejores individuos no desaparezcan de la población por la manipulación de los operadores genéticos; de esta manera, ellos pueden ser simplemente repetidos en cada nueva generación.

3.2 Operaciones

Los Algoritmos Genéticos se basan principalmente en un criterio de selección que después de muchas generaciones, el conjunto inicial genera individuos más aptos. La mayoría de los métodos de selección son proyectados para escoger preferencialmente individuos con mayores grados de aptitud, en muchos casos, no exclusivamente con la finalidad de mantener la diversidad de la población.

Es necesario un conjunto de operaciones para que una población consiga generar poblaciones sucesivas que se espera, mejoren su aptitud con el tiempo. Estas operaciones son de cruzamiento (crossover), inversión de partes del cromosoma y mutación. Ellos son utilizados para garantizar que la nueva generación sea totalmente nueva, pero que posea de alguna forma, características de adaptación adquiridas por las generaciones anteriores. Para prevenir que los mejores individuos no desaparezcan de la población por la manipulación de los operadores genéticos, ellos pueden ser automáticamente colocados en la próxima generación, a través de la reproducción

elitista. Las mutaciones propician cierta variación y ocasionalmente introducen alteraciones benéficas a los cromosomas.

La inversión es un mecanismo de alteración por la inversión del código del cromosoma. El cruzamiento es responsable por el intercambio de material genético proveniente de los cromosomas generadores. Usando el cruzamiento, las posibilidades de las características ideales se perpetúan durante el procesamiento y aumentan debido a que si los padres con grados de adaptación mayores se reproducen con mayor frecuencia. Este ciclo es repetido en un determinado número de veces.

La figura 3.1 muestra el esquema de un Algoritmo Genético Básico

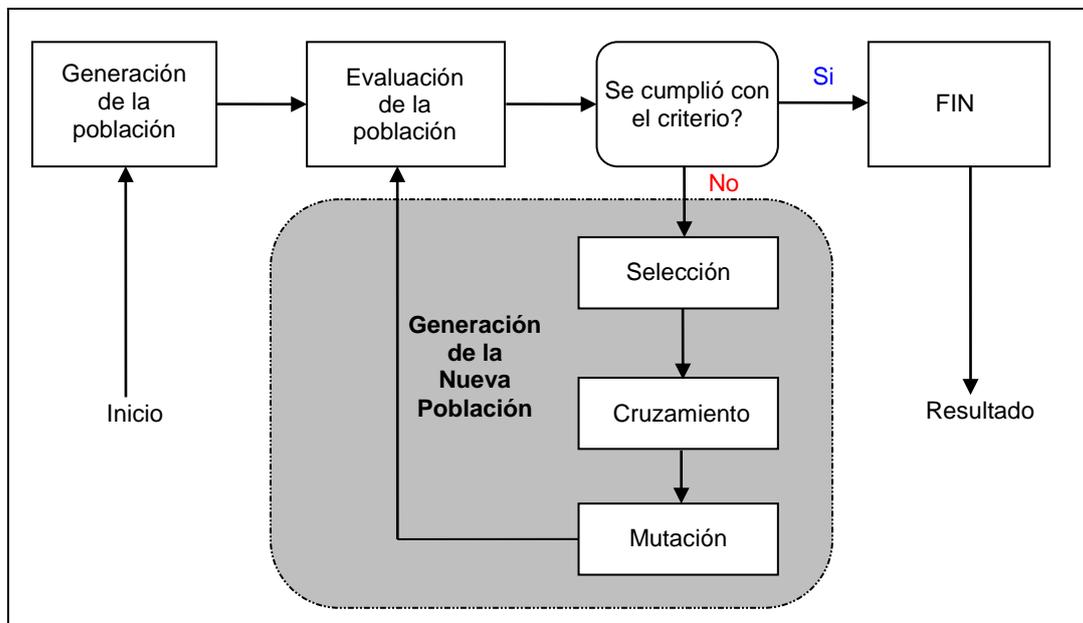


Figura 3.1: Algoritmo Genético básico.

Este proceso presenta los siguientes pasos:

1. Se genera una población inicial aleatoriamente.
2. Se evalúan los individuos de la población, de acuerdo con la función de aptitud (*fitness*).
3. Se verifica si alguno de los criterios de parada es satisfecho (número máximo de generación o existe una interrupción por el usuario).

4. Se ejecutan las operaciones de selección, cruzamiento y mutación para generar una nueva población.
5. La nueva población volverá a ser evaluada conforme al paso 2 hasta que se cumplan los criterios establecidos.

3.3 Componentes

Un AG posee varios módulos que requieren ser realizadas para la solución de un determinado problema:

3.3.1 Módulo de Evaluación

El módulo de evaluación representa unión entre el algoritmo y el problema. En este módulo se encuentra la función de evaluación (*fitness*).

3.3.2 Modulo de Estructuración

Este módulo es responsable por las siguientes tareas:

a) Representación

Datos representados de forma binaria, facilitando el proceso de selección y reproducción de los individuos.

b) Inicialización

La inicialización de la primera población, denominada primera generación es generalmente aleatoria, pero también puede partir de un conjunto pre definido de individuos.

c) Selección de los padres

Para escoger los individuos en la población que fueron creadas por los descendientes para la próxima generación, existen muchos mecanismos de selección, siendo las más utilizadas la técnica de la ruleta y torneo. La probabilidad de selección P_i el de un cromosoma S_i está dado por:

$$P_{sel}(S_i) = \frac{a(S_i)}{\sum_{j=1}^n a(S_j)} \quad (3.1)$$

Donde:

- $P_{sel}(S_i)$ - es la probabilidad de selección del cromosoma S_i ;
- $a(S_j)$ - representa la adecuación del cromosoma S_j .

c.1) Método de la Ruleta

Inicialmente fue propuesto por Goldberg [Gold89], es un método bastante simple que consiste en crear una ruleta en la que cada cromosoma posee un segmento proporcional al de su aptitud.

Por ejemplo, una población de 6 cromosomas cuya aptitud es dada por una función cualquiera (en este caso, simplemente la conversión de binario para decimal), tal como muestra la Tabla 3.1.

Tabla 3.1: Ejemplo para ilustrar la selección por ruleta.

No	Cromosoma	Aptitud	% del total
1	0101101	45	13,2
2	1011001	89	26,2
3	1111101	125	36,7
4	0010101	21	6,1
5	0110100	52	15,2
6	0001001	9	2,6
	Total	341	100,0

Con los valores porcentuales constantes en la cuarta columna de la tabla, se puede elaborar la ruleta mostrada en la figura 3.2. Esta ruleta se girará 6 veces para efectuar la selección de la población auxiliar (muestra) llevando en cuenta que, los individuos con mayor área en la ruleta tienen, consecuentemente, mayores probabilidades de ser seleccionados mas veces que los individuos menos aptos.

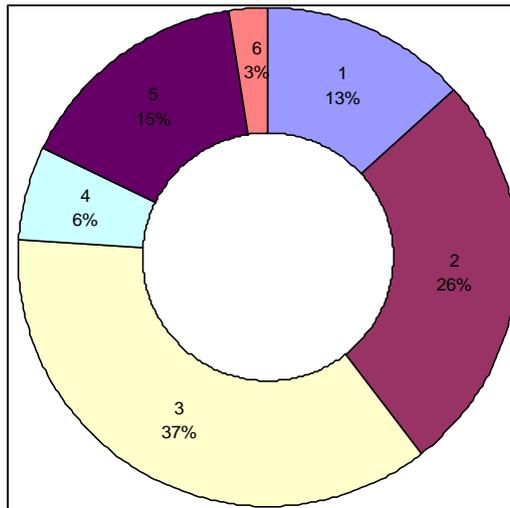


Figura 3.2: Representación Grafica de la Ruleta

c.2) Método de Torneo

En este método cada elemento de la muestra es seleccionado eligiéndose al mejor individuo de un conjunto de z elementos tomados aleatoriamente en la población base. Se repite las veces que fuera necesario para completar la muestra. El valor del parámetro z usualmente es un valor entero pequeño con relación al tamaño total de la población base, siendo generalmente 2 o 3.

Usualmente también se adoptan estrategias de selección que lleven en cuenta el elitismo, donde se busca garantizar que el mejor (o mejores) individuos son siempre seleccionados en la siguiente generación. En este caso, estos individuos siempre son seleccionados y simplemente copiados para la próxima generación.

3.3.3 Módulo de Reproducción

El módulo de reproducción es utilizado en los individuos “padres” seleccionados para efectuar la reproducción, garantizando la próxima generación de individuos. Generalmente, son utilizados los operadores de mutación y cruzamiento en un punto, descritos a continuación:

a) Cruzamiento

El operador de cruzamiento en un punto corresponde a una división del material genético de los padres en un punto aleatorio para mezclarlos y generar un nuevo cromosoma que pertenecerá al hijo. La selección natural se debe al ajuste de los cromosomas y la selección de los padres, mientras que la mutación y el cruzamiento a la diversidad genética de los hijos. Una observación importante respecto al cruzamiento es que se puede generar hijos completamente diferentes de los padres conservando características comunes. Por otra parte, el cruzamiento no modifica un *bit* en la posición en que los padres tienen el mismo valor; considerada una característica cada vez más importante con el pasar de las generaciones. Figura 3.3:

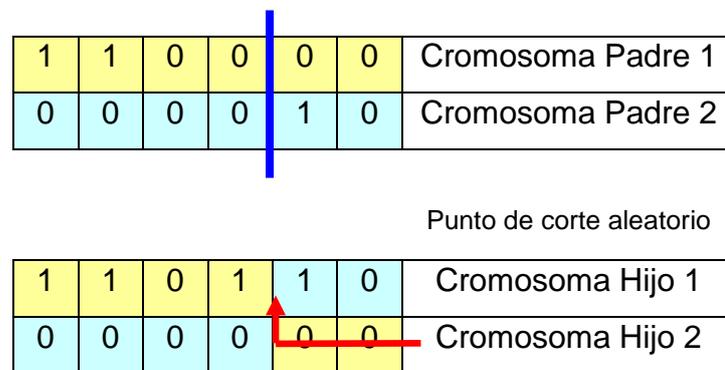


Figura 3.3: **Ejemplo de cruzamiento del cromosoma.**

También se utilizan algunas variaciones de esta técnica; en una de ellas, puede haber intercambio de material genético entre los individuos en varios puntos comúnmente llamado cruzamiento en Multi-punto. En otra variación llamada “Cruzamiento Uniforme”, son utilizados puntos de cruzamiento, determinados a través de un parámetro global, que indican la probabilidad de cada variable a ser intercambiada en los padres.

b) Mutación

El operador de mutación es necesario para la introducción y mantenimiento de la diversidad genética de la población, alterando arbitrariamente uno o más componentes de una determinada estructura ofreciendo así medios para

la introducción de nuevos elementos en la población. De esta forma se asegura que la probabilidad de llegar a cualquier punto del espacio de búsqueda nunca será cero, además de contornear el problema de los mínimos locales, pues con este mecanismo, se altera levemente la dirección de la búsqueda. El operador de mutación es aplicado a individuos con una probabilidad determinada por la tasa de mutación; generalmente se utiliza una tasa de mutación pequeña ($< 1\%$) pues es un operador genético secundario.

La mutación en la representación binaria es realizada por el intercambio de 1 por 0 o viceversa, conforme puede ser notado en el cromosoma de la Figura 3.4.

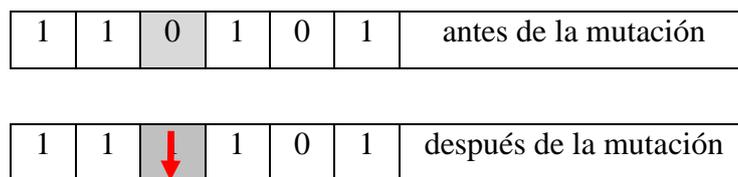


Figura 3.4: Ejemplo de mutación del cromosoma.

c) Elitismo

La técnica mas utilizada para mejorar la convergencia de los AGs es la reproducción elitista que tiene como objetivo prevenir que los mejores individuos no desaparezcan de la población por la manipulación de los operadores genéticos. Así esta técnica fuerza al AG a retener cierto número de “mejores” individuos para ser colocados en la próxima generación.

3.4 Parámetros

Es importante también analizar de qué manera algunos parámetros influyen en el comportamiento de los AGs, para que se pueda establecer conforme a las necesidades del problema y de los recursos disponibles.

3.4.1 Tamaño de la Población

El tamaño de la población afecta el desempeño global y la eficiencia de los AGs; con una población pequeña el desempeño puede caer, pues de este modo la población ofrece una pequeña cobertura del espacio de búsqueda del problema. Una población grande generalmente ofrece una cobertura representativa del dominio del problema, además de prevenir convergencias prematuras para soluciones locales al contrario de globales. Por el contrario, cuando se trabaja con grandes poblaciones, los requisitos computacionales son mayores y puede tener una convergencia del resultado más lenta.

3.4.2 Tasa de cruzamiento

Cuanto mayor es esta tasa, mas rápidamente se introducirán nuevas estructuras en la población. Pero si ésta fuera muy alta, las estructuras con buenas aptitudes podrán ser retiradas mas rápidamente del proceso evolutivo. Así la mayor parte de la población será sustituida pudiendo ocurrir pérdidas de estructuras de alta aptitud. Con un valor por debajo de esta tasa, el algoritmo puede tornarse muy lento.

3.4.3 Tasa de Mutación

Una baja tasa de mutación previene que una posición del cromosoma se quede estancada en un valor, además de posibilitar que se llegue en cualquier punto del espacio de búsqueda. Con una tasa muy alta la búsqueda se torna esencialmente aleatoria.

3.5 Características

A continuación, se presenta una breve descripción de las diferencias esenciales entre AGs y otras técnicas de optimización.

- a) Los AGs utilizan una forma codificada de los valores de una función, en vez de los valores reales. Este tipo de codificación presenta innumerables ventajas en el transcurso del proceso de optimización, tornando las operaciones genéticas mas difíciles de ser ejecutadas;

- b) Usan un conjunto de puntos para guiar una búsqueda y no solamente un punto aislado del espacio de búsqueda. Esto le da a los AGs la capacidad de buscar en espacios ruidosos con varios puntos óptimos locales. Los AGs observan diferentes áreas del espacio del problema de una sola vez y usan toda esta información para guiarse en el espacio de soluciones, permitiendo una mejor búsqueda del óptimo global.
- c) Usan solamente informaciones generadas por si mismas para que se pueda guiar por el espacio de búsqueda. Muchas otras técnicas necesitan de una gran variedad de informaciones para que se puedan guiar. Por ejemplo, el método de *hill-climbing* requiere derivadas. La única información utilizada por los AGs es una medida de adaptabilidad de cada punto en el espacio (algunas veces conocida por el valor de la función objetivo). Una vez conocido este valor sobre un punto, los AGs pueden usarlo para continuar la búsqueda por el valor óptimo.
- d) Poseen naturaleza probabilística, no determinística. Esto es resultado directo de las técnicas aleatorias usadas por los AGs.
- e) Son inherentemente paralelos. Ésta es una de las más importantes y poderosas características de los AGs. De esta manera tratan un gran número de puntos (*strings*) simultáneamente.

3.6 Conclusiones

El AG es un representante de una familia de modelos computacionales inspirados en la evolución. Ellos modelan una solución para un problema específico, en una estructura de datos como las de un cromosoma y utilizan operadores que recombinan estas estructuras preservando informaciones críticas durante el proceso de búsqueda por una mejor solución. Estos algoritmos son utilizados para lidiar con problemas complejos de optimización combinatoria, como el que está siendo tratado en este trabajo.

CAPITULO 4

PLANEAMIENTO Y EVALUACIÓN DE SISTEMAS DE MEDICIÓN

La redundancia de los datos es fundamental para un adecuado proceso de Estimación de Estados. El término redundancia se refiere a un excedente de medidas tomadas en el sistema en relación a un número mínimo necesario para estimar todas las variables de estado.

Cuanto mejor y más calificada fuera la redundancia, mayores serán las probabilidades de constituirse un proceso de EE exitoso. De manera antagónica, crecen las inversiones en mediciones y por lo tanto, se debe encontrar una solución de compromiso entre redundancia y costos asociados.

La instalación de puntos de medición en redes de transmisión puede ser vista como un problema de optimización, donde el objetivo es obtener una solución que minimice los costos de inversión en UTRs y medidores para garantizar un desempeño deseable para la función de EE.

En las próximas secciones será presentado un método que permitirá establecer puntos de medición a un mínimo costo.

4.1 Formulación del Problema Matemático

El planeamiento de sistemas de medición puede ser representado como un problema de optimización formulado como:

$$\text{Min } (C_{\text{med}} + C_{\text{UTR}}) \quad (4.1)$$

Sujeto a los requisitos de desempeño

Donde:

C_{med} - costo de los medidores a instalar

C_{UTR} - costo de los UTRs a instalar

Los requisitos de desempeño se refieren a la cantidad, tipo y localización geográfica de los medidores en la red, a modo de garantizar un desempeño esperado para el proceso de EE. En este trabajo los requisitos establecidos son: observabilidad, ausencia de medidas críticas y ausencia de conjuntos críticos para el sistema de medición.

Cuando el requisito de desempeño busca garantizar sólo la observabilidad de la red [Clem90], esto implica en la distribución de puntos de medición de manera que se pueda supervisar la red de manera integral. Por otro lado, cuando se requiere garantizar la ausencia de medidas y conjuntos críticos [Ayre86], refiere se puede observar el sistema en el caso de la pérdida de medidas, pudiéndose también detectar/identificar EGs, verificando una menor confiabilidad al proceso de supervisión en lo que respecta al tratamiento de EGs. Por esto, en tales situaciones se requieren sistemas de medición más redundantes, implicando mayores inversiones. Considerando entonces los requisitos de observabilidad y ausencia de medidas y conjuntos críticos, el problema (4.1) puede ser formulado como:

$$\text{Min } (C_{\text{med}} + C_{\text{UTR}})$$

Sujeto a:

requisito de observabilidad (4.2)

requisito de ausencia de medidas críticas

requisito de ausencia de conjuntos críticos

En la metodología propuesta es posible tratar el problema (4.2) de forma tal que la consideración de los requisitos puede ser hecha apenas parcialmente. La flexibilización de la consideración de los requisitos permite un mejor aprovechamiento de la relación de compromiso entre el costo de la inversión y la calidad del plano de medición (desde el punto de vista de la supervisión de la red).

La supervisión de una red que presente diversas configuraciones y áreas de interés también podrá ser tratada por la metodología propuesta. La consideración, de manera independiente, de los requisitos de desempeño y de diferentes escenarios topológicos con áreas de interés tiene impacto directo sobre el nivel de redundancia del plano de medición y consecuentemente sobre sus costos. Así, se puede realizar un análisis de tipo costo beneficio permitiendo al diseñador de un sistema de medición, mas elementos para la toma de decisión.

El problema de localización óptima de puntos de medición en la red, formulado en la ecuación (4.2), es de naturaleza combinatoria, siendo adecuado tratarlo a través de algoritmos de búsqueda global, como por ejemplo los AGs.

4.2 Definición de Requisitos

Conforme fue mencionado en el capítulo 1, se desea disponer de un sistema de medición que permita una supervisión confiable, caracterizada por los siguientes requisitos:

a) **Precisión**

Este requisito se refiere a la obtención de estimativas (estado/medidas) con cierto grado de precisión pre-establecido. La consideración de tal requisito depende de la redundancia del sistema de medición y de la calidad de los equipos que están integrados al proceso de adquisición de datos. En este trabajo, no será considerado explícitamente el requisito de precisión de estimativas.

b) **Observabilidad**

Se busca que el proceso de EE se extienda por toda la red. La observabilidad de una red depende de la configuración del sistema de medición, es decir, de los tipos de medidores disponibles y de su localización en la red. Así, se debe proyectar un sistema de medición que garantice tal requisito para uno o más escenarios topológicos asumidos para la red eléctrica en estudio.

c) Confiabilidad

Eventualmente, una o más medidas pueden presentar EGs; tales errores, cuando no son detectados pueden comprometer la calidad de la supervisión del sistema. Fueron presentados métodos para la detección e identificación de medidas portadores de EGs, siendo la eficacia de estos métodos dependiente del conjunto de medidas disponibles. Se debe concebir un sistema de medición que permita el tratamiento adecuado de EGs, evitándose condiciones de redundancia crítica en que habrá fallas de detección/identificación de tales errores.

d) Robustez

Este requisito es importante para asegurar que los requisitos anteriores aun sean atendidos caso existan alteraciones topológicas y/o indisponibilidad de medidas.

e) Costo

En el planeamiento de sistemas de medición, se debe considerar que los recursos financieros para la implementación de tal sistema son restrictos. Luego de los requisitos de desempeño del proceso de EE, se debe considerar también el requisito de costo, es decir, los objetivos deseados deben ser atendidos al mínimo costo. Existen varios costos asociados a la implementación del sistema de medición en una subestación, tales como: sistema de comunicación, UTR, tele señalización y tele medición. Por lo tanto, es necesario que tales costos sean considerados, de manera que se pueda evaluar el costo total asociado a cada solución propuesta.

Se percibe también que el requisito de costo se contrapone a los demás requisitos: A mayor redundancia, mejor desempeño de la EE, y por esto mayores costos. Los recursos financieros entonces deben ser minimizados de modo que puedan atender los objetivos deseados, lo que se convierte en una tarea bastante compleja.

4.3 Consideración de Áreas de Interés

Una forma de planear un sistema con escasez de recursos financieros, consiste en priorizar la inversión en áreas de la red. Así se puede proyectar sistemas de medición en que el requisito de observabilidad sea atendido en toda la red y los

requisitos de ausencia de medidas y conjuntos críticos sean atendidos en áreas específicas de la red, en función a la prioridad de su supervisión. Con esto, el costo total de la inversión deberá ser menor que aquella en que los requisitos mencionados sean atendidos considerando toda la red. El problema de considerar áreas prioritarias para el sistema será presentado en las siguientes secciones.

4.4 Consideración de los Requisitos de Desempeño

Los AGs necesitan solamente del valor de la función objetivo (aptitud) para guiar el proceso de la búsqueda de la solución óptima. Cuando la función de aptitud está bien construida, la solución óptima deberá reflejar adecuadamente el compromiso entre el costo y los requisitos esperados.

En la formulación propuesta en este trabajo, los requisitos considerados son: observabilidad, ausencia de medidas y conjuntos críticos para un o más escenarios topológicos y áreas de interés. La evaluación de la consideración de los requisitos de observabilidad es realizada a través de la verificación de la no singularidad de la matriz de Gaño de la Estimación de Estados. Para la evaluación de la ausencia de medidas críticas y conjuntos críticos será considerada la metodología presentada en [Cout01a]. Para cada uno de estos requisitos, la función de aptitud (objetivo) puede ser construida conforme será descrito a continuación.

4.4.1 Observabilidad

Para cada cromosoma (solución propuesta), este requisito es evaluado durante la factorización de la matriz de gaño. Caso sea detectada la no observabilidad del sistema, una penalidad adicional elevada es agregada al costo del sistema de medición propuesto. Con esto el problema pasa a ser formulado como:

$$\text{Min} (C_{\text{med}} + C_{\text{UTR}} + k \times P_{\text{obs}}) \quad (4.3)$$

Donde P_{obs} es una penalidad aplicada a planos de medición no observables, donde $k=1$; para escenarios observables el valor de $k=0$.

4.4.2 Ausencia de Medidas Críticas

La incorporación de este requisito es hecha de la siguiente forma:

$$\text{Min} (C_{\text{med}} + C_{\text{UTR}} + N_{\text{med}} \times P_{\text{med}}) \quad (4.4)$$

Donde la variable P_{med} representa una penalidad asociada a la presencia de medidas críticas y N_{med} representa el número de medidas críticas propuestas en el plano de medición. En caso que se desee considerar el requisito de ausencia de medidas críticas sólo en áreas de interés consideradas prioritarias, el número de medidas críticas N_{med} es dado por:

$$N_{\text{med}} = \sum_{n=1}^{m\text{Crit}} P_{\text{area}}(n) \quad (4.5)$$

Donde $m\text{Crit}$ representa el número de medidas críticas presentes en un plano de medición propuesto; $P_{\text{area}}(n) = 1$, si el área donde está localizada la n -ésima medida fuera prioritaria y en el caso contrario $P_{\text{area}}(n)=0$.

4.4.3 Ausencia de Conjuntos Críticos

La incorporación de este requisito está elaborada de la siguiente manera:

$$\text{Min} (C_{\text{med}} + C_{\text{UTR}} + N_{\text{med}} \times P_{\text{med}} + N_{\text{medconj}} \times P_{\text{conj}}) \quad (4.6)$$

Donde P_{conj} representa la penalidad asociada a la presencia de conjuntos críticos y N_{medconj} representa el número total de medidas pertenecientes a los conjuntos críticos. La flexibilidad de tal requisito en función de la prioridad de diferentes áreas de interés puede ser realizada utilizándose la expresión (4.7):

$$N_{\text{medconj}} = \sum_{n=1}^{c\text{Crit}} P_{\text{area}}(n) \quad (4.7)$$

Donde $c\text{Crit}$ representa el número de medidas pertenecientes a un conjunto crítico presentes en un plano de medición propuesto; siendo $P_{\text{area}}(n) = 1$, si el área

asociada a la n-ésima medida que pertenece al conjunto crítico es prioritaria y en el caso contrario $P_{\text{area}}(n) = 0$.

4.4.4 Comentarios

La ventaja de la utilización de N_{med} en la formulación presentada es que esto permite evaluar adecuadamente las aptitudes de los cromosomas que representan planos de medición donde las medidas críticas están presentes en mayor o menor cantidad. Es importante resaltar que el requisito de ausencia de medidas críticas solo puede ser verificado en sistemas observables. La utilización de $N_{\text{med}_{\text{conj}}}$ es ventajosa en relación al simple conteo del número de conjuntos críticos, pues estos pueden presentar diferentes tamaños. De la misma forma, la simple indicación de la existencia o no de conjuntos críticos no sería adecuada.

Las penalidades P_{med} y P_{conj} tienen la función de forzar la consideración al requisito de ausencia de medidas y conjuntos críticos. Un valor muy elevado para esta penalidad implica en un valor también muy elevado para la función de costo a ser minimizado en las ecuaciones (4.4) y (4.5). En este caso, la minimización de la función de costo se dará con la eliminación de las medidas y conjuntos críticos, y consecuentemente, con mayor redundancia y mayor costo del plano de medición con más UTRs y medidores. Por otro lado, un bajo valor para la penalidad P_{med} y P_{conj} no puede garantizar la obtención de un plano de medición sin medidas y conjuntos críticos, con menor costo de inversión en UTRs y medidores. En el límite, con $P_{\text{med}}=0$ y $P_{\text{conj}} = 0$, existe apenas la preocupación de observabilidad de la red. En este caso la solución óptima resultante indica la cantidad mínima de UTRs y medidores (con las respectivas localizaciones) que garanticen la observabilidad, con todas las medidas siendo críticas e imprescindibles.

Es posible intuir de la descripción sobre la penalidad P_{med} que ésta puede ser utilizada para flexibilizar la consideración a los requisitos de desempeño. La atribución de diferentes valores para P_{med} lleva a diferentes relaciones de compromiso entre el costo del plano de medición (cantidad de UTRs y medidores) y la consideración de los requisitos de desempeño. Esto es particularmente importante cuando existen

restricciones de inversión, debiéndose proyectar el plano de medición mas adecuado con los recursos disponibles.

4.5 Consideración de Múltiples Escenarios Topológicos de Interés

En los sistemas de potencia, ocurren muchas alteraciones durante su operación; por lo tanto, es interesante que la definición de los requisitos de desempeño sea hecho no sólo para un único escenario topológico de la red sino, para un conjunto de escenarios topológicos de interés. En este trabajo se formuló la atención de los requisitos de redundancia para diferentes configuraciones de la red como:

4.5.1 Observabilidad

Considerando la existencia de otros escenarios topológicos, el problema (4.3) pasa a ser formulado como:

$$\text{Min } [C_{\text{med}} + C_{\text{UTR}} + \sum_{i=1}^{NC} (k_i \times P_{\text{obs}}(i))] \quad (4.8)$$

Donde NC es el número total de escenarios topológicos de interés, P_{obs} una penalidad aplicada a la observabilidad de planos de medición, considerándose si $k_i = 1$, si el i-ésimo escenario no fuera observable y $k_j = 0$, caso contrario.

4.5.2 Ausencia de Medidas Críticas

Considerando la existencia de otros escenarios topológicos, el problema (4.4) para a ser formulado como:

$$\text{Min } [C_{\text{med}} + C_{\text{UTR}} + \sum_{i=1}^{NC} (N_{\text{med}}(i) \times P_{\text{med}}(i))] \quad (4.9)$$

Donde la variable $P_{\text{med}}(i)$ representa una penalidad asociada a la presencia de medidas críticas y $N_{\text{med}}(i)$ representa el número de medidas críticas presentes en el plano de medición propuesto cuando el sistema opera en el i-ésimo escenario topológico. Si la prioridad para la supervisión de diferentes áreas de interés también es considerada, la expresión (4.5) es empleada para cada escenario topológico como:

$$N_{med}(i) = \sum_{n=1}^{m_{Crit}(i)} P_{area}(n) \quad (4.10)$$

Donde $m_{Crit}(i)$ representa el número de medidas críticas identificadas en el i -ésimo escenario topológico.

4.5.3 Ausencia de medidas en Conjuntos Críticos

Considerando la existencia de otros escenarios topológicos, el problema (4.6) para a ser formulado como:

$$\text{Min} [C_{med} + C_{UTR} + \sum_{i=1}^{NG} [(N_{med}(i) \times P_{med}(i)) + (N_{med_{conj}}(i) \times P_{conj}(i))]] \quad (4.11)$$

Donde $P_{conj}(i)$ representa la penalidad asociada la presencia de conjuntos críticos y $N_{med_{conj}}(i)$ representa el número total de medidas pertenecientes a los conjuntos críticos propuestos, cuando se opera en el i -ésimo escenario. La prioridad para la supervisión de diferentes áreas de interés puede ser considerada por:

$$N_{med_{conj}}(i) = \sum_{n=1}^{c_{Crit}(i)} P_{area}(n) \quad (4.12)$$

Donde $c_{Crit}(i)$ representa el número de medidas pertenecientes a los conjuntos críticos presentes en el i -ésimo escenario topológico.

La expresiones (4.8), (4.9) y (4.11) son generalizaciones de las expresiones (4.3), (4.4) y (4.6), cuando es considerado más de un escenario topológico de interés.

Es importante observar nuevamente que, cuanto mayor el número de escenarios topológicos a atender, mayor tiende a ser la redundancia del plano de medición y los costos de inversión asociados.

4.6 Definición de la función de Aptitud.

La Función de Aptitud (FA) puede ser formulada como:

$$FA = [C_{med} + C_{UTR} + \sum_{i=1}^{NG} [(k_i \times P_{obs}(i)) + (N_{med}(i) \times P_{med}(i)) + (N_{med_{conj}}(i) \times P_{conj}(i))]] \quad (4.13)$$

La FA presentada en (4.13) está definida de forma general y permite atender cualquiera de los requisitos de desempeño (observabilidad, ausencia de medidas críticas o de conjuntos críticos), permitiendo también considerar las prioridades para la supervisión de diferentes áreas de interés. Se considera también en este trabajo la importancia de la evaluación de los requisitos de ausencia de medidas críticas y de conjuntos críticos de acuerdo con los parámetros asignados en las áreas de interés definidas en el sistema, así también como la atención de tales requisitos de manera acumulativa para cada escenario topológico.

En este trabajo, en lo que respecta a la atención de los requisitos de desempeño, la ausencia de medidas críticas presupone la atención al requisito de observabilidad, así como la atención del requisito de ausencia de conjuntos críticos presupone la atención de los demás requisitos.

Se puede forzar también que, en cada escenario de interés, un requisito especificado sea atendido. Por ejemplo, haciendo que $P_{conj}(i)$ y $P_{med}(i)$ iguales a cero, se realiza la búsqueda de observabilidad de la red en el i -ésimo escenario. Esta característica resalta la flexibilidad de la metodología empleada, la cual puede ser aprovechada para flexibilizar la atención de los requisitos de desempeño en los diferentes escenarios topológicos de interés. De esta manera, es posible reducir los costos de inversión, atendiendo apenas parcialmente los requisitos de desempeño. La metodología propuesta permite que esto sea hecho de forma controlada, utilizando la experiencia y conocimiento sobre el sistema o de acuerdo con las políticas gerenciales. Las siguientes observaciones pueden ser hechas sobre el control de las relaciones de costos de inversión *versus* la calidad de la supervisión a través del ajuste de las penalidades $P_{obs}(i)$, $P_{med}(i)$ y $P_{conj}(i)$:

- a) Reduciéndose los valores de las penalidades $P_{med}(i)$ y $P_{conj}(i)$ asociadas a algún escenario, se reduce la redundancia del proyecto y, consecuentemente, el costo de inversión en UTRs y equipos de medición será menor. Por eso se debe tener en mente que las medidas y conjuntos críticos pueden ocurrir en tales escenarios, pudiendo llevar al sistema a ser no observable en el caso de la pérdida de una de ellas (medidas críticas).

- b) La reducción de los valores de las penalidades $P_{obs}(i)$ para algunos escenarios flexibiliza la atención del requisito de observabilidad para tales escenarios, también requieren una menor redundancia del plano de medición base y consecuentemente, menos costo de inversión en UTRs y medidores.

La observación (a) se refiere a la flexibilización de la atención a los requisitos de ausencia de medidas y conjuntos críticos en algunos escenarios, significando que en tales escenarios alguna medida y conjunto crítico pueden estar presentes. Esto es considerado automáticamente por la metodología propuesta, a través de la distribución óptima de UTRs y medidores en la red, buscando siempre atender el requisito de ausencia de medidas y conjuntos críticos en los escenarios donde tal requisito no fue flexibilizado, siempre a un costo mínimo. Lo mismo ocurre en la desconsideración del escenario en (b), teniendo una reducción aun mayor de la cantidad de UTRs y medidores necesarios. Por eso se debe tener en mente que se puede estar dejando de lado la supervisión de la red en algunos escenarios.

Idealmente, se debe obtener un plano de medición base que atienda a los requisitos de desempeño en todos los escenarios de interés. Por esta razón, el costo asociado a este plano de medición puede estar mas allá del costo deseado por una empresa. La reducción del costo hasta los límites aceptables se da a través de la flexibilización de la atención a los requisitos de desempeño, la cual puede seguir diferentes estrategias. Se puede por ejemplo, priorizar la completa atención a los requisitos asociados a situaciones de operación donde son necesarias rápidas tomas de decisión y acciones de control, siendo por lo tanto de fundamental importancia, garantizar la supervisión de la red. Por otro lado se puede flexibilizar la atención a los requisitos en situaciones de operación menos severas, donde la falta de supervisión de la red como un todo no perjudica la toma de decisiones operativas. La importancia relativa de los diferentes escenarios topológicos está definida con base en la experiencia y conocimiento sobre la operación del sistema.

Otra estrategia para la flexibilización de la atención a los requisitos de desempeño para la supervisión puede ser la de establecer la prioridad de supervisión en función a la probabilidad de ocurrencia de cada escenario topológico. Un criterio que lleva en consideración conjuntamente con la probabilidad de ocurrencia de un escenario

y la necesidad de su supervisión, también puede ser utilizado para la identificación de los escenarios en los cuales la supervisión debe ser flexibilizada.

Teniendo en cuenta lo descrito anteriormente, es importante resaltar que la identificación de los escenarios donde se puede flexibilizar la supervisión de la red, pasa por una decisión empresarial, debiendo tal flexibilización ocurrir apenas cuando existe la necesidad de adecuar los costos de proyecto a un limite pre-establecido para la inversión.

4.7 Codificación de la solución

La solución desarrollada está basada en el uso de AGs. En el problema de instalación óptima de medidores, cada cromosoma representa un plano del sistema de medición, es decir, un conjunto de medidores propuestos como solución para el problema. Luego, cada plan de medición propuesto (cromosoma) es representado a través de un vector, donde cada posición está asociada a un tipo de medidor y su respectiva localización en la red. La dimensión del vector del cromosoma corresponde al número máximo de medidores que pueden ser instalados. Los elementos del vector del cromosoma contienen valores binarios, asumiendo valor igual a "1", cuando el medidor correspondiente hace parte del plano de medición propuesto, y asumiendo valor igual a "0" caso contrario. Esto puede ser ilustrado en la figura 4.1. El costo asociado a cada plano de medición propuesto es obtenido sumándose los costos individuales de cada medidor presente en el cromosoma y los costos de las UTRs necesarias para la instalación de tales medidores.

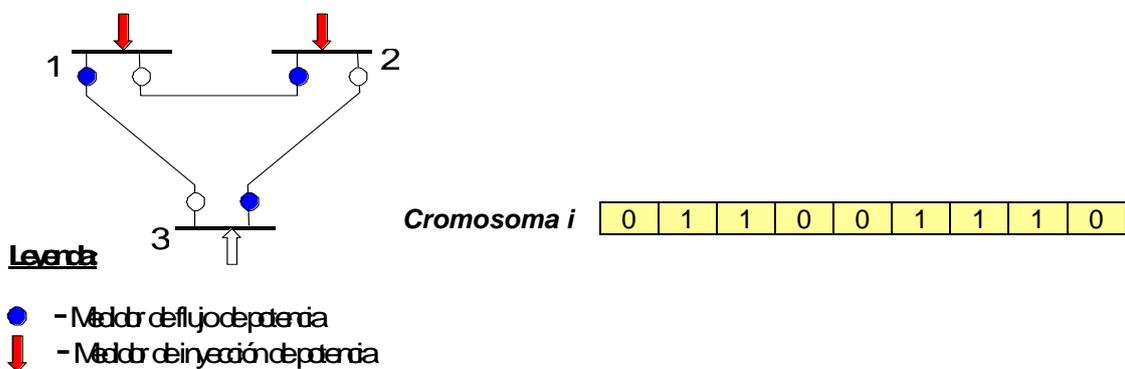


Figura 4.1: Codificación del Problema.

4.9 Diagrama de Casos de Uso

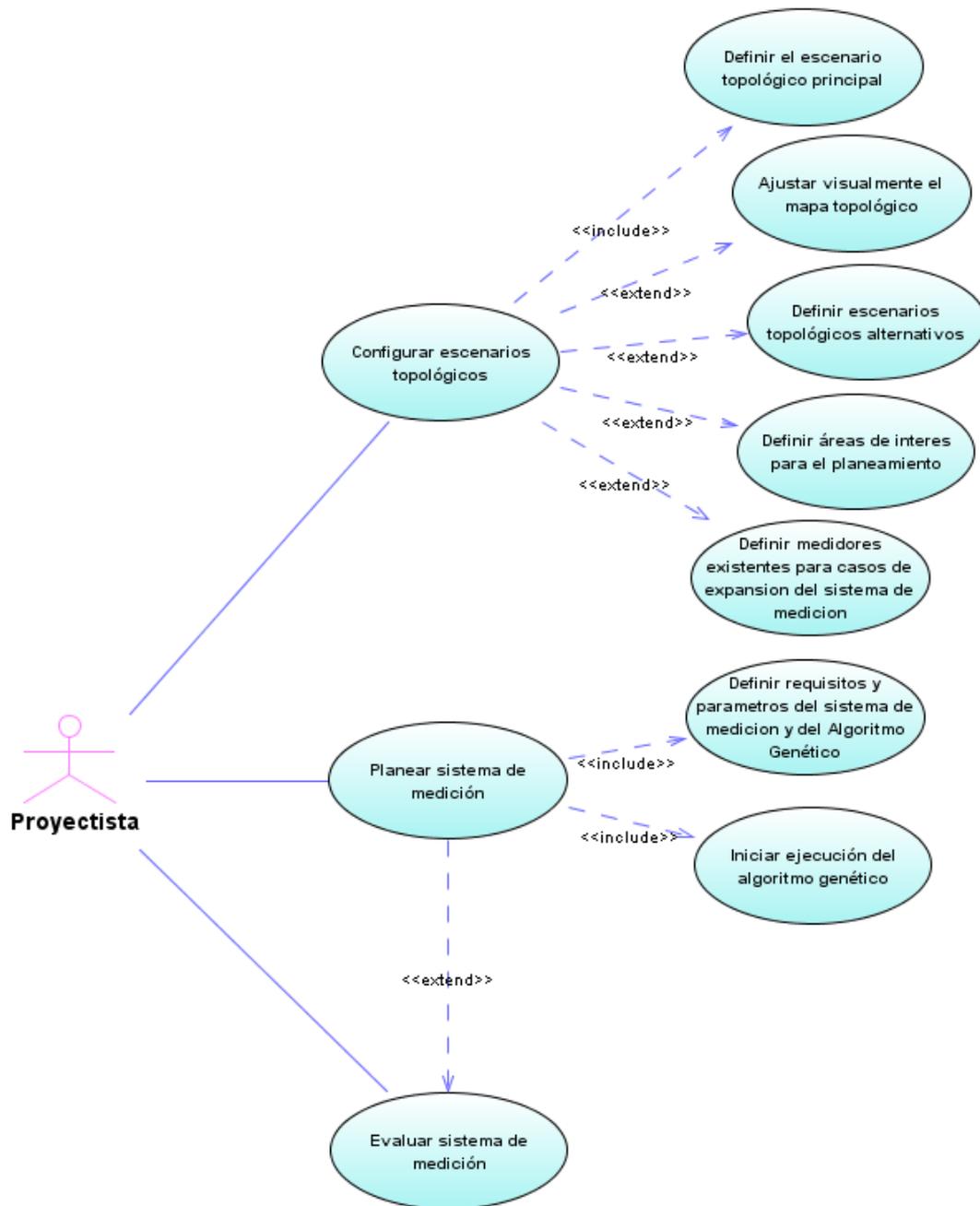


Figura 4.2: Diagrama de casos de uso

4.10 Conclusiones

La instalación de puntos de medición para la supervisión en tiempo real de sistemas de transmisión, fue tratada como un problema de optimización, donde los requisitos considerados para una adecuada supervisión de la red, son atendidos a un mínimo costo. En la metodología propuesta fueron considerados los requisitos de observabilidad de la red y la ausencia de condiciones críticas de observabilidad, representada por la ausencia de medidas críticas y conjuntos críticos.

La metodología usada para un planeamiento y evaluación de sistemas de medición es flexible y presenta como principales características:

- Definición de requisitos de desempeño a ser atendidos en cada escenario topológico y/o área de interés.
- Libertad para la definición de los elementos que componen el costo de proyecto, pudiendo incluir los referentes UTRs, medidores, instalación, sistema de adquisición de datos, áreas de interés prioritarias, etc.
- Utilización de parámetros (penalizaciones) que permitan controlar el proceso de búsqueda del resultado en el AG, siempre tratando de obtener una solución que refleje una adecuada relación de costo/beneficio.
- No necesita de un Estimador de Estado para la evaluación de las soluciones propuestas, una vez que es tratada la instalación de puntos de medición como un problema de naturaleza simplemente estructural.

De acuerdo con la metodología propuesta, se desarrolló un sistema informático, capaz de contemplar todos los requisitos mencionados anteriormente. En los próximos capítulos se describe las principales funcionalidades de este sistema informático para el planeamiento de sistemas de medición para EE.

CAPITULO 5

IMPLEMENTACIÓN DEL SISTEMA INFORMÁTICO VISUAL PLANMED

Para planear y evaluar sistemas de medición, en el presente trabajo se desarrolló un sistema informático llamado Visual PlanMed utilizando algunas características metodológicas del sistema, en Fortran DOS, elaborado en la investigación realizada en [Souz05]. Este nuevo sistema además mejora la formulación matemática, posee interfaces amigables, con funcionalidades gráficas y entornos visuales para el ingreso de datos, posibilitando definir, planear y evaluar planos de medición a mínimo costo de acuerdo al nivel de redundancia requerido por el usuario.

5.1 Antecedentes

El sistema realizado en [Souz05], fue desarrollado utilizando Fortran y posee una interfase en DOS para su funcionamiento. El sistema utiliza datos de sus parámetros y topologías definidos en archivos planos (archivos de tipo txt), que se cargan en el sistema al momento de su compilación. Por esta razón cuando al realizarse modificaciones en los valores del problema, era preciso realizar una nueva recompilación de todo el código fuente, figura 5.1.

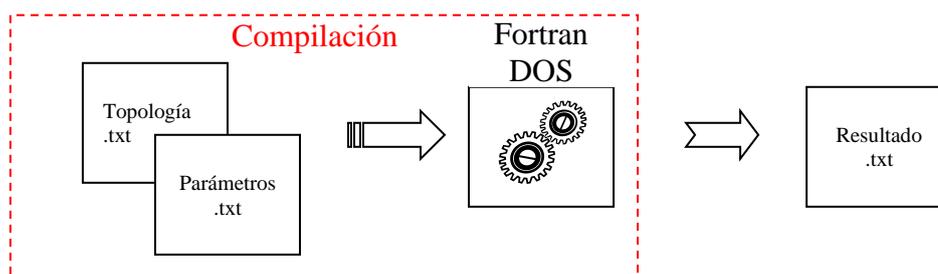
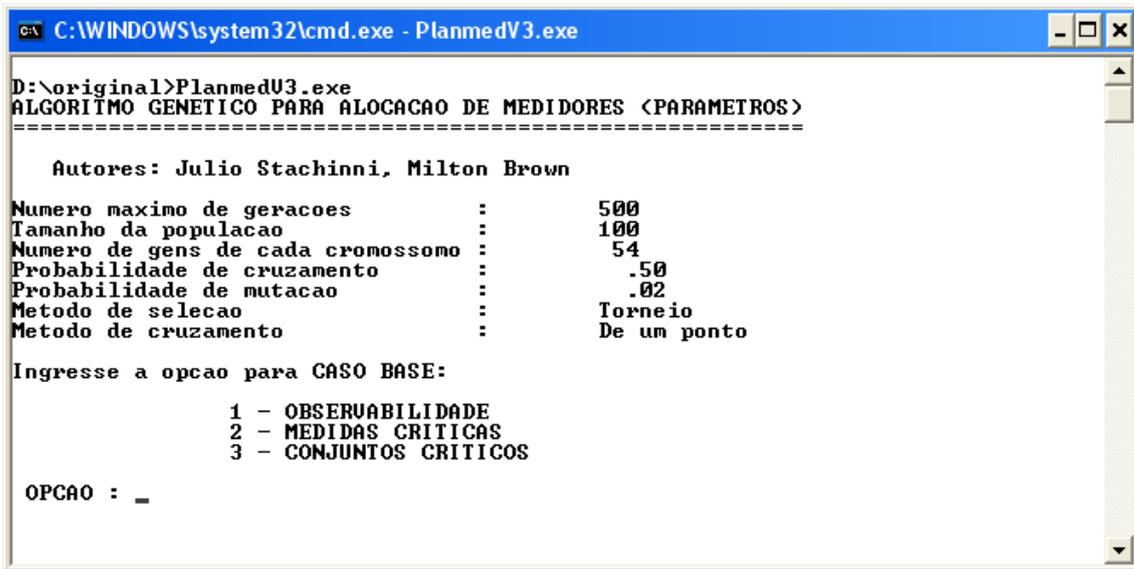


Figura 5.1: Funcionamiento del sistema original.

Para iniciar tal sistema era necesario digitar opciones representadas con valores numéricos, donde solo era posible especificar opciones para el tipo planeamiento a ser realizado, figura 5.2.



```
C:\WINDOWS\system32\cmd.exe - PlanmedV3.exe
D:\original>PlanmedV3.exe
ALGORITMO GENETICO PARA ALOCACAO DE MEDIDORES <PARAMETROS>
=====
Autores: Julio Stachinni, Milton Brown
Numero maximo de geracoes      :      500
Tamanho da populacao           :      100
Numero de gens de cada cromossomo :      54
Probabilidade de cruzamento    :      .50
Probabilidade de mutacao       :      .02
Metodo de selecao              :      Torneio
Metodo de cruzamento          :      De um ponto

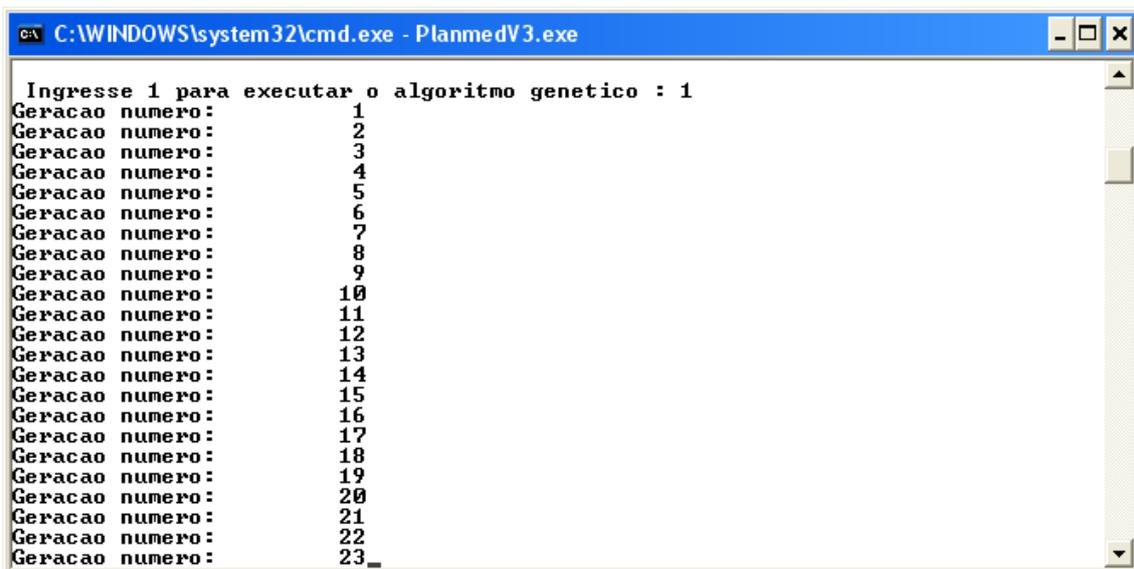
Ingresse a opcao para CASO BASE:

          1 - OBSERVABILIDADE
          2 - MEDIDAS CRITICAS
          3 - CONJUNTOS CRITICOS

OPCAO : _
```

Figura 5.2: Menú inicial de opciones del sistema original

Durante la ejecución de este sistema no era posible disponer de ninguna información asociada al resultado del problema, siendo únicamente mostrado el incremento del número de generaciones que estaba siendo ejecutado en el Algoritmo Genético, figura 5.3.



```
C:\WINDOWS\system32\cmd.exe - PlanmedV3.exe
Ingresse 1 para executar o algoritmo genetico : 1
Geracao numero:      1
Geracao numero:      2
Geracao numero:      3
Geracao numero:      4
Geracao numero:      5
Geracao numero:      6
Geracao numero:      7
Geracao numero:      8
Geracao numero:      9
Geracao numero:     10
Geracao numero:     11
Geracao numero:     12
Geracao numero:     13
Geracao numero:     14
Geracao numero:     15
Geracao numero:     16
Geracao numero:     17
Geracao numero:     18
Geracao numero:     19
Geracao numero:     20
Geracao numero:     21
Geracao numero:     22
Geracao numero:     23_
```

Figura 5.3: Ventana de ejecución del sistema original

5.2 Sistema Informático Visual PLANMED

El sistema Visual PLANMED se desarrollo utilizando dos lenguajes de programación, el primero es FOTRAN 90, que debido a sus características de operabilidad en aplicaciones científicas y matemáticas, facilita la ejecución de ecuaciones complejas matriciales con un alto nivel de precisión decimal requerido para este problema. El segundo lenguaje de programación fue VISUAL BASIC 6, que gracias a sus características de programación visual permitió la construcción de un sistema visual con herramientas gráficas que facilitan el uso de cualquier sistema informático. El sistema está diseñado para trabajar en sistemas operativos Microsoft, desde la versión del Windows 98 hasta Windows XP Professional, en el cual fue probado.

Para su funcionamiento, el sistema Visual PLANMED utiliza el modulo de planeamiento desarrollado en Fortran integrado como un componente del sistema visual que es encargado únicamente de la lectura de datos y parámetros del problema (sin requerir de una re-compilación del código fuente), así como la ejecución y evaluación del modelo matemático.

5.3 Especificación Funcional

Para el inicio del sistema, basta seleccionar el ícono mostrado en la figura 5.5.



Figura 5.5: Icono de acceso al sistema Visual PLANMED.

Con esta opción, se da inicio del sistema teniendo dos opciones: definición de un nuevo sistema o, la carga de un sistema existente, figura 5.6.



Figura 5.6. Opciones iniciales del sistema Visual PLANMED.

Cuando es seleccionada la opción “Nuevo Sistema”, será necesario definir el (los) escenarios topológico(s), configuraciones y parámetros del nuevo sistema. Con la opción de “Abrir Sistema Existente”, se podrá escoger un sistema que ya fue creado y guardado anteriormente. Este sistema podrá ser cargado a partir de un archivo con extensión “.top” localizado en una carpeta con el mismo nombre en disco duro. Este archivo será creado automáticamente cuando se crea un nuevo sistema.

Después de la selección de cualquiera de estas opciones el sistema mostrará el menú principal, figura 5.7.

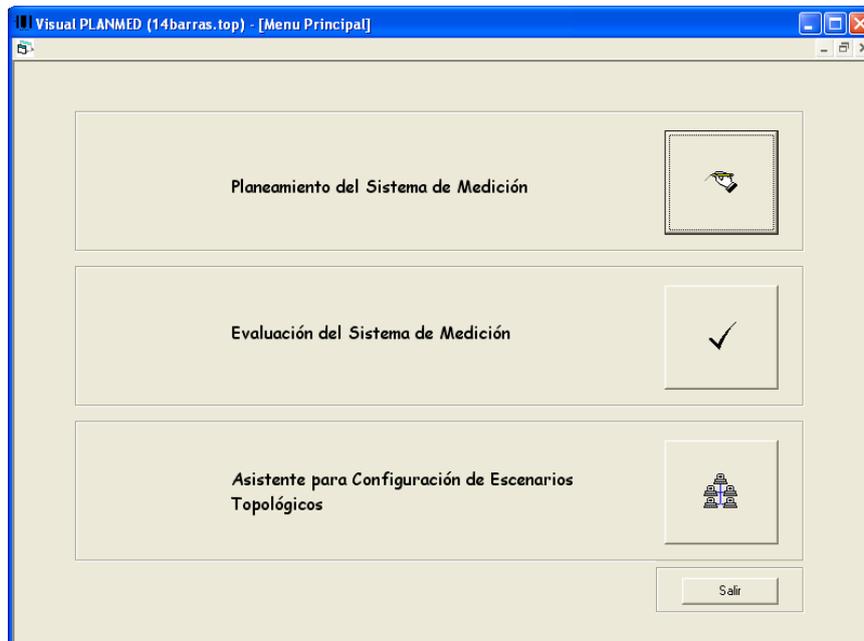


Figura 5.7: Opciones del menú principal del sistema Visual PLANMED

Con las opciones mostradas en la figura 5.7 es posible: definir o modificar el escenario topológico principal; iniciar el proceso de planeamiento; o evaluar cualquier sistema de medición.

A continuación se describen las principales funcionalidades para la definición, planeamiento y evaluación de un sistema de medición, utilizando el sistema informático Visual PLANMED.

5.3.1 Asistente para Configuración de Escenarios Topológicos

Antes de escoger la opción de planeamiento o evaluación es necesario primeramente definir un escenario topológico para el sistema, en el que haya sido cargado un sistema ya existente. Para esto, en el menú principal existe la opción de “Asistente para configuración de escenarios topológicos”, figura 5.8.



Figura 5.8 Opción “Asistente para configuración de escenarios topológicos”.

Con la opción mencionada, el sistema iniciará un asistente que guiará al usuario en cada etapa para la creación del escenario topológico a ser planeado o evaluado. Este asistente consiste en seis etapas que definirán las características detalladas del escenario, éstas son:

- Definición del Escenario Principal.
- Organización del Mapa Topológico
- Escenarios Topológicos Alternativos
- Áreas de Interés
- Medidores Existentes
- Resumen del sistema

5.3.1.1 Definición del Escenario Principal.

La primera etapa del asistente consiste en la definición del escenario principal del sistema. La primera característica del escenario principal es que éste posee todas las posibles configuraciones del sistema caso se requieran definir posteriormente otras topologías alternativas. En la primera ventana exhibida existen opciones para la definición de barras y líneas del escenario topológico principal, figura 5.9.

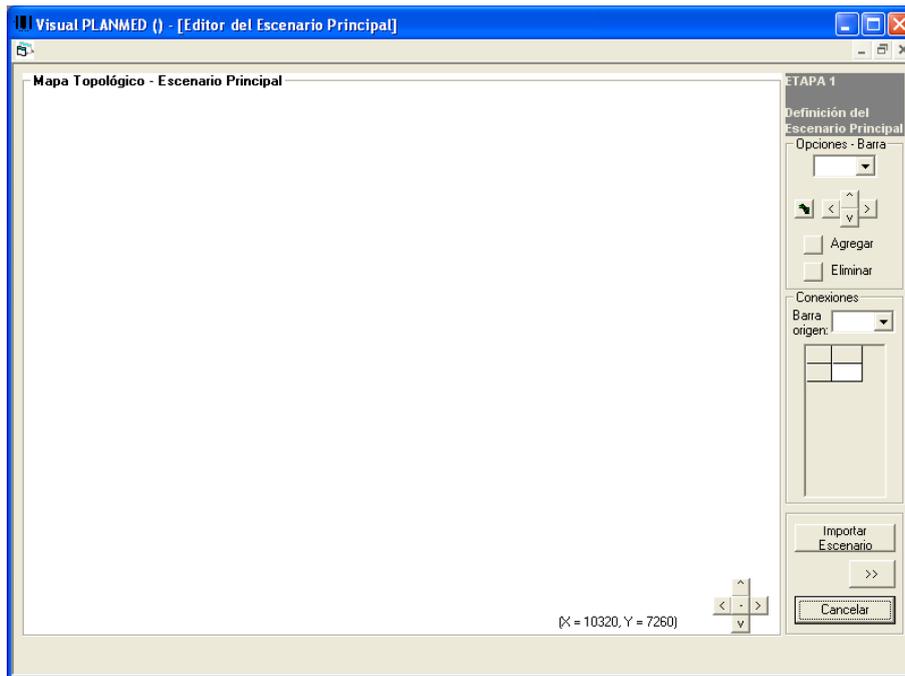


Figura 5.9 Ventana para la definición del Escenario Principal

Para definir un nuevo escenario es necesario primero localizar la posición geográfica de las barras en el mapa topológico. Para poder incluir una nueva barra se debe activar el botón “**Adicionar**”, que puede ser seleccionado en las “opciones-barra” figura 5.10.



Figura 5.10: Opción para agregación de barras en el mapa topológico.

Cuando la opción esté activada, solamente se puede adicionar nuevas barras; éstas al ser adicionadas serán ordenadas numéricamente en orden creciente, de acuerdo al orden de inserción. Para adicionar una barra, basta posicionar el puntero del Mouse sobre el mapa topológico en las coordenadas X, Y deseadas y presionar el botón izquierdo del Mouse. Es también posible eliminar las barrar adicionadas con la opción “**Eliminar**”.

Después definir la localización de las barras en el mapa topológico, es necesario definir sus conexiones, es decir, definir cuáles serán las líneas de transmisión que las interconectan. En el lado derecho de la ventana se encuentra la tabla de barras disponibles para las conexiones.

Para crear una línea de transmisión en el mapa topológico, primero es necesario seleccionar la “barra de origen” de la línea de transmisión y después seleccionar la barra de destino en la tabla de barras disponibles localizada en la parte inferior. Las conexiones adicionadas serán mostradas de color rojo, tanto en la tabla de las conexiones como en el mapa topológico, figura 5.11.

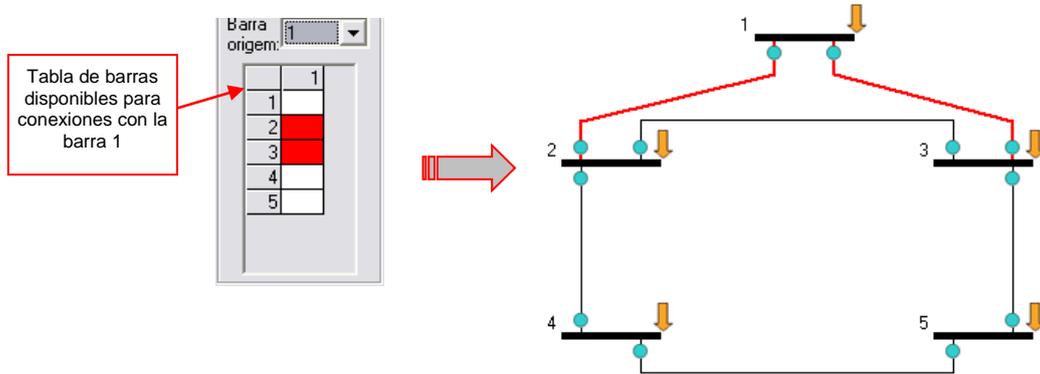


Figura 5.11: Ejemplo de conexión de la barra 1 con las barras 2 y 3.

Para cada línea de transmisión, el sistema internamente crea dos conexiones, cada una con un medidor de flujo referenciado a su barra de origen. Estas dos conexiones se refieren a una misma línea de transmisión que se ven sobrepuestas en la figura del mapa topológico. Este artificio posibilita al sistema de planeamiento, decidir la mejor instalación del medidor de flujo en cualquier de los dos extremos de la línea adicionada (barra de origen y barra destino), figura 5.12. Para una mejor comprensión,

cada uno de los extremos de una línea de transmisión está representado como un gen en el cromosoma a ser procesado por el AG.

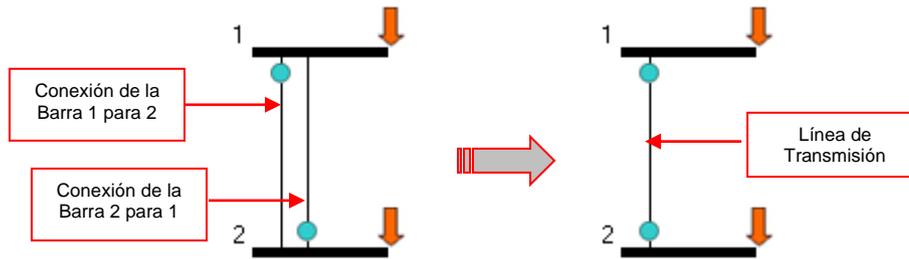


Figura 5.12 Conexiones y medidores que se refieren a una misma línea de transmisión.

En el sistema existen dos tipos de medidores. Para identificar los medidores es necesario primero conocer la representación de los tipos de medidores en el mapa topológico. Estos son: Medidor de Inyección y Medidor de Flujo, figura 5.13.

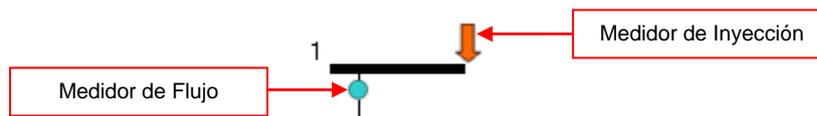


Figura 5.13: Tipos de medidores y sus presentaciones.

En sistemas reales, existen casos de escenarios topológicos con gran número de barras y conexiones. Para facilitar la definición del escenario topológico en sistema, es posible escoger la opción “**Importar Escenario**”. Con esta opción, se puede cargar la configuración de un escenario topológico a través de archivos planos “.txt”, que posee la definición de las conexiones entre las barras y el agrupamiento de las barras en áreas de interés. Figura 5.14,

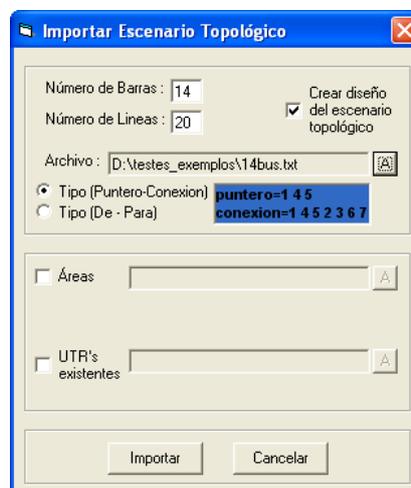


Figura 5.14: Opción para creación de un escenario topológico a través de un archivo txt.

Después de la importación de la configuración del escenario topológico, el sistema automáticamente creará una figura inicial del mapa topológico, que deberá ser organizado para mejorar su visualización.

5.3.1.2 Organización del Mapa Topológico

Una vez definidas las barras y líneas de transmisión en el mapa topológico, el usuario puede ajustarlas de acuerdo con sus necesidades de visualización, figura 5.15.

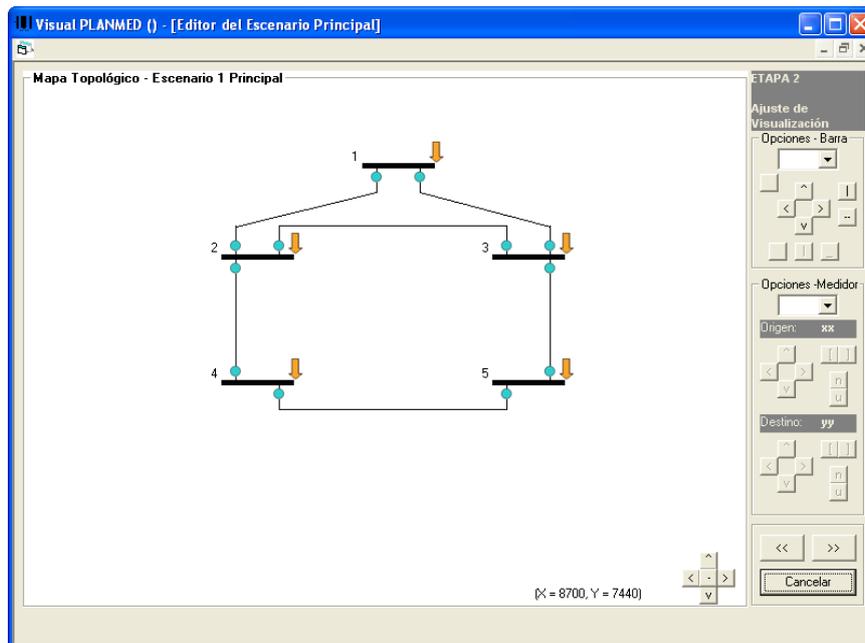


Figura 5.15: Ventana para el ajuste de visualización

En esta ventana el usuario ajusta la posición, orientación y alineamiento de las barras, así como también la posición y orientación de los medidores de flujo de las líneas de transmisión, localizadas en las barras del sistema; esto facilitará una mejor visualización de la topología de la red. Figura 5.16

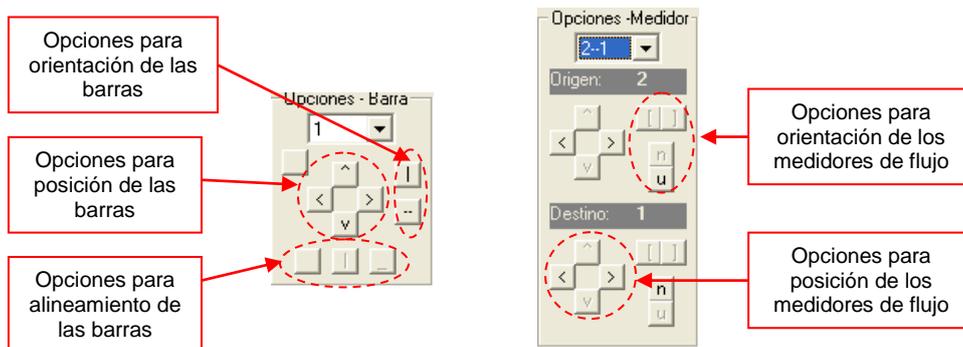


Figura 5.16: Opciones para el ajuste de visualización de la topología de la red.

5.3.1.3 Escenarios Topológicos Alternativos

Una vez que el escenario topológico principal es creado y organizado, la próxima etapa opcional será la creación de escenarios topológicos alternativos. Estos escenarios alternativos representan redes en que por ejemplo, ocurren rupturas de una o más líneas de transmisión. Para estos casos se pueden definir otros escenarios topológicos alternativos, que servirán para que el sistema de planeamiento evalúe una mejor solución considerando estas posibles modificaciones en la red. La ventana para la edición de escenarios topológicos alternativos se observa en la figura 5.17.

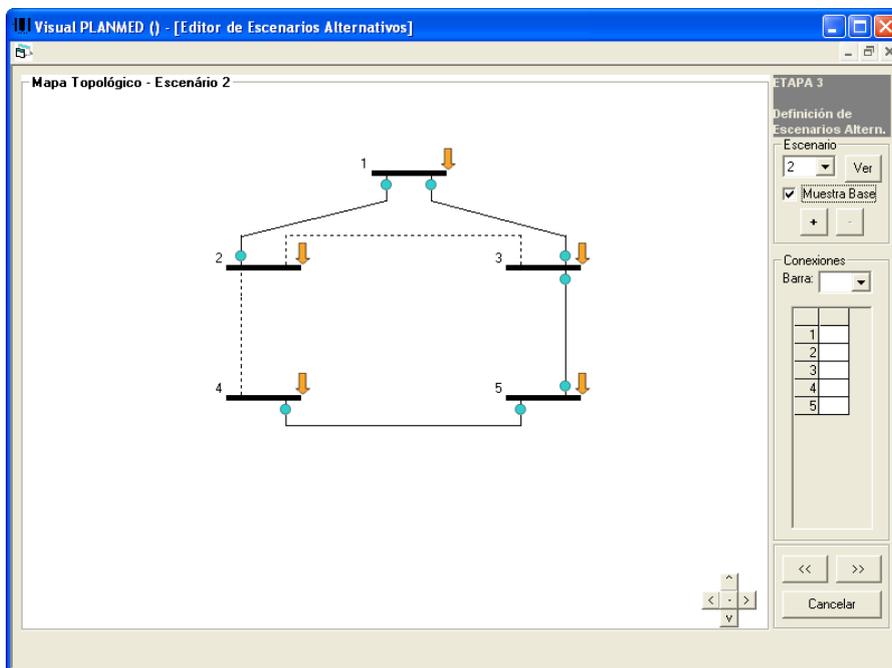


Figura 5.17: Ventana para creación de escenarios topológicos alternativos.

Para crear nuevas configuraciones en la red, basta seleccionar la opción de agregar nuevo escenario, representado con el símbolo “+” y confirmar la creación de ésta, figura 5.18. Con esta opción, el sistema crea un nuevo escenario replicando todas las informaciones de barras y líneas de transmisión del escenario principal y le atribuye un número que varía en orden creciente, como identificador del nuevo escenario topológico.

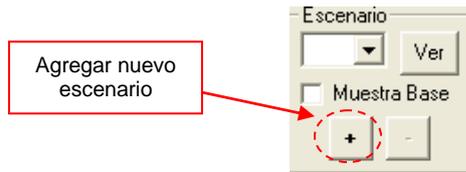


Figura 5.18: Opción para agregar un nuevo escenario topológico.

Una vez creado el nuevo escenario topológico, será necesario definir las diferencias en relación al escenario principal. Al lado derecho de la ventana se encuentra la tabla de conexiones de las barras del sistema mostradas en color rojo. Solamente se podrán seleccionar las líneas que están fuera del servicio de acuerdo con las líneas existentes en el escenario principal. Las líneas fuera de servicio serán identificadas, en la tabla de conexiones, con un color rosado, que las diferencias de las líneas de operaciones representadas en color rojo. figura 5.19

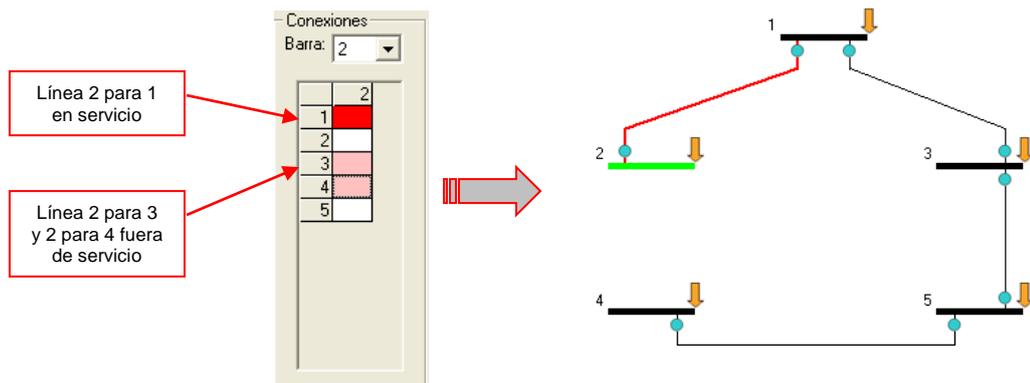


Figura 5.19: Representación de la salida de servicio de líneas de transmisión para un escenario topológico alternativo.

5.3.1.4 Áreas de Interés

En esta cuarta etapa, se podrá agrupar las barras en áreas de acuerdo con los requisitos del planeamiento. Esto quiere decir que será posible definir áreas de interés que podrán ser consideradas prioritarias o no, en el momento de realizar el planeamiento del sistema de medición. La figura 5.20 muestra la ventana para la especificación de áreas de interés.

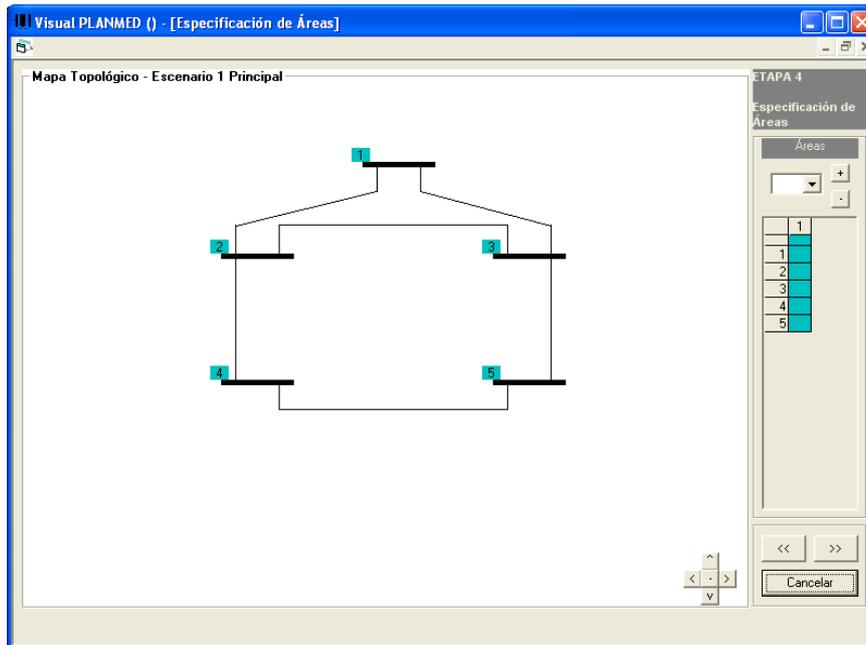


Figura 5.20: Ventana para especificación de áreas de interés.

Inicialmente, cuando se crea un nuevo caso topológico (escenario principal) en la etapa 1, el sistema agrupa automáticamente todas las barras en un área inicial (mostrada de color celeste en la figura 5.20), siendo posible en esta etapa, crear nuevas áreas y agrupar las barras en estas áreas de acuerdo con el interés del planeamiento. Para la ejecución del planeamiento es necesario definir por lo menos un área de interés.

Para definir un área, se debe escoger la opción de crear una nueva área representada con el botón “+”, figura 5.21.

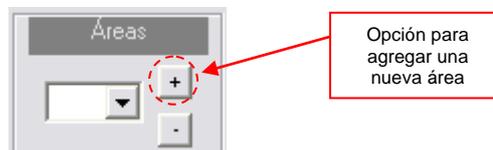


Figura 5.21: Opción para agregar una nueva área.

Cada nueva área tendrá asociada un nuevo color definido automáticamente y deberá estar compuesta mínimo por una barra y como máximo todas las barras del sistema. Para incluir una barra en un área, es necesario primero escoger el área en la opción de selección de áreas y en seguida seleccionar la barra en la tabla que relaciona

la barra con el área seleccionada. Con esto el color de la numeración de cada barra perteneciente a esa área cambiará de color. El hecho de que una barra ya esté incluida en un área, no impide que ella pueda ser designada después para otra área. Será necesario simplemente seguir el procedimiento mencionado anteriormente para incluir tal barra en el área deseada. En el ejemplo, se muestra la asociación de barra en dos áreas de interés. figura 5.22

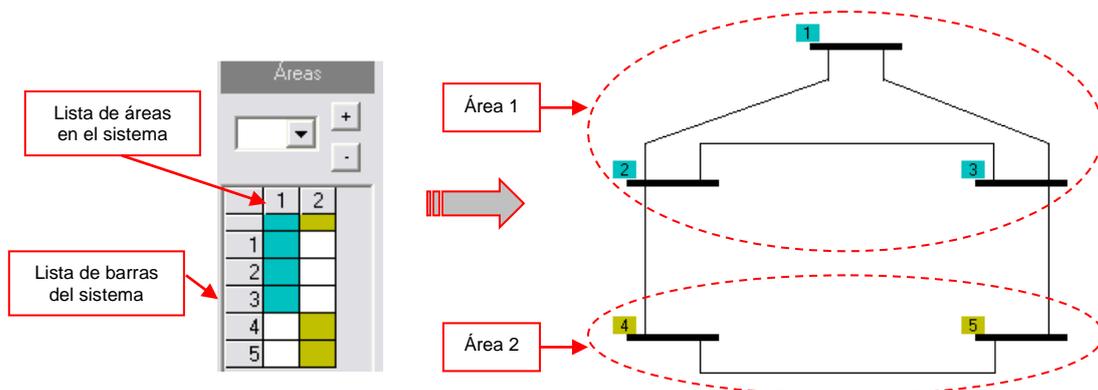


Figura 5.22: Ejemplo de la agrupación de barras en áreas de interés.

5.3.1.5 Medidores Existentes

Esta etapa es opcional, se trata de la identificación de medidores ya existentes en la red, los cuales precisan ser identificados en el mapa topológico para que el sistema no establezca puntos de medición en esos lugares a la hora de la ejecución del planeamiento. Esta consideración es importante en el caso de estudios de planeamiento de expansión de sistemas de medición.

Para identificar medidores existentes, es necesario seleccionar con el Mouse el medidor deseado en el mapa topológico, éste cambiará de color de acuerdo con el tipo de medidor seleccionado: anaranjado para medidores de inyección y celeste para el caso de los medidores de flujo, figura 5.23.

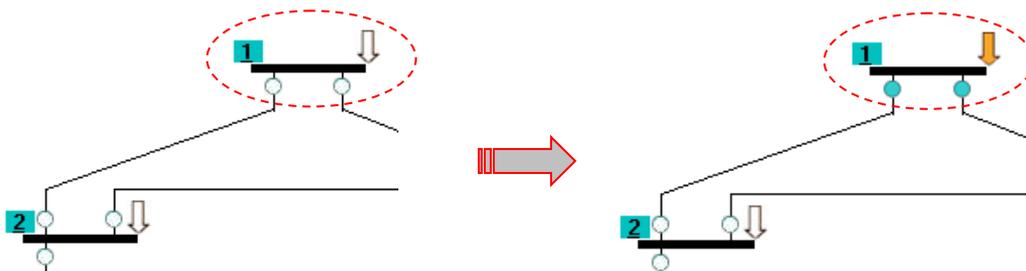


Figura 5.23: Ejemplo de la agrupación de barras en áreas de interés.

5.3.1.6 Resumen del Sistema

La última etapa del asistente consiste en la presentación del resumen del sistema y las características que serán usadas por las herramientas de planeamiento o evaluación de sistemas de medición. Las características mostradas son:

- Número de barras
- Número de líneas de transmisión
- Número de áreas
- Número de UTRs existentes
- Número de escenarios topológicos alternativos

Adicionalmente se mostrará en el mapa topológico el diseño final del sistema para su posterior confirmación, figura 5.24.

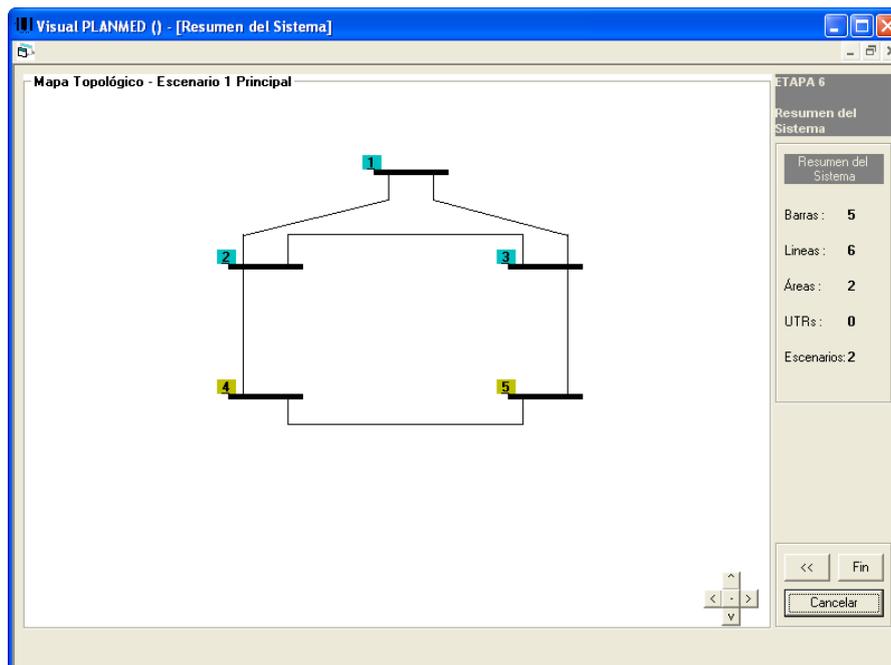


Figura 5.24: Ventana del resumen del sistema.

5.3.2 Planeamiento del Sistema de Medición

Una de las principales opciones del sistema Visual PLANMED, es el planeamiento del sistema de medición utilizando AGs. Con esta opción el usuario podrá fácilmente escoger las características y parámetros de la topología con un amplio nivel de detalles. figura 5.25



Figura 5.25: Opción para iniciar el sistema de planeamiento del sistema de medición.

El sistema Visual PLANMED ofrece diversas opciones para la ejecución del planeamiento, figura 5.26.

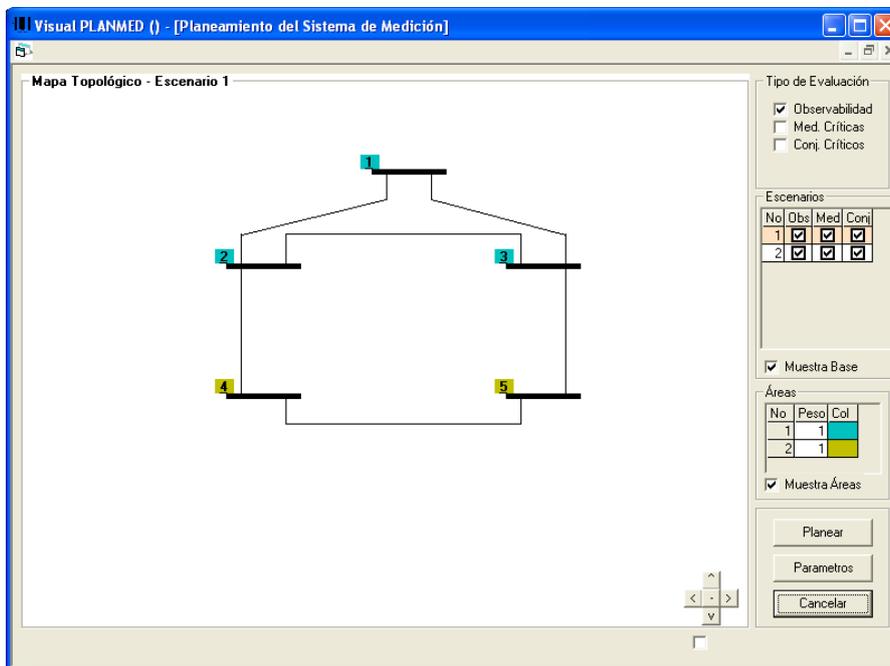
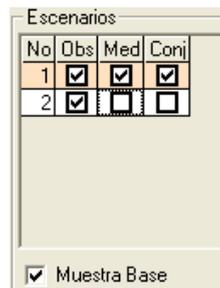


Figura 5.26 Ventana principal de la opción de Planeamiento.

5.3.2.1 Requisitos para la evaluación de cada escenario topológico.

Conforme se puede observar en la figura 5.26, existe una tabla localizada al lado derecho del mapa topológico, que contiene la lista de escenarios topológicos posibles a ser considerados en el planeamiento.

Como fue descrito en descripción del “Asistente” para la Configuración de Escenarios Topológicos”, primeramente fue definido un escenario inicial. Éste es considerado como “Escenario Principal” y se encuentra diferenciado, en la tabla de escenarios con el color rosado, en relación a los otros escenarios topológicos que describen posibles alteraciones de la topología principal. Cada escenario listado en esta tabla, posee opciones para la inclusión de la evaluación de observabilidad (“Obs”), medidas críticas (“Med”) y conjuntos críticos (“Conj”), de cada una de ellas. Con estas opciones, el usuario puede escoger qué tipo de evaluación será hecha para cada escenario (ver figura 5.27).



No	Obs	Med	Conj
1	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>
2	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>

Muestra Base

Figura 5.27: Lista de escenarios topológicos y las opciones disponibles para su evaluación.

Esta lista de escenarios es muy importante para el planeamiento por que en ella están definidas las características para el tipo de planeamiento deseado en cada escenario escogido. Esto hace que el sistema sea flexible para requisitos específicos de planeamiento.

Las principales características para el tipo de planeamiento son las siguientes:

- El usuario puede escoger uno o varios escenarios topológicos que serán o no incluidos en el planeamiento, así como los requisitos que serán atendidos en cada una de ellos. Cuando el usuario quiera incluir en el planeamiento alguno

de los escenarios, simplemente se deberá indicar que tipo de planeamiento será hecho. Para no incluir un escenario en el planeamiento, el usuario no deberá seleccionar ninguna de las opciones de evaluación, con esto el sistema excluye el escenario del planeamiento en el Algoritmo Genético.

- El usuario también podrá o no escoger el “escenario principal” como referencia principal al planeamiento, esto quiere decir que se puede escoger otros escenarios topológicos diferentes del principal para realizarse el planeamiento. Esta opción hace al sistema muy flexible para casos en el cual se desee hacer un planeamiento especializado en cualquier escenario topológico alternativo.
- El usuario podrá visualizar gráficamente un escenario seleccionando el número que lo identifica en la lista de escenarios. Como fue mencionado anteriormente, existe un escenario principal llamado “escenario principal”, siendo los otros escenarios creados a partir del escenario principal y se denominará “escenarios alternativos”. Esto quiere decir que siempre estos tipos de escenarios tendrán un número inferior de líneas de transmisión y que varían en cada escenario topológico de acuerdo con el interés del planeamiento. En algunos casos puede ser interesante saber cuales son las diferencias entre cada uno de estos escenarios alternativos en relación al escenario principal. Para poder visualizar tales diferencias existen una opción “Muestra Base”, que permite al usuario visualizar el “escenario alternativo” seleccionado al mismo tiempo que visualiza el “escenario principal”. En estos casos las líneas de transmisión, que se encuentran en el “escenario principal” y no constan en el “escenario alternativo” seleccionado, muestran con líneas punteadas como puede ser visualizado el ejemplo del escenario topológico número 2, figura 5.28.

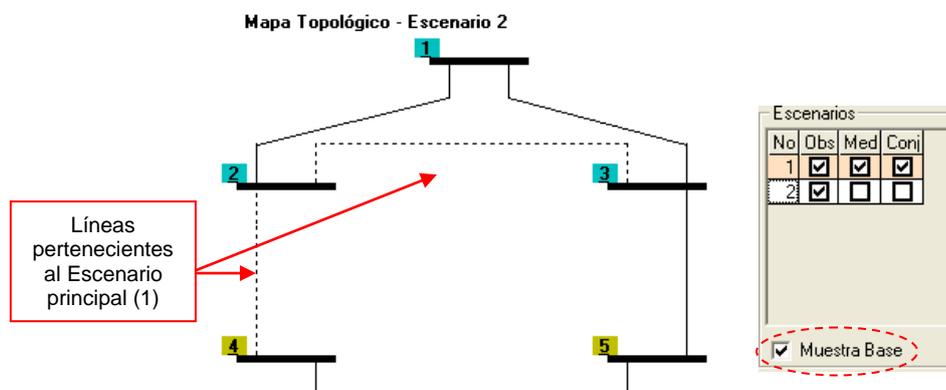


Figura 5.28: Líneas fuera de servicio que diferencian el escenario 1 con el escenario 2.

5.3.2.2 Selección de Áreas de Interés Consideradas Prioritarias.

En la tabla de áreas se encuentra la relación de áreas definidas en la “Etapa 4” del “Asistente para configuración de escenarios topológicos”. Estas áreas están identificadas en el mapa topológico con los colores de la numeración de cada barra, figura 5.29.

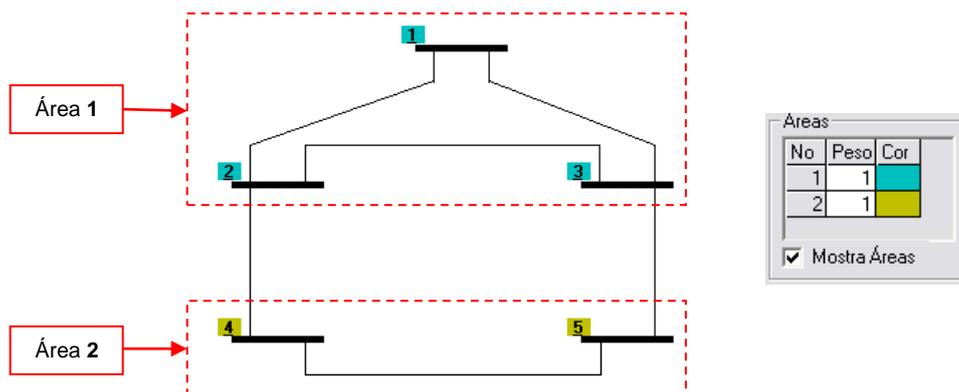


Figura 5.29: Selección de áreas de interés consideradas en el planeamiento.

Como se observa en la figura anterior, las barras 1,2 y 3 pertenecen al área 1 y las barras 4 y 5 pertenecen al área 2. Cada una de estas áreas definidas en el sistema posee un peso de evaluación definido en valores binarios. Estos pesos indican si el área donde el medidor fue seleccionado es prioritaria (1) o no prioritaria (0) en el planeamiento. Para facilitar la visualización del escenario topológico el usuario podrá habilitar o no el indicador de áreas con la opción “Muestra Áreas”.

5.3.2.3 Definición de Parámetros

El próximo paso es la definición de parámetros de planeamiento. Éstos podrán ser definidos tanto para el sistema de planeamiento como para el Algoritmo Genético. Los parámetros podrán ser definidos seleccionando la opción de “Parámetros”, figura 5.30.

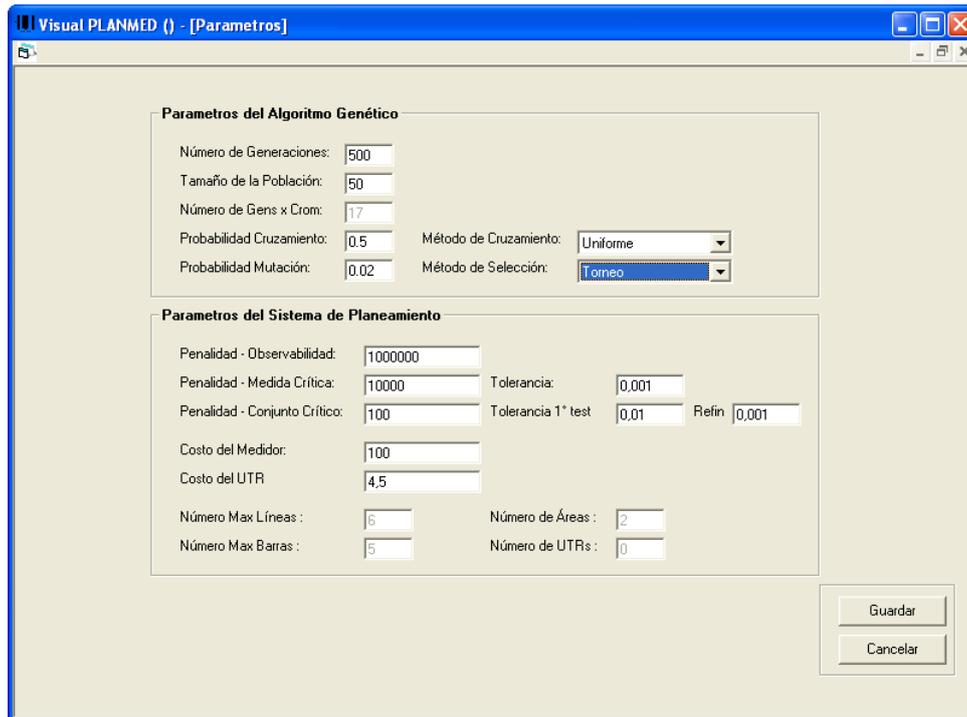


Figura 5.30: Definición de parámetros del AG y del sistema de planeamiento.

Los parámetros mostrados en la figura 5.30 serán descritos a continuación:

- Parámetros del AG
 - Número de generaciones:
 - Define el número total de poblaciones del AG;
 - Tamaño de la población:
 - Define el número de cromosomas de cada población;
 - Número de genes por cada cromosoma:
 - Valor calculado automáticamente en función al número de barras y líneas del escenario topológico, no es posible editarlo en esta ventana;
 - Probabilidad de cruzamiento:
 - Define la probabilidad de cruzamiento de los cromosomas establecidos en valor de tipo porcentual;
 - Método de cruzamiento:
 - Define el método de cruzamiento de los cromosomas, pudiendo ser del tipo “Uniforme” o “De un punto”;

- Probabilidad de mutación:
 - Define la probabilidad de mutación del cromosoma determinado en valor de tipo porcentual.
- Método de selección:
 - Define el método de selección de los cromosomas, pudiendo ser del tipo “Torneo” o “Ruleta”;
- Parámetros del sistema de planeamiento
 - Penalidad de la observabilidad:
 - Penalidad aplicada cuando el sistema de medición propuesto no es observable;
 - Penalidad de la existencia de medidas críticas:
 - Penalidad aplicada en relación al número de medidas críticas existentes en el plano de medición propuesto;
 - Tolerancia de la evaluación de medidas críticas:
 - Valor que define la tolerancia en el proceso de identificación de una medida crítica;
 - Penalidad de la existencia de medidas en conjuntos críticos:
 - Penalidad aplicada en relación al número de medidas en conjuntos críticos existentes en el plano de medición propuesto;
 - Tolerancia del 1 test:
 - Valor que define la tolerancia utilizada para el refinamiento de los conjuntos críticos formados en el 1er test;
 - Tolerancia del refinamiento:
 - Valor que define la tolerancia del 2º test del refinamiento de los conjuntos críticos formados en el 1er test;
 - Costo de medidor:
 - Define el costo proporcional de medidor definido a través de valores ponderados ajustadas mediante pruebas de aceptabilidad;
 - Costo de la Unidad Terminal Remota
 - Define el costo proporcional de la Unidad Terminal Remota definido a través de valores ponderados ajustados mediante pruebas de aceptabilidad;
 - Número máximo de líneas:

- Valor calculado automáticamente en función al número máximo de líneas de todos los escenarios definidos en el sistema en estudio, no siendo posible su modificación en esta ventana;
- Número máximo de barras:
 - Valor calculado automáticamente en función al número máximo de barras de todos los escenarios definidos en el caso de estudio, no siendo posible su modificación en esta ventana.
- Número de áreas:
 - Número de áreas definidas en el sistema en estudio, no siendo posible su modificación en esta ventana;
- Número de UTRs existentes:
 - Número de UTRs existentes definidas en el caso de estudio, no siendo posible su modificación en esta ventana.

5.3.2.4 Selección del Tipo de Evaluación

Para el planeamiento del sistema de medición existen tres opciones principales de evaluación: Evaluación de Observabilidad, Evaluación de Medidas Críticas y Evaluación de Medidas en Conjuntos Críticos, figura 5.31.

Al escoger el “Análisis de Observabilidad” ésta podrá ser ejecutada individualmente. En el caso de la “Evaluación de Medidas Críticas”, es necesario también ejecutar el “Análisis de Observabilidad”. Esta selección será realizado automáticamente por el sistema. En el caso de “Evaluación de Medidas en Conjuntos Críticos” el sistema automáticamente evalúa la “Observabilidad” y la “Evaluación de Medidas Críticas”.

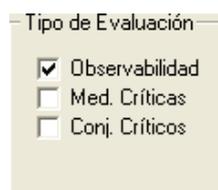


Figura 5.31: Principales opciones para el planeamiento de sistemas de medición.

5.3.2.5 Ejecución del AG

Con la opción “Planear” se presentan las opciones de control de la ejecución del AG para el planeamiento del sistema de medición, figura 5.32.

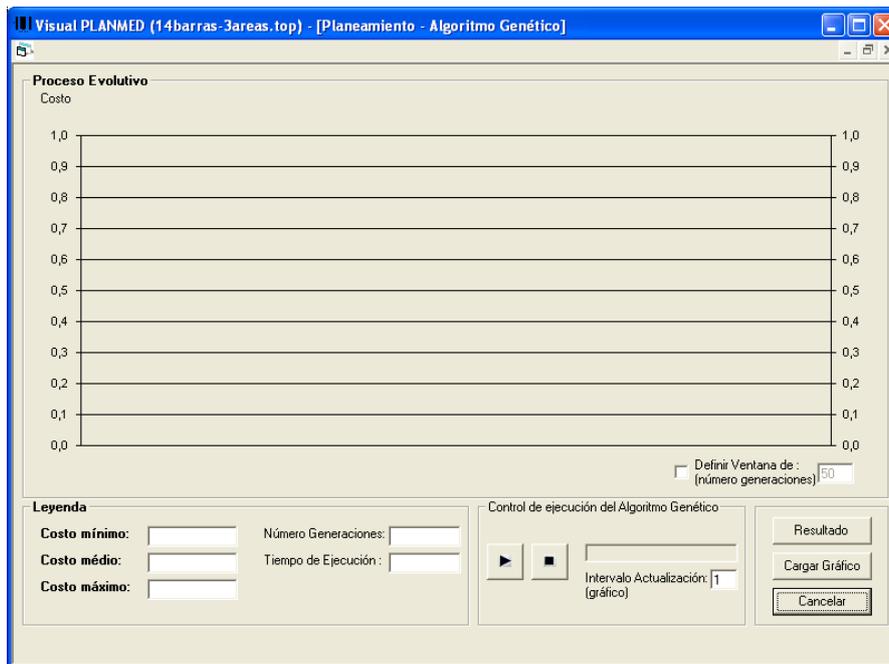


Figura 5.32: Ventana para ejecución del Planeamiento con AGs.

Esta ventana posee tres características importantes que son:

- Control de la ejecución del AG

Para la ejecución del algoritmo genético fueron creados controles que permiten “Iniciar” e “Interrumpir” el proceso de planeamiento, figura 5.33.

Además, se puede visualizar en la “barra de progreso” si el proceso está siendo ejecutado o no. En el control de la ejecución se puede definir el tiempo en segundos del “intervalo de actualización” del gráfico del “Proceso evolutivo”.

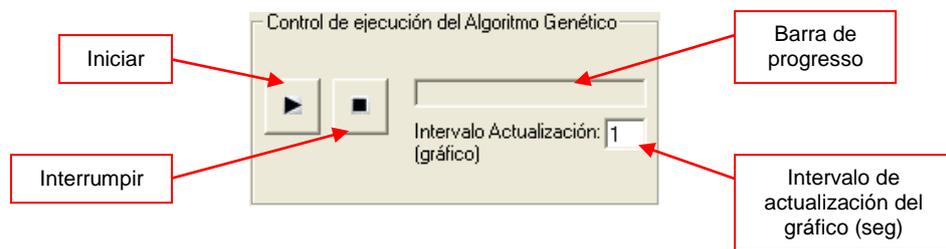


Figura 5.33: Control de la ejecución del Algoritmo Genético

La principal ventaja de los controles de “Inicio” e “Interrupción” del AG es que se puede definir en los parámetros del AG un número grande de generaciones y no será necesario llegar hasta la última generación para poder obtener el resultado óptimo de instalación de medidores. El usuario puede visualizar el “costo” con relación al “número de generaciones” en el “gráfico del proceso evolutivo” y decide cuando interrumpir la ejecución del AG. El proceso puede ser interrumpido cuando el gráfico llega a un mínimo costo estable siempre en las próximas generaciones.

- Proceso evolutivo del AG

Otra de las características más importantes para la ejecución del AG es el gráfico del proceso evolutivo en el cual el usuario podrá visualizar la evolución del costo obtenido en las generaciones del AG. El gráfico muestra informaciones como límites de “costo máximo” y “costo mínimo” hasta entonces obtenidos y la evolución del costo a través de todas las generaciones, figura 5.34.

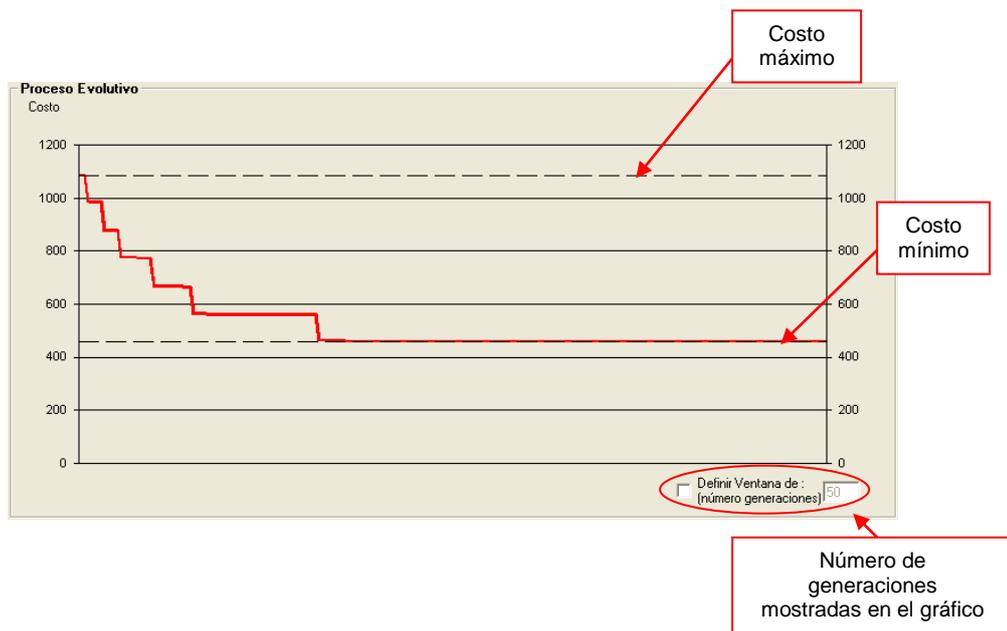


Figura 5.34: Proceso Evolutivo del costo obtenido en el AG en cada generación

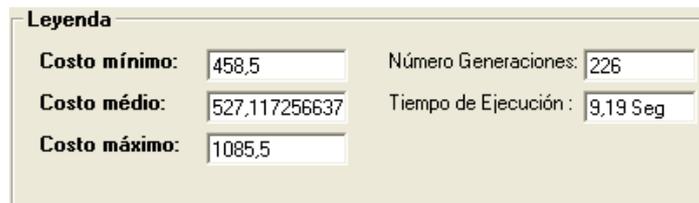
Para mejorar la visualización cuando se trata de un número grande de generaciones, el sistema permite definir un “número de generaciones mostradas en el gráfico”. En este caso, el sistema siempre mostrará las últimas n generaciones definidas en la “ventana de visualización”.

Las principales ventajas del gráfico del proceso evolutivo son:

- Ofrece al usuario la información necesario para que pueda tomar una decisión de cuando finalizar la ejecución del AG;
- Ayuda a definir el número máximo de generaciones necesarias para la ejecución del AG;
- Permitir al usuario visualizar cuáles serían las diferencias en el proceso evolutivo del costo cuando se modifican los parámetros de mutación, cruzamiento y selección del AG, lo que ayudará a definir los parámetros mas adecuados para la ejecución del AG.

- Leyendas y mensajes de término de ejecución.

Otras de las características de la ventana de ejecución del AG son las leyendas; éstas permiten visualizar de manera interactiva los valores referentes al costo, número de generaciones durante la ejecución del AG y el tiempo transcurrido en segundos desde el inicio de ejecución hasta el final del procesamiento figura 5.35.



Leyenda			
Costo mínimo:	458,5	Número Generaciones:	226
Costo medio:	527,117256637	Tiempo de Ejecución:	9,19 Seg
Costo máximo:	1085,5		

Figura 5.35: Control de la ejecución del Algoritmo Genético.

Como resultado final de la ejecución del proceso del AG, se muestra un mensaje indica que el proceso de planeamiento concluyó. En este mensaje indica el tiempo total de la ejecución del AG, así como el costo mínimo obtenido en el planeamiento Además, el usuario podrá escoger si desea o no ver el resultado grafico de la distribución de medidores en el mapa topológico. Figura 5.36



Figura 5.36: Mensaje indicando el término del planeamiento

5.3.2.6 Resultado Gráfico del Sistema de Medición

Como resultado final de la ejecución del planeamiento con el uso de Algoritmos Genéticos se muestra en el escenario topológico definido para el planeamiento, las posiciones de localización de medidores de inyección y de flujo, figura 5.37.

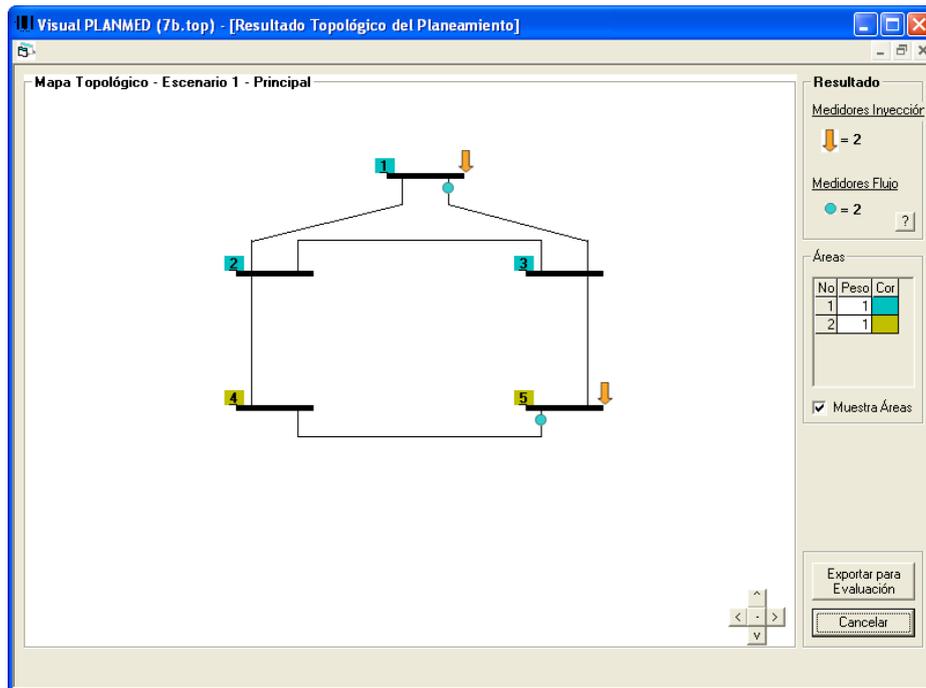


Figura 5.37: Resultado de la ejecución del planeamiento

Al lado derecho del mapa topológico se encuentra el resultado del número de medidores instalados, así como la descripción de las áreas y pesos definidos en el planeamiento.

En muchos casos se desea analizar el impacto de alteraciones en el plano de medición propuesto. Para esto el aplicativo Visual PLANMED incluye una herramienta de análisis que posibilitará al usuario hacer modificaciones del resultado obtenido en el planeamiento, con la finalidad de obtener un sistema de medición alternativo. Para poder utilizar el resultado del planeamiento en la herramienta de evaluación, se podrá escoger la opción de “Exportar para evaluación” localizada en el extremo inferior derecho de la ventana de resultado, figura 5.38.



Figura 5.38: Opción para exportar el resultado del planeamiento para su modificación y evaluación.

5.3.3 Evaluación del Sistema de Medición

Como funcionalidad adicional al planeamiento del sistema de medición, fue desarrollada la opción de “Evaluación del sistema de medición”; que permite evaluar e identificar si un sistema de medición es observable, posee medidas críticas o medidas en conjuntos críticos. Esta opción podrá ser ingresada de dos formas, la primera por el menú principal del sistema, figura 5.39.

En esta opción se pueden evaluar independientemente los diferentes escenarios topológicos definidos en el sistema en estudio. Seleccionando esta primera opción, el usuario deberá escoger el escenario topológico deseado para la evaluación y tendrá que definir manualmente un plano de medición a ser evaluado.



Figura 5.39: Opción para la evaluación de sistemas de medición.

La segunda forma permite el acceso a la opción de evaluación en la ventana de los resultados de la opción de planeamiento, a través de la opción “Exportar para evaluación” como se muestra en la figura 5.38. En este caso, el plano de medición resultante del sistema de planeamiento será exportado para la opción de “Evaluación del Sistema de Medición”. Ésta facilita al usuario, pueda modificar el plano de medición resultante del planeamiento del AG, de acuerdo con sus requerimientos, y evaluar los resultados de estas alteraciones.

Con la opción de evaluación, se puede evaluar planos de medición de acuerdo con la preferencia del usuario. Los parámetros de costo serán definidos de manera común para todos los casos de estudio de planeamiento y evaluación. Estos parámetros se pueden modificar con la opción de parámetros del “Planeamiento de Sistemas de Medición”.

Luego de escoger cualquiera de las dos opciones para “Evaluación del Sistema de Medición”, se mostrará el mapa topológico con la topología principal del sistema definido al inicio. En el lado derecho de la ventana se encuentran las opciones para la evaluación. El usuario puede escoger uno de los diversos escenarios disponibles en el sistema en estudio, figura 5.40

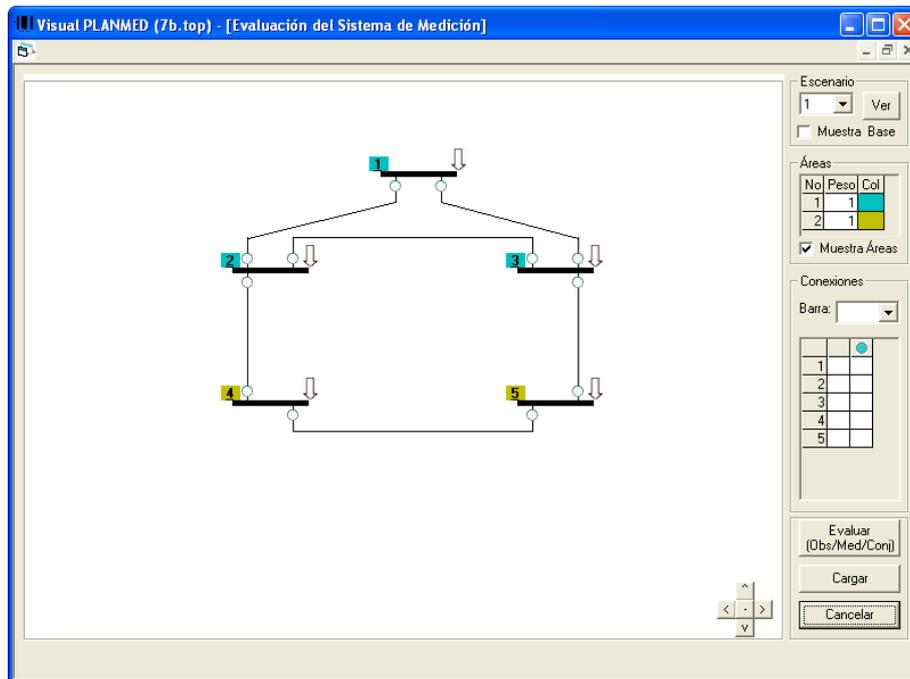


Figura 5.40: Ventana principal de la opción para evaluación de sistemas de medición.

Una de las principales características de la opción de evaluación del sistema de medición, es que el sistema podrá evaluar cualquiera de los diferentes escenarios topológicos definidos en el sistema en estudio. Esto permite la evaluación de escenarios topológicos que no sea el escenario principal, que en muchos casos representan situaciones reales que ocurren cuando existen cambios en el escenario principal a través del tiempo.

A continuación se describen las principales opciones para iniciar el proceso de evaluación.

- Definición del plano topológico de evaluación

Para definir un plano topológico de evaluación es necesario indicar cuales son los medidores de inyección y de flujo existentes en el escenario escogido. Para escoger un medidor se deberá seleccionarlo en el mapa topológico en la tabla de

conexiones. Esto cambiará el color del medidor indicando su presencia en el proceso de evaluación. La figura 5.41 ilustra la selección de medidores que serán considerados en el proceso de evaluación.

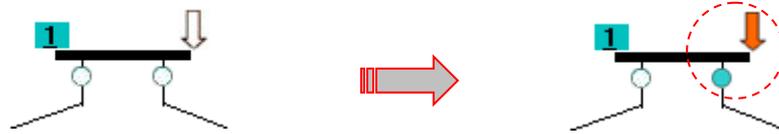


Figura 5.41: Selección de medidores que serán incluidos en el proceso de evaluación.

Para el uso de la tabla de conexiones, se deberá escoger primeramente la barra de referencia deseada. Consecuentemente, el sistema mostrará las posibles conexiones donde se podrá escoger los medidores de flujo deseados. figura 5.42

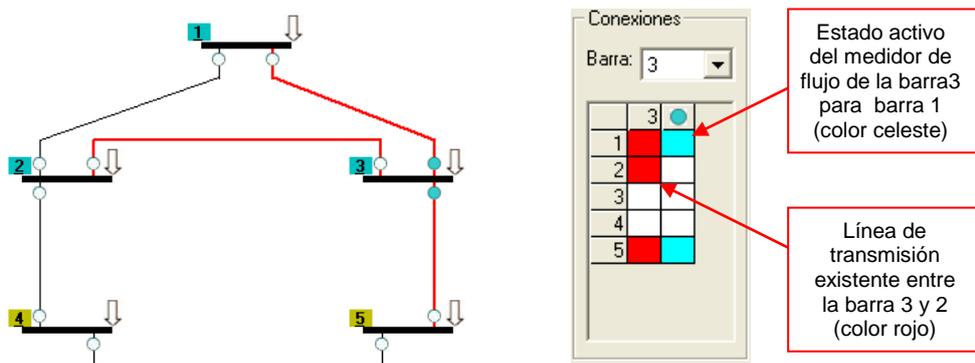


Figura 5.42: Selección de medidores existentes en el escenario topológico.

Como se puede observar, la tabla de conexiones muestra en la primera columna el número de barras disponibles en el escenario topológico. En la segunda columna se muestra las conexiones existentes (indicadas en color rojo) entre la barra seleccionada y las barras disponibles (como por ejemplo la barra 3 relacionada con las barras 1, 2 y 5) y en la tercera columna se indican, en el color celeste, el estado activo de selección del medidor de flujo en la línea de transmisión seleccionada. Para seleccionar un medidor de flujo para cualquiera de las barras conectadas, bastará seleccionar la celda de la segunda columna, que tenga intersección con la fila que representa la barra deseada. Esto quiere decir que solamente se puede escoger medidores en las barras que tengan conexión con la barra seleccionada (mostradas en color rojo). La figura 5.42 muestra

que fueron instalados dos medidores en la barra 3, que medirán el flujo de la barra 1 y de la barra 5.

Para facilitar la selección de medidores de flujo, cualquier modificación hecha en la tabla de conexiones se visualizará en el mapa topológico y vise-versa.

- Ejecución de la evaluación

Una vez definido el plano de evaluación se debe seleccionar la opción de “Evaluar (Obs/Med/Conj)” que iniciará el proceso de evaluación. Una vez terminado el análisis, el sistema mostrará el resultado parcial de la evaluación que indicará si el sistema es observable o no, además de los costos de plano de medición evaluado; figura 5.43 (a). En el caso, que el sistema no sea observable el sistema mostrará un mensaje de alerta y terminará el proceso de evaluación, figura 5.43 (b).

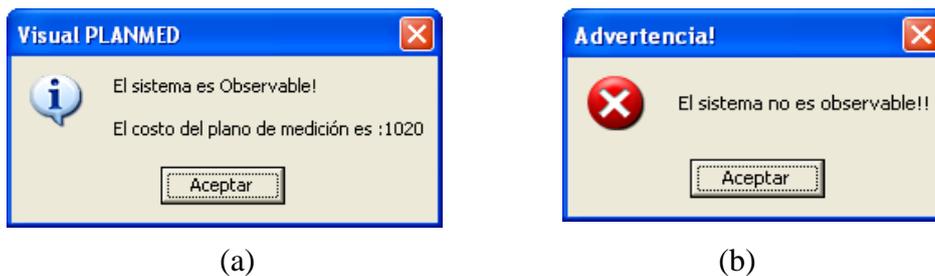


Figura 5.43: Resultado parcial del proceso de evaluación.

- Resultado de la evaluación

Como resultado final de la evaluación se muestra el mapa topológico y la tabla de resultados con las medidas y conjuntos críticos identificados para el escenario seleccionado, figura 5.44.

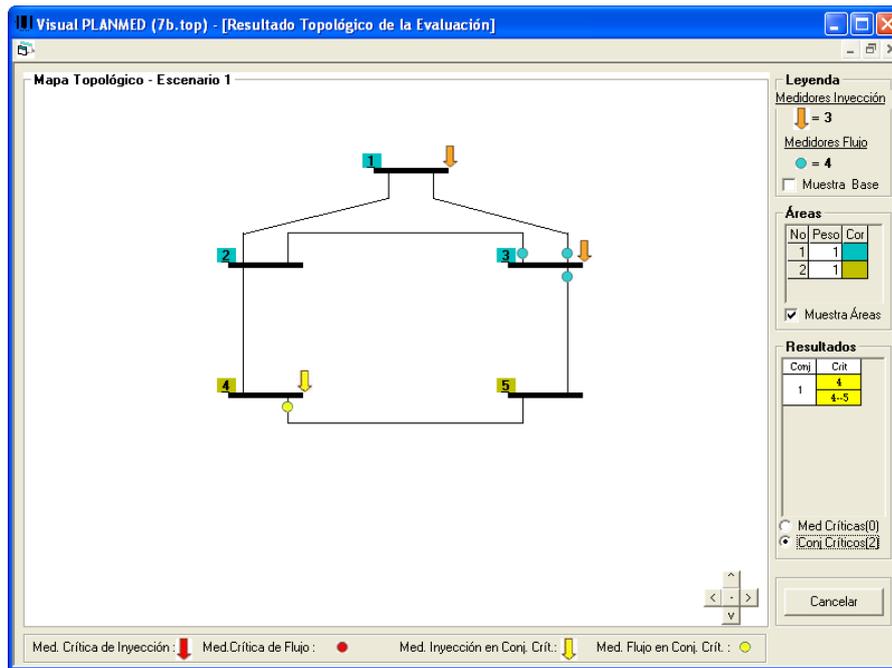


Figura 5.44: Ventana del resultado del proceso de evaluación.

Para la representación de medidas críticas en el escenario topológico los símbolos usados serán de color rojo para cada tipo de medidor, figura 5.45.



Figura 5.45: Representación de Medidas críticas

Para la representación de medidores en conjuntos críticos en el escenario topológico, los símbolos usados serán los mismos cambiando únicamente su color por amarillo, figura 5.46.

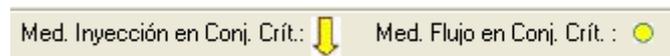


Figura 5.46: Representación de medidas en conjuntos críticos

Para facilitar la identificación de medidas y conjuntos críticos, los resultados se visualizan en la “tabla de resultados”; ésta mostrará los resultados de la identificación de medidas y conjuntos críticos, en caso el sistema posea un escenario topológico grande y complejo.

En la tabla de “Resultados” se selecciona y visualiza el tipo y descripción de los medidores identificados así como el número de medidas por cada tipo de evaluación, figura 5.47.



Figura 5.47: Opciones para exhibición de los resultados de la evaluación.

En la tabla de resultados mostrada en la figura 5.47, existen dos formas de representar los tipos de medidas. Para ambos tipos de medidas, tanto en las medidas críticas como en los conjuntos críticos, las medidas de inyección se representan utilizando el número de la barra (por ejemplo, barra 1 o barra 4). Para el caso de las medidas de flujo, estos están representados como un número de barra de origen y destino donde se encuentra localizada la medida, por ejemplo, de la barra 3 para la 1 (3--1) o de la barra 3 para 5 (3--5).

5.4 Conclusiones

El sistema Visual PLANMED posee funciones gráficas que permiten realizar planeamientos y evaluaciones de sistemas de medición de manera fácil y rápida, con un alto grado de flexibilidad para definir el sistema y configuraciones de opción de planeamiento y evaluación de resultados.

Las principales ventajas de esta herramienta son:

- Facilidad para la definición de los escenarios topológicos;
- Visualizaciones del costo versus número de generaciones al momento de la ejecución del AG;
- Control en la ejecución del AG;

- Exportación del resultado del planeamiento para la opción de evaluación, posibilitando modificaciones y nuevos análisis;
- Definición de áreas de interés y sus prioridades en el planeamiento de sistemas de medición;
- Facilidad gráfica para la identificación de medidas y conjuntos críticos;
- Definición de escenarios topológicos alternativos al escenario principal que permite planear o evaluar considerando posibles alteraciones futuras en el sistema.

CAPITULO 6

SIMULACIONES Y RESULTADOS

En este capítulo se describen las simulaciones y resultados de uno de las pruebas ejecutados para la evaluación de la metodología propuesta para el planeamiento de sistemas de medición.

Para las simulaciones se utilizó la topología de un sistema eléctrico patrón del IEEE compuesta de un sistema de 14 barras. La configuración de este sistema eléctrico fue ingresada al sistema Visual PLANMED de acuerdo con el diseño gráfico y su configuración topológica. Además, para fines comparativos, se crearon tres casos de estudio para el sistema IEEE-14. El primer caso representa el sistema como una gran área topológica, el segundo caso muestra el sistema dividido en tres áreas topológicas de interés y el tercero muestra un sistema con veinte escenarios topológicos alternativos.

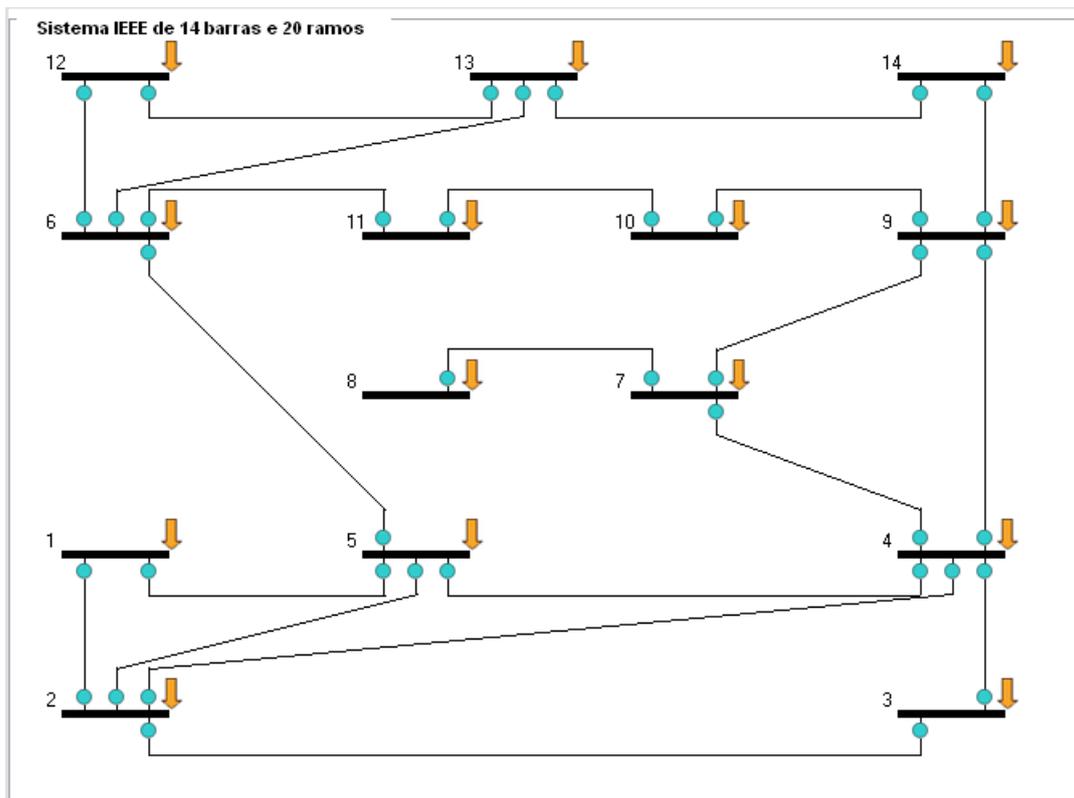
Las pruebas realizadas fueron definidas basadas en las opciones metodológicas desarrolladas en el sistema Visual PLANMED. Estas opciones son escogidas de acuerdo los requisitos de redundancia, buscando garantizar la observabilidad, ausencia de medidas críticas o ausencia de medidas en conjuntos críticos; indicando la mejor solución para el sistema de planeamiento de medición a un mínimo costo.

6.1 Simulación con el sistema IEEE-14

La primera simulación fue hecha en la configuración de la red del sistema IEEE de 14 barras y 20 conexiones. Para el Algoritmo Genético, se definió un cromosoma representado a través de un vector de 54 posiciones donde cada posición corresponde a una localización en la red eléctrica donde puede ser instalado un tipo de medidor. Para este caso, las 40 primeras posiciones del vector representan todas las posibles medidas

de flujo (una para cada extremo de cada una de las veinte conexiones mostradas con círculos de color celeste) y las 14 posiciones restantes representan las posibles medidas de inyección de potencia mostradas con la figura de una flecha de color anaranjado y que están localizados en cada barra de la red. La figura 6.1 muestra la configuración de la red, así como la localización de todos los posibles medidores de flujo e inyección de potencia.

Figura 6.1: Sistema IEEE de 14 barras y 20 conexiones.



Los parámetros utilizados para el algoritmo genético, en las diversas simulaciones realizadas en el sistema IEEE-14, como por ejemplo, el método de selección, tipo de cruzamiento, tamaño de la población y demás parámetros, figura 6.2. También se considera aleatoria la inicialización de la primera población de cromosomas.

Parámetros del Algoritmo Genético			
Número de Generaciones:	<input type="text" value="500"/>		
Tamaño de la Población:	<input type="text" value="100"/>		
Número de Gens x Crom:	<input type="text" value="54"/>		
Probabilidad Cruzamiento:	<input type="text" value="0.5"/>	Método de Cruzamiento:	<input type="text" value="Uniforme"/>
Probabilidad Mutación:	<input type="text" value="0.02"/>	Método de Selección:	<input type="text" value="Torneo"/>

Figura 6.2: Parámetros del Algoritmo Genético para el sistema IEEE-14.

Los parámetros utilizados para el Planeamiento para el sistema IEEE-14 barras son mostrados en la figura 6.3.

Parámetros del Sistema de Planeamiento			
Penalidad - Observabilidad:	<input type="text" value="1000000"/>		
Penalidad - Medida Crítica:	<input type="text" value="10000"/>	Tolerancia:	<input type="text" value="0.001"/>
Penalidad - Conjunto Crítico:	<input type="text" value="100"/>	Tolerancia 1° test	<input type="text" value="0.01"/> Refin <input type="text" value="0.001"/>
Costo del Medidor:	<input type="text" value="4.5"/>		
Costo del UTR	<input type="text" value="100"/>		
Número Max Líneas :	<input type="text" value="20"/>	Número de Áreas :	<input type="text" value="3"/>
Número Max Barras :	<input type="text" value="14"/>	Número de UTRs :	<input type="text" value="0"/>

Figura 6.3: Parámetros del sistema de planeamiento.

Los parámetros fueron extraídos de [Souz05], figura 6.3.

6.1.1 Sin Considerar Áreas de Interés

En esta simulación se consideraron las opciones, figura 6.4.

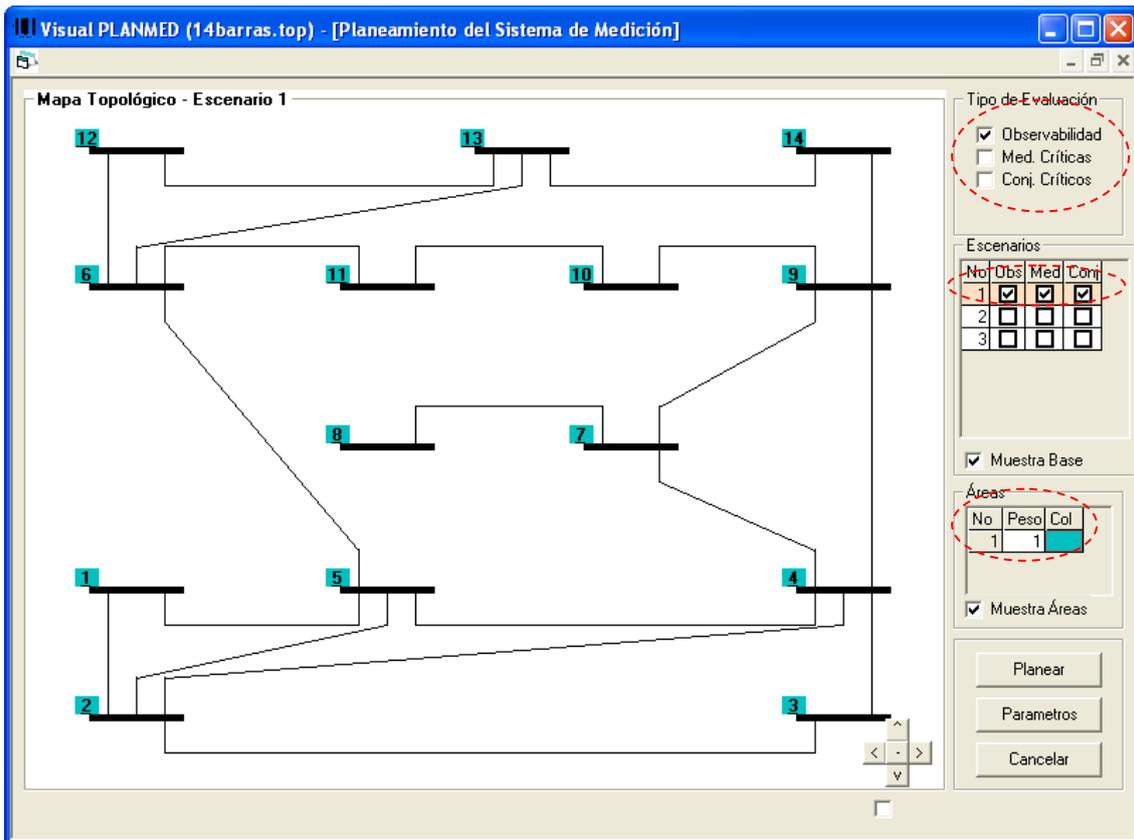


Figura 6.4: Opciones principales seleccionadas para la ejecución planeamiento en el sistema IEEE-14.

A continuación se presentan los resultados de las pruebas considerando la selección de diferentes requisitos de desempeño y para apenas un área de interés y configuración topológica.

a) Atención al requisito de observabilidad

Tabla 6.1: Resultado para el requisito de observabilidad.

Área	N° de UTRs	N° de Medidores de Inyección	N° de Medidores de Flujo	Tiempo	Total de Medidores	Costo (\$)
1	4	3	10	18,9 seg.	13	458,50

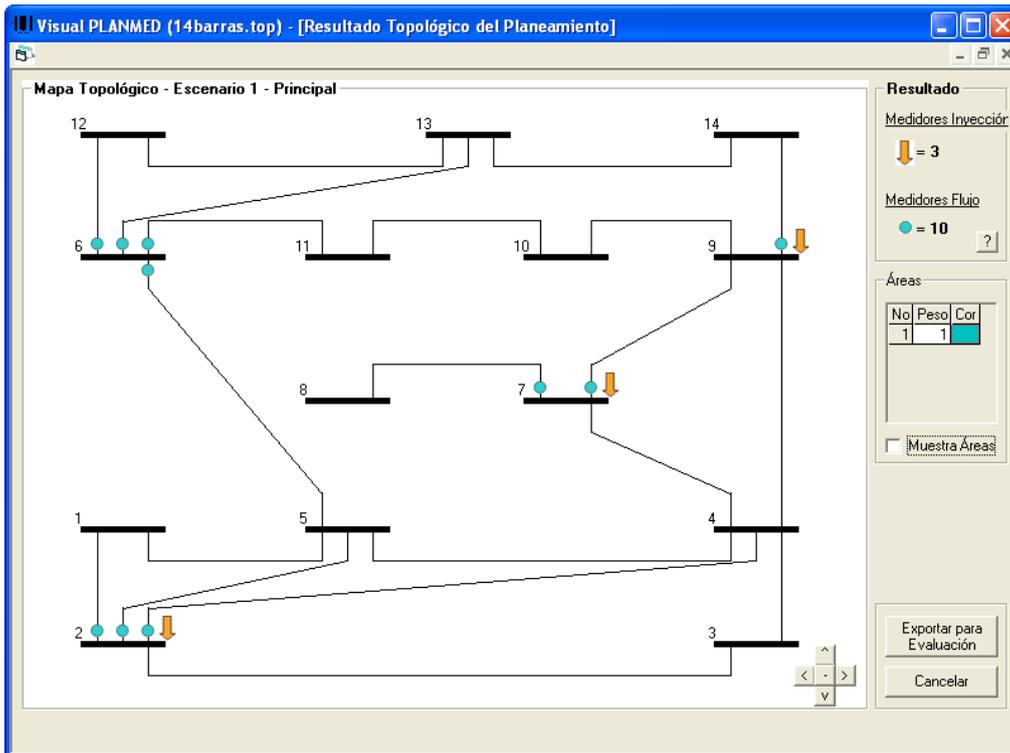


Figura 6.5: Resultado de la atención al requisito de observabilidad, sistema IEEE-14.

La solución muestra que fue posible obtener un sistema de medición que permite la supervisión de la red en su totalidad, atendiendo de esta manera el requisito de observabilidad. Además, la solución propuesta es considerada óptima en cuanto a la cantidad de medidas, ya que se instaló un conjunto mínimo de medidores (número de barras -1). Se puede también notar que la distribución de UTRs y medidores fue optimizada, pues tiende a concentrar (en la medida de posible, atendiendo al requisito preestablecido) medidores en puntos específicos de la red, minimizando de esta manera el número de UTRs necesarias y consecuentemente el costo asociado.

b) Atención al requisito de ausencia de medidas críticas

Tabla 6.1: Resultado para el requisito de observabilidad.

Área	N° de UTRs	N° de Medidores de Inyección	N° de Medidores de Flujo	Tiempo	Total de Medidores	Costo (\$)
1	5	4	10	55,64 seg.	14	563,00

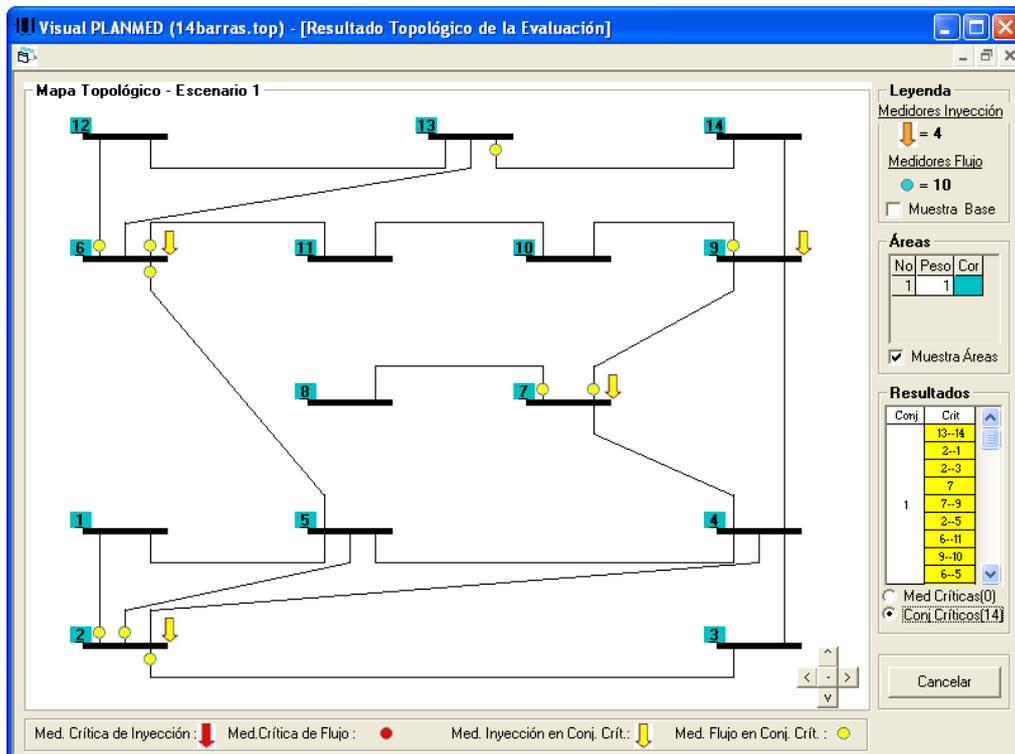


Figura 6.6: Resultado de la atención al requisito de ausencia de medidas críticas, sistemas IEEE-14

La solución mostrada indica un plan de medición donde no existen medidas críticas en la red. Es posible percibir que las medidas instaladas pertenecen a un gran conjunto crítico lo que comprueba que si se pierde una de estas medidas las demás se tornarían críticas. Esto comprueba el valor óptimo del resultado.

c) Atención al requisito de ausencia de medidas críticas en conjuntos críticos

Tabla 6.3: Resultado para el requisito de ausencia de medidas críticas en conjuntos críticos.

Área	N° de UTRs	N° de Medidores de Inyección	N° de Medidores de Flujo	Tiempo	Total de Medidores	Costo (\$)
1	9	8	8	98,63 seg.	16	972,00

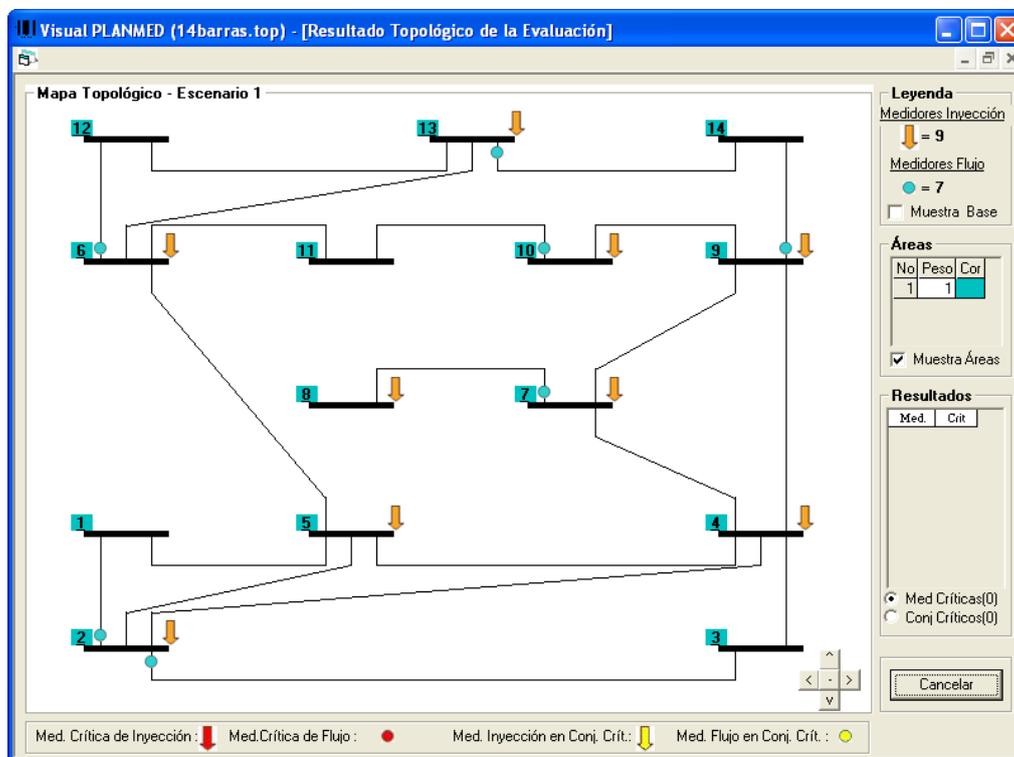


Figura 6.7: Resultado de la atención al requisito de ausencia de medidas en conjuntos críticos, sistemas IEEE-14

El resultado nos indica un plano de medición donde no existen medidas en conjuntos críticos en la red, figura 6.7. Es importante destacar que este análisis envuelve mayores costos debido al requerimiento de mayor redundancia de medidas para garantizar la ausencia de conjuntos críticos.

6.1.2 Considerando Áreas de Interés

Para esta simulación el sistema IEEE-14 se dividió en tres áreas de interés definidas de forma arbitraria. Las barras están agrupadas de la siguiente manera:

Área 1:

Barras: 1, 2, 3, 5

Área 2:

Barras: 4, 7, 8, 9

Área 3:

Barras: 6, 10, 11, 12, 13, 14

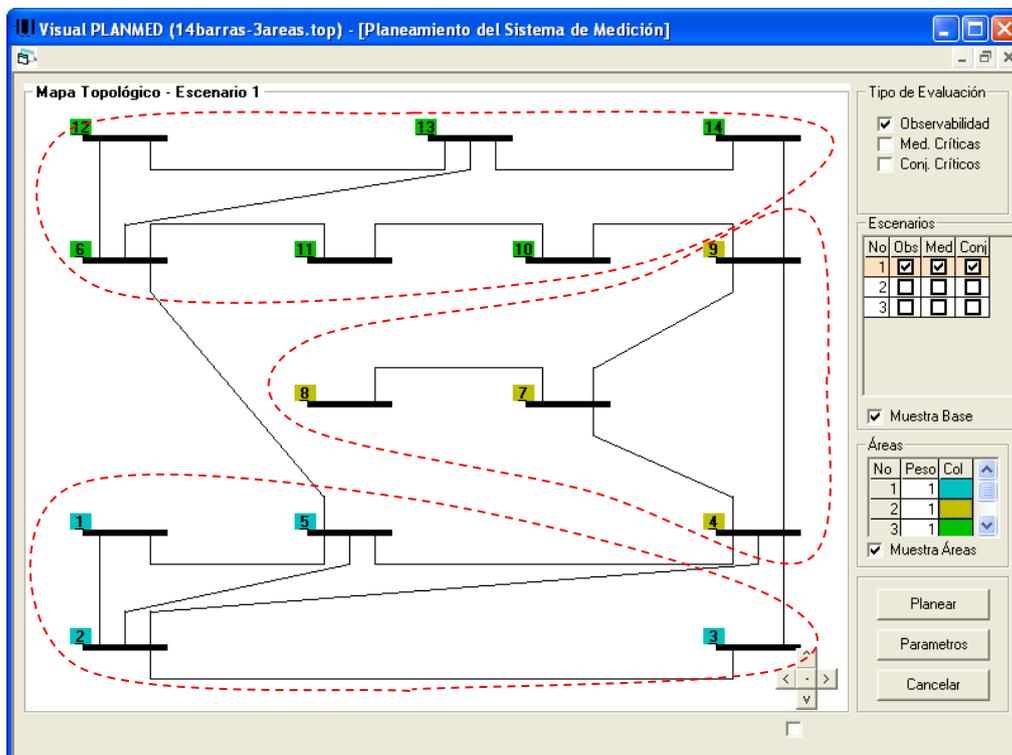


Figura 6.8: Escenario topológico considerando tres áreas de interés, sistema IEEE-14.

A partir de estas agrupaciones se hacen simulaciones para evaluar el costo en función a la prioridad de atención de requisitos en áreas de específicas de interés.

6.1.2.1 Simulación Considerando el Área 1 con prioridad

a) Atención al requisito de ausencia de medidas críticas en el área 1.

Tabla 6.4: Atención al requisito de ausencia de medidas críticas en el área 1.

Área	N° de UTRs	N° de Medidores de Inyección	N° de Medidores de Flujo	Total de Medidores	Tiempo	Costo (\$)
1	1	1	4	5	53,67 seg.	463,00
2	2	2	3	5		
3	1	1	3	4		
Total	4	4	10	14		

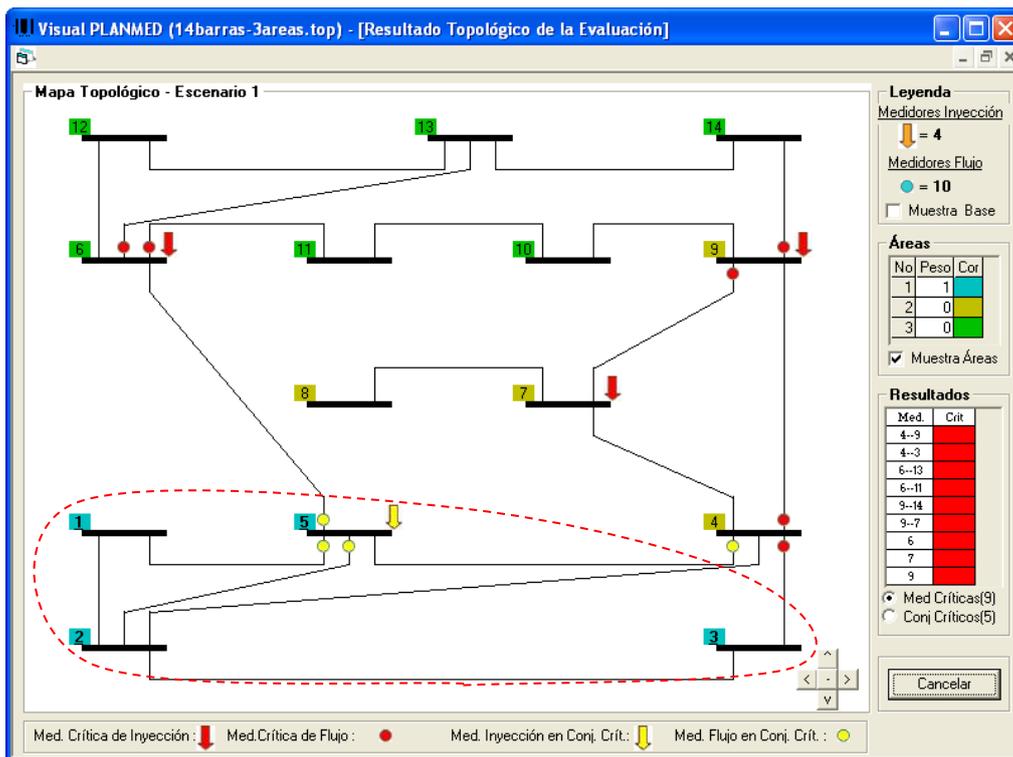


Figura 6.9: Resultado del requisito de ausencia de medidas críticas en el área 1.

El resultado indica un plano de medición donde no existen medidas críticas en el área 1, figura 6.9. También se observa que fueron identificadas medidas críticas (mostradas en color rojo) en las áreas no prioritarias.

c) Atención al requisito de ausencia de medidas en conjuntos críticos en el área 2.

Tabla 6.5: Resultado para el requisito de ausencia de medidas en conjuntos críticos en el área 1.

Área	N° de UTRs	N° de Medidores de Inyección	N° de Medidores de Flujo	Total de Medidores	Tiempo	Costo (\$)
1	1	1	4	4	87,16 seg.	572,00
2	1	3	5	8		
3	1	1	3	4		
Total	5	5	11	16		

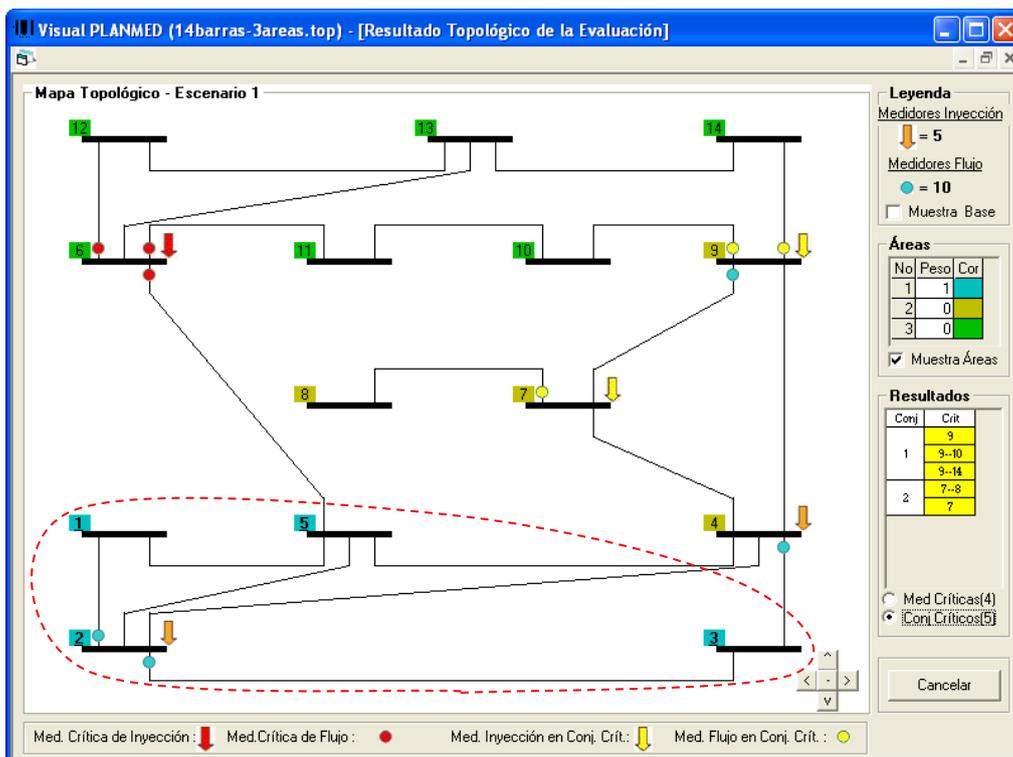


Figura 6.10: Resultado de la atención al requisito de ausencia de medidas en conjuntos críticos en el área 1.

El resultado indica un plano de medición donde no existen medidas en conjuntos críticos en el área 1, figura 6.10. En comparación a la prueba anterior mostrada en la tabla 6.4, existe un incremento en el costo del plano de medición debido a los requisitos

definidos. También es posible observar en el resultado gráfico que solamente fueron identificadas medidas y conjuntos críticos (mostradas en color rojo y amarillo) en las áreas no prioritarias.

6.1.2.2 Simulación considerando el área 2 con prioridad

a) Atención al requisito de ausencia de medidas críticas en el área 2.

Tabla 6.6: Resultado de ausencia de medidas críticas en el área 2.

Área	N° de UTRs	N° de Medidores de Inyección	N° de Medidores de Flujo	Total de Medidores	Tiempo	Costo (\$)
1	1	1	3	4	53,61 seg.	463,00
2	2	2	4	6		
3	1	1	3	4		
Total	4	4	10	14		

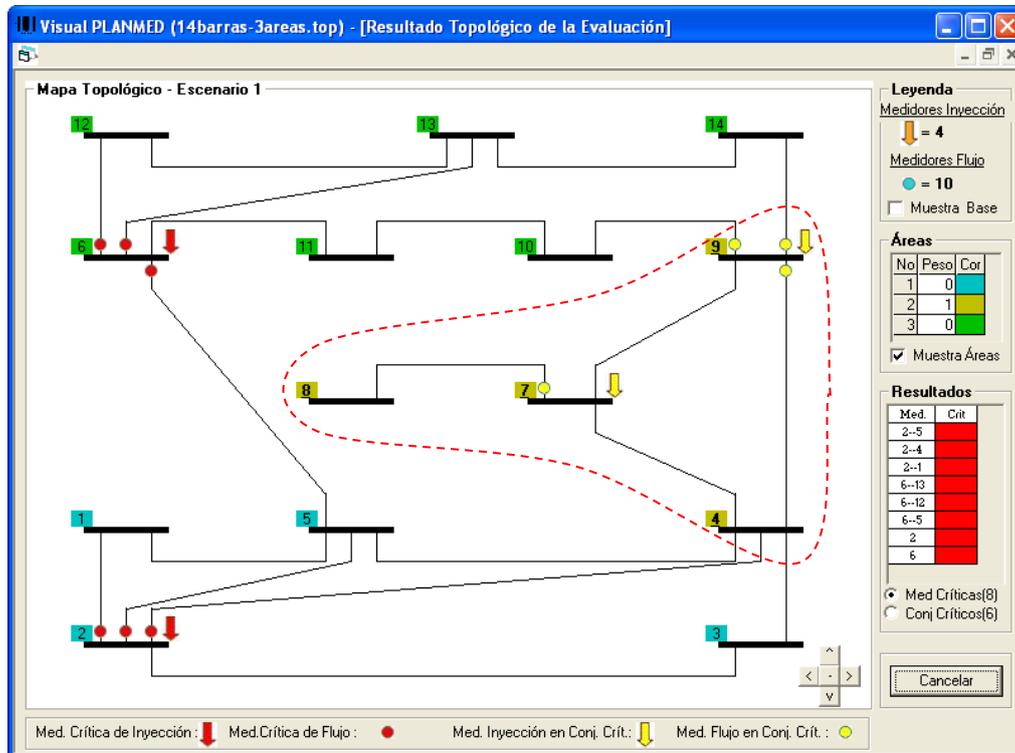


Figura 6.11: Resultado del requisito de ausencia de medidas críticas en el área 2.

El resultado indica un plano de medición donde no existen medidas críticas en el área 2, figura 6.11. Además, es posible observar en el resultado gráfico que fueron identificadas medidas críticas (mostradas de color rojo) en las áreas consideradas no prioritarias.

b) Atención al requisito de ausencia de medidas en conjuntos críticos en el área 2.

Tabla 6.7: Resultado de la ausencia de medidas en conjuntos críticos en el área 2.

Área	N° de UTRs	N° de Medidores de Inyección	N° de Medidores de Flujo	Total de Medidores	Tiempo	Costo (\$)
1	1	1	3	4	94,42 seg.	672,00
2	2	2	4	6		
3	3	3	3	6		
Total	5	6	13	16		

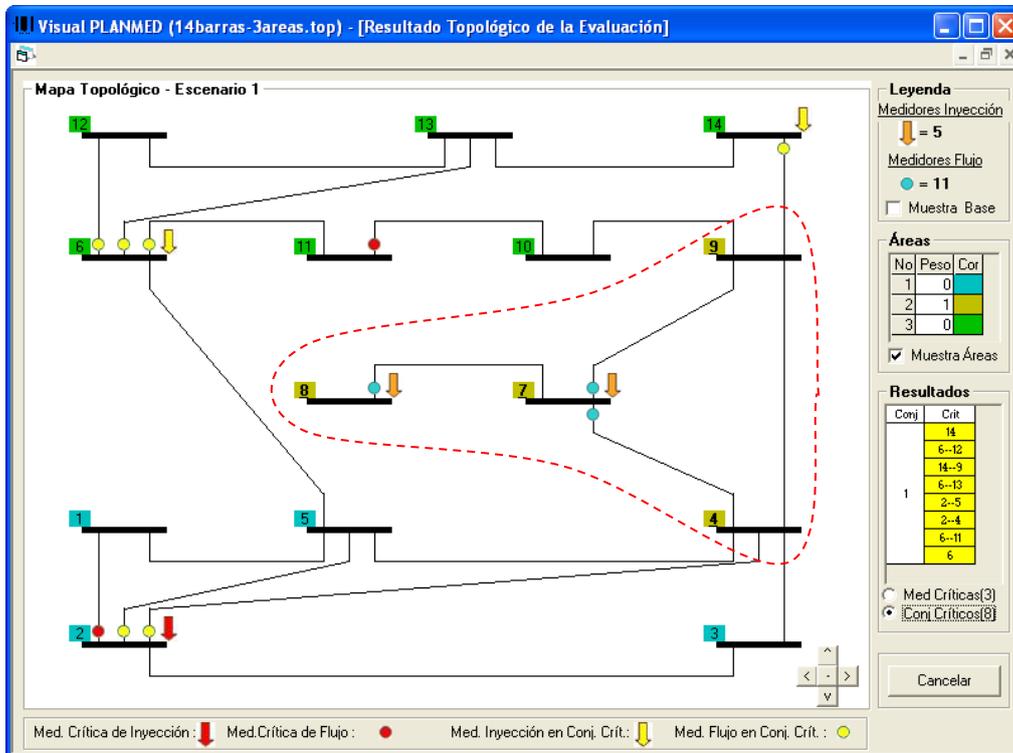


Figura 6.12: Resultado del requisito de ausencia de medidas en conjuntos críticos en el área 2.

El plan de medición muestra que no fueron identificadas medidas en conjuntos críticos en el área 2, figura 6.12. También es posible observar en el resultado que se identificaron otras medidas en conjuntos críticos en las áreas consideradas no prioritarias.

6.1.2.3 Simulación considerando el área 3 con prioridad

a) Atención al requisito de ausencia de medidas críticas en el área 3.

Tabla 6.8: Resultado de la ausencia de medidas críticas en el área 3.

Área	N° de UTRs	N° de Medidores de Inyección	N° de Medidores de Flujo	Total de Medidores	Tiempo	Costo (\$)
1	1	0	4	4	53,53 seg.	463,00
2	2	1	4	5		
3	1	1	4	5		
Total	4	2	12	14		

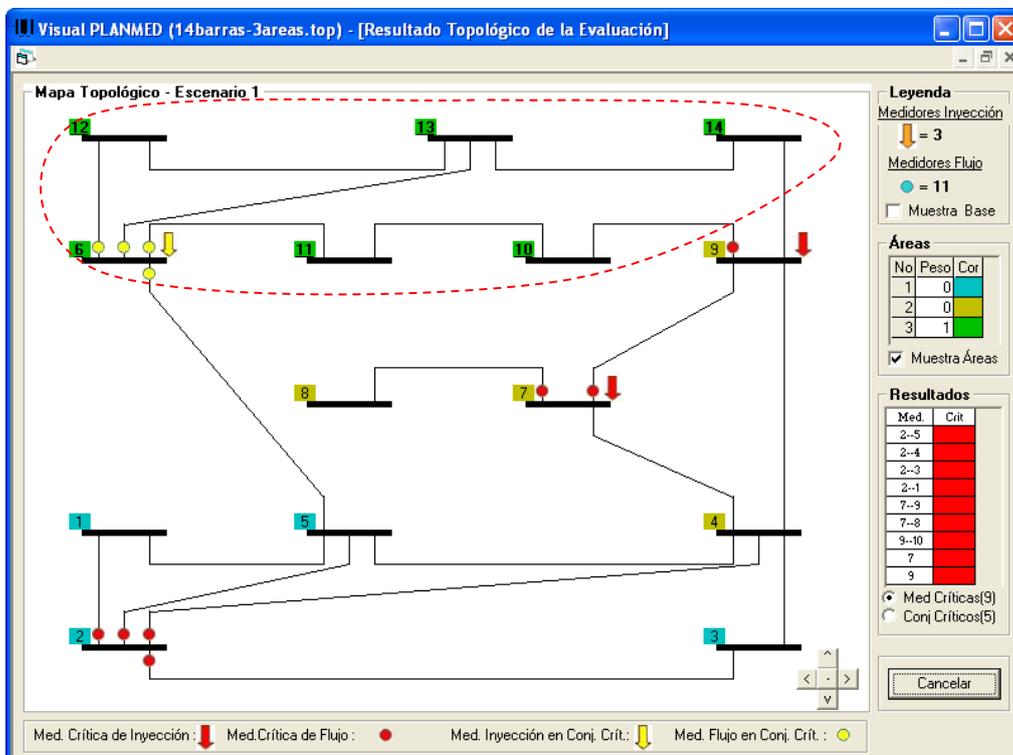


Figura 6.13: Resultado del requisito de ausencia de medidas críticas en el área 3.

b) Atención al requisito de ausencia de medidas críticas en conjuntos críticos, área 3

Tabla 6.9: Resultado de ausencia de medidas en conjuntos críticos en el área 3

Área	N° de UTRs	N° de Medidores de Inyección	N° de Medidores de Flujo	Total de Medidores	Tiempo	Costo (\$)
1	1	1	3	4	92,34 seg.	576,50
2	2	2	4	6		
3	2	2	5	7		
Total	5	5	12	17		

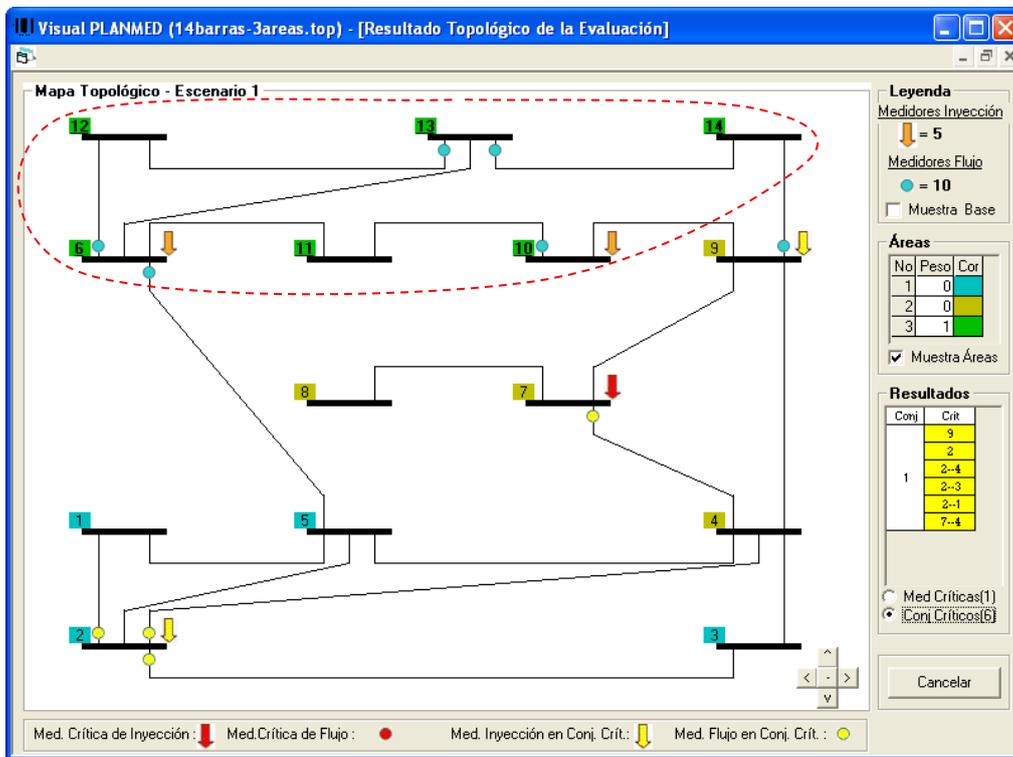


Figura 6.14: Resultado del requisito de ausencia de medidas en conjuntos críticos en el área 3.

6.1.3 Considerando Escenarios Alternativos de Interés

Para esta simulación fueron creados de forma arbitraria tres escenarios topológicos alternativos para el sistema IEEE-14 (tabla 6.16) que representan posibles modificaciones del escenario topológico principal, por ejemplo, si ocurrieran rupturas de una o más líneas.

Tabla 6.10: Escenarios Alternativos

N° Escenario	Líneas fuera de operación
1	--
2	1 – 2 , 9 –14
3	4 – 3 , 6 – 12

Para realizar las pruebas, fueron definidos de forma arbitraria dos grupos de escenarios para la evaluación de los requisitos de observabilidad, ausencia de medidas críticas y ausencia de medidas en conjuntos críticos.

Grupo A:

Escenario: 1

Grupo B:

Escenarios: 1, 2, 3

a) Atención al requisito de observabilidad en el grupo de escenarios alternativos A.

Área	N° de UTRs	N° de Medidores de Inyección	N° de Medidores de Flujo	Tiempo	Total de Medidores	Costo (\$)
1	4	3	10	18,9 seg	13	458,50

b) Atención al requisito de observabilidad en el grupo de escenarios alternativos B.

Áreas	N° de UTRs	N° de Medidores de Inyección	N° de Medidores de Flujo	Tiempo	Total de Medidores	Costo (\$)
1	6	4	9	49,52	13	658,5

c) Atención al requisito de ausencia de medidas críticas en el grupo de escenarios alternativos A.

Área	N° de UTRs	N° de Medidores de Inyección	N° de Medidores de Flujo	Tiempo	Total de Medidores	Costo (\$)
1	5	4	10	55,73	14	563,00

d) Atención al requisito de ausencia de medidas críticas en el grupo de escenarios alternativos B.

Áreas	N° de UTRs	N° de Medidores de Inyección	N° de Medidores de Flujo	Tiempo	Total de Medidores	Costo (\$)
1	5	5	12	165,39 seg.	17	576,50

e) Atención al requisito de ausencia de medidas en conjuntos críticos en el grupo de escenarios alternativos A.

Área	N° de UTRs	N° de Medidores de Inyección	N° de Medidores de Flujo	Tiempo	Total de Medidores	Costo (\$)
1	9	9	7	98,81	16	972,00

f) Atención al requisito de ausencia de medidas en conjuntos críticos en el grupo de escenarios alternativos B.

Áreas	N° de UTRs	N° de Medidores de Inyección	N° de Medidores de Flujo	Tiempo	Total de Medidores	Costo (\$)
1	11	11	12	307,17 seg.	23	1203,5

6.2 Análisis Comparativo de las simulaciones

6.2.1 Consideración de Áreas de Interés

En el análisis comparativo, figura 6.15, de los resultados obtenidos en las simulaciones con el sistema IEEE-14 se puede comprobar que los costos para el caso del análisis de medidas críticas, considerando todas las áreas como prioritarias, el costo es mayor que considerando separadamente cada una de éstas. De la misma manera para el análisis de medidas en conjuntos críticos es posible observar que el costo se incrementa cuando se trabaja el sistema sin considerar la priorización de áreas.

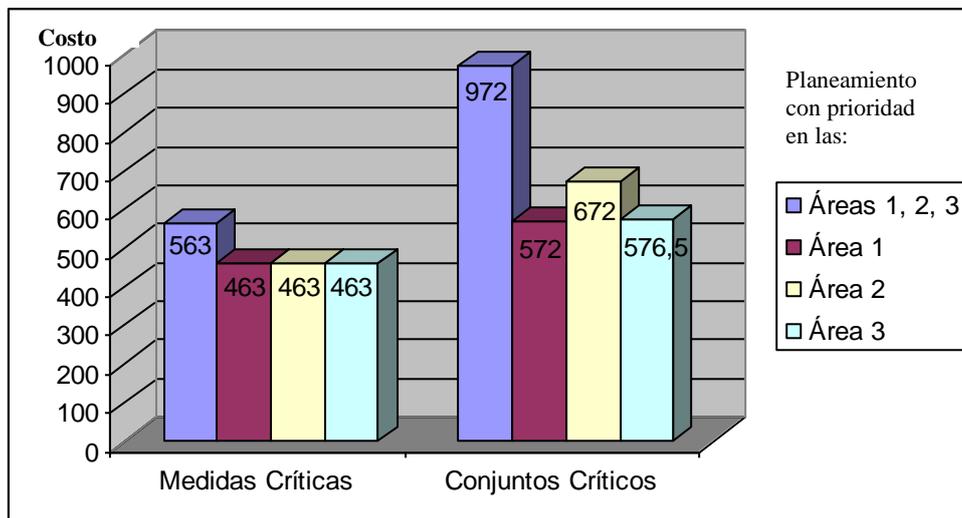


Figura 6.15: Análisis comparativo del costo del sistema de medición para la atención de los requisitos de medidas y conjuntos críticos agrupados y no agrupados en áreas de interés.

6.2.2 Planeamiento con escenarios topológicos alternativos

En el gráfico comparativo, figura 6.16, se puede observar que los costos, al realizar un planeamiento con escenarios topológicos alternativos, se incrementan a razón del aumento del número de medidores que mantendrán el sistema considerando sus posibles alteraciones (escenarios alternativos), siempre atendiendo los requisitos especificados por el proyectista.

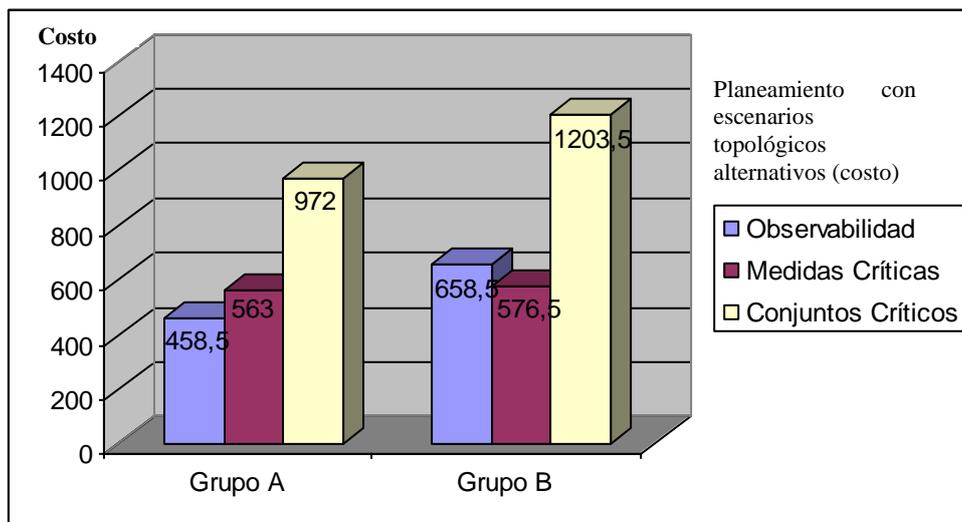


Figura 6.16: Análisis comparativo del costo del sistema de medición para la atención de los requisitos de medidas y conjuntos críticos para las pruebas con escenarios topológicos alternativos.

Se comprueba también, que al requerir un sistema de planeamiento que satisfaga las posibles alteraciones representadas en los escenarios topológicos alternativos, el tiempo en la ejecución del sistema se incrementa en función a los requisitos especificados por el proyectista del sistema, esto debido a que el sistema garantizará la atención a los requisitos, de observabilidad, ausencia de medidas críticas y ausencia de medidas en conjuntos críticos, en cada uno de los escenarios topológicos considerados en el planeamiento.

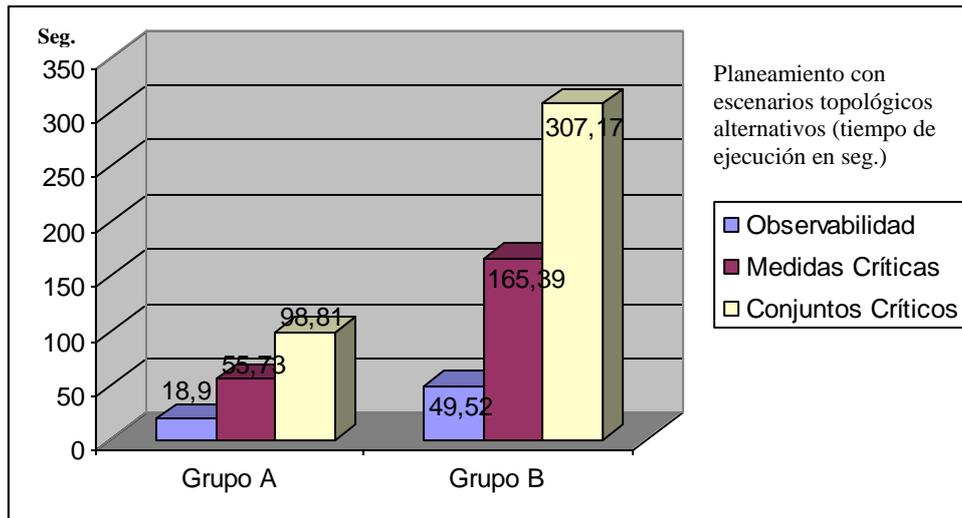


Figura 6.17: Análisis comparativo del tiempo de ejecución del sistema de planeamiento para la atención de los requisitos de medidas y conjuntos críticos, en pruebas con escenarios topológicos alternativos.

6.3 Comentarios sobre los resultados de las simulaciones

Analizando los resultados obtenidos en las simulaciones, cabe resaltar los siguientes puntos:

- a) Tal como se esperaba, se constata inicialmente que, de forma general, cuanto mas restricciones son consideradas para la obtención de un plano óptimo de medición, se tiende a una mayor redundancia, por lo tanto el plano de medición se torna más caro.
- b) Los tiempos computacionales medios fueron menores en el sistema IEEE-14 para el planeamiento del sistema de medición sin considerar escenarios topológicos de interés. En el caso de la consideración de 3 escenarios de interés los tiempos medios fueron mayores, pudiendo estos ser reducidos con el perfeccionamiento de la meta-heurística empleada.
- c) Se verificó que la definición de áreas de interés para la supervisión tiene una gran influencia en la determinación del plano óptimo de medición. Cuando se reduce el número de barras en las áreas no prioritarias se puede obtener un plano de medición a un menor costo.

- d) Se verificó que la definición de escenarios topológicos de interés para la supervisión, puede tener una gran influencia en la determinación del plano óptimo de medición. Restringiendo el número de escenarios de interés, se puede obtener un plano de medición de costo significativamente menor.
- e) Como era de esperar, se cumplió las restricciones asignadas a las tareas de interés, siendo instalados puntos de medición de manera que cumplan satisfactoriamente los requisitos de evaluación del plano de medición.

CAPITULO 7

CONCLUSIONES Y TRABAJOS FUTUROS

El conocimiento del estado operativo a través de un sistema informático es de fundamental importancia en un ambiente donde se requiere la toma de decisiones en tiempo real. El Estimador de Estado es responsable de brindar, en tiempo real, informaciones confiables que serán procesadas por las funciones de análisis y automatización. El éxito de la Estimación de Estados depende fundamentalmente de la existencia de un adecuado plano de medición.

Este trabajo presentó un sistema informático basado en la metodología para el planeamiento y evaluación de sistemas de medición en redes de transmisión de energía eléctrica. La técnica de Algoritmos Genéticos fue utilizada como herramienta de optimización, buscando siempre la mejor relación de costo/beneficio del sistema de medición y la atención a los requisitos de desempeño para la función de Estimación de Estados.

El sistema informático desarrollado, permite al proyectista del sistema definir, planear y evaluar un determinado sistema, de manera simple y rápida. Ésta se debe al entorno visual del sistema, así como la implementación de nuevas funcionalidades gráficas que permiten una clara evaluación de los resultados obtenidos en el sistema, posibilitando escoger, de acuerdo al requerimiento, las restricciones que serán atendidas en cada escenario topológico y área de interés para el planeamiento.

Dentro de las principales conclusiones, se puede destacar:

- La construcción de un sistema informático permitió una fácil interacción del usuario con la metodología en el planeamiento de sistemas de medición para: definición del problema y de parámetros utilizados; análisis de alternativas, evaluación de resultados.
- La metodología propuesta se mostró bastante flexible en relación a la formulación del problema de optimización (función objetivo y restricciones) y eficaz en la búsqueda de una solución óptima.
- La posibilidad de la definición de áreas y de escenarios de interés permitirá garantizar la supervisión de acuerdo a los requisitos de redundancia definidos para cada una de las áreas y escenarios topológicos. Esta característica es muy importante, pudiendo ser crítica cuando se disponen de recursos financieros limitados para la compra de UTRs y equipos de medición. Cuando se definen áreas y escenarios de interés, es fundamental una selección basada en criterios de los escenarios y áreas considerados relevantes para la supervisión. Se puede por ejemplo, no considerar la atención al requisito de ausencia de medidas críticas o observabilidad, en escenarios topológicos de ocurrencia improbable, poco frecuentes o menos importantes; también se podrían definir áreas de mayor o menor importancia para la atención de ciertos requisitos, obteniéndose de esta forma una reducción en la inversión necesaria para la supervisión de áreas realmente relevantes.
- La utilización de la metodología propuesta, indica los puntos de medición donde deben ser recolectadas las informaciones que permite la supervisión de la red con un nivel de confiabilidad predefinido a un mínimo costo. De esta manera se puede utilizar estos resultados para inversión en la compra de Unidades Terminales Remotas y medidores.

7.1 Principales Contribuciones

Dentro de las principales contribuciones se pueden destacar:

- La metodología propuesta permite representar de mejor manera el conocimiento y la experiencia de especialistas en redes de transmisión, de forma a explorar diferentes relaciones de costo/beneficio para un adecuado sistema de medición.
- Es posible definir áreas de interés prioritarias, posibilitando la reducción de costos de instalación de medidores.
- El sistema desarrollado permite su ejecución de forma autónoma, independiente de un sistema Estimador de Estado.

7.2 Propuestas para Trabajos Futuros

Para la continuación de este trabajo, se sugieren los siguientes tópicos:

- Realizar análisis comparativos e incorporar en el sistema Visual PLANMED otros modelos de optimización como por ejemplo GRASP, Búsqueda Tabú y Recocimiento Simulado;
- Implementación de nuevos operadores genéticos como por ejemplo operadores constructivos;
- Refinar las herramientas de visualización e interacción con el usuario;
- Tratar el problema del tiempo de ejecución para el planeamiento de sistemas de medición de gran tamaño;

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

[Aam83] S. Aam, L. Holten, O. Gjerd, *Design of the measurement system of for state estimation in the Norwegian high-voltage transmission network*, IEEE Trans. PAS, vol. PAS-102, no. 12, pp. 3769-3777, Dic./1983.

[Abur99] A. Abur, F. H. Magnago, *Optimal meter placement for maintaining observability during single branch outages*, IEEE Trans. PS, vol. 14, no. 4, Nov./1999.

[Alsa98] O. Alsaç, N. Vempati, B. Stott, A. Monticelli, *Generalized state estimation*, IEEE Trans. PS, vol 13, pp. 1069-1075, Ago./1998.

[Anto00] A. B. Antonio, *Alocação de medidores para estimação de estados em sistemas de potência através de metaheurísticas*, Dissertação de Mestrado, CAA/UFF, Set./2000.

[Anto01] A. B. Antonio, J. R. A. Torreão, M. B. Do Coutto Filho, *Meter placement for power system state estimation using simulated annealing*, IEEE Porto Power Tech Conference Proceedings, Porto, Portugal, paper 146, Set./2001.

[Aria75] F. Ariatti, L. Marzio, P. Ricci, *Designing state estimation in view of reliability*, PSCC Proceedings, paper 2.3/8, Cambridge, UK, Set./1975.

[Bara95] M. E. Baran, J. Zhu, H. Zhu, K. E. Garren, *A meter placement method for state estimation*, IEEE Trans. PS, vol. 10, no. 3 pp. 1704-1710, Ago./1995.

[Barn87] S. T. Barnard, *Stereo Matching by Hierarchical Annealing, Microcanonical Annealing*, Proceeding of the 10th International Joint conference on Artificial Intelligence, Italy, Milan, pp. 832-835, 1987.

[Bose87] A. Bose, K. A. Clements, *Real-time modeling of power network*, proc. IEEE, vol. 75, no. 12, pp 1607-1622, Dic./1987.

[Çeli92] M. K. Çelik, A. Abur, *A robust WLAV state estimator using transformations*, IEEE Trans. Power System, vol. 7, pp. 106-113, Feb./1992.

[Çeli95] M. K. Çelik, W. H. Edwin Liu, *An incremental measurement placement algorithm for state estimation*, IEEE Trans. Power System, vol. 10, no. 3, pp. 1698-1703, Ago./1995.

[Clem81] K. A. Clements, G. R. Krumpholz, P. Davis, *Power system state estimation residual analysis: an algorithm using network topology*, IEEE Trans. PAS, vol. PAS-100 Abr./1981.

[Clem82] K. A. Clements, R. Krumpholz, P. W. Davis, *State estimation measurement system reliability evaluation – an efficient algorithm based on topological observability theory*, IEEE Trans. PAS, vol. PAS-102, pp. 2012-2020, Jul/1983.

[Clem83] K. A. Clements, G. R. Krumpholz, P. W. Davis, *Power system state estimation with measurement deficiency: an observability measurement placement algorithm*, IEEE Trans. PAS, Vol. PAS-102, pp. 2012-2020, Jul/1983.

[Clem90] K. A. Clements, *Observability methods and optimal meter placement*, *Electrical Power & Systems*, vol. 12, no. 2, pp. 88-93, Abr./1990.

[Cose00] J. Coser, J. G. Rolim, A. J. A. Simões Costa, *Projeto de planejamento de medição para a estimação de estados via algoritmos genéticos*, Congresso Brasileiro de Automática, Florianópolis, SC, Nov./2000.

[Cout90] M. B. Do Coutto Filho, A. M. Leite da Silva, D. M. Falcão, *Bibliography on power system state estimation (1968 – 1989)*, IEEE Trans. Power Systems, Vol. 11, No. 1, pp. 332-337, Feb./ 1996.

[Cout99] M. B. Do Coutto Filho, J. C. S. Souza, R. S. G. Matos, M. Th. Schilling, *Strategies for preserving data redundancy in power system state estimation*, 13th Power Systems Computation Conference Proc., Trondheim, Norway, Jul./1999.

[Cout00] M. B. Do Coutto Filho, J.C.S. Souza, R.S.G. Matos, M.Th. Schilling, *Utilização de uma base de dados preditiva na estimação de estado*, VII SEPOPE, artigo SP079, Curitiba, PR, May./2000.

[Cout01a] M.B. do Coutto Filho, J. C. S. Souza, F. M. F. Oliveira, M. Th. Schilling, *Identifying critical measurements & sets for power system state estimation*, IEEE Porto Power Tech, Set/2001.

[Cout01b] M.B. do Coutto Filho, J. C. S. Souza, F. M. F. Oliveira, M. Th. Schilling, *Perda iminente de observabilidade na estimação de estado em centros de operação de sistema*, SNPTEE, Grupo IX, Oct./2001.

[Cout01] M. B. Do Coutto Filho, J. C. S. Souza, F. M. F. Oliveira, M. Th. Schilling, *Identifying critical measurements & sets for power system state estimation*, IEEE Porto PowerTech, Set./2001.

[Crai90] E. D. Crainic, H. P. Horisberger, X. D. Do, D. Mukhedkar, *Power system network observability: the assessment of the measurement system strength*, IEEE Trans. on Power System, vol. 5, no. 4, pp. 1267-1285, Nov./1975.

[Edel75] H. Edelmann, *A Universal assessment for the superior quality of distribution of measuring points for the state estimation of high-voltage networks*, PSCC Proceedings, paper 2.3/7, Cambridge, UK, Set./1975.

[Fetz75] E. E. Fetzter, P. M. Anderson, *Observability in state estimation of power systems*, IEEE Trans. on PAS, vol. PAS-94, pp. 1981-1988, Nov.-Dic./1975.

[Glov89] F. Glover, *Tabu search - Part I*, ORSA Journal on Computing, vol. 1, no. 3, pp. 190-206, Summer, 1989.

[Glov90] F. Glover, *Tabu search - Part II*, ORSA Journal on Computing, vol. 2, no. 1, pp. 4-32, Winter, 1990.

[Gold89] D. E. Goldberg, *Genetic algorithms in search, optimization and machine learning*, Addison-Wesley, 1989.

[Hand75] E. Handschin, C. Bongers, *Theoretical and practical considerations in the design of state estimators for electric power systems*, *International Symp. Computerized Operation of Power System (COPOS) Proceedings*, São Carlos, Brasil, pp. 104-136, Ago./1975.

[Hol75] J. H. Holland, *Adaptation in natural and artificial systems*, Ann Arbor, University of Michigan Press, 1975.

[Kogl75] H. J. Koglin, *Optimal measuring system for state estimation*, PSCC Proceedings, paper 2.3/12, Cambridge, UK, Set./1975.

[Korr84] G. N. Korres, G. C. Contaxis, *A tool for the evaluation a selection of State estimation measurement skins*. IEEE Transactions in Power System, vol 9 No 2 pag 1110 - 1116, May./1984.

[Laar87] P. J. M. V. Laarhoven, E. H. L. Aarts, *Simulated annealing: theory and application*, D. Reidel Publishing Company, 1987.

[Magn00] F. H. Magnago, A. Abur, *A unified approach to robust meter placement against loss of measurements and branch outages*, IEEE Trans. Power Systems, vol. 15, no. 3, Ago./2000.

[**Mat00**] R. S. Guedes de Matos, *Processamento de erros grosseiros na estimação de estado em sistemas de potência em condições críticas de redundância*, Dissertação de Mestrado, CAA/UFF, Ene./2000.

[**Mich96**] Z. Michalewicz, *Genetic Algorithms + Data Structures = Evolution Programs*. New York: Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 1996.

[**Mili91**] L. Mili, V. Phaniraj, P. Rousseeuw, *Least median of square estimation in power systems*, vol. 6, pp. 511-523, May./1991.

[**Mira96**] V. Miranda, D. Srinivasan, L. M. Proença, *Evolutionary computation in power systems*, PSCC Proceedings, Dresden, Germany, Ago./1996.

[**Mira00**] V. Miranda, M. Matos, J.P. Lopes, J. T. Saraiva, J.N. Fidalgo, M.T. Ponce de Leão, *Intelligent Tools in a Real-World DMS Environment*, IEEE 2000 Summer Meeting Proceedings, Seattle, USA, 2000.

[**Mont85a**] A. Monticelli, F. F. Wu, *Network Observability: theory*, IEEE Trans. PAS, Vol. PAS-102, no. 12, pp. 3769-3777, Dic./1983.

[**Mont85b**] A. Monticelli, F. F. Wu, *Network Observability: Identification of Observable islands and measurement Placement*, IEEE Trans. PAS, Vol. PAS-102, no. 12, pp. 3769-3777, Dic./1983.

[**Mont99**] A. Monticelli, *Power System state estimation: a generalized approach*, Kluwer Academic Press, 1999.

[**Mori99**] H. Mori, O. Matsuzaki, *A tabu search based approach to meter placement in static state estimation*, ISAO99, Rio de Janeiro, RJ, pp. 365-369, Abr./1999.

[**Park88**] Y. M. Park, Y. H. Moon, J. B. Choo, *Design of reliable measurement system for state estimation*, IEEE Trans. PS, vol. III, no. 3, pp. 830-836, Ago./1988.

[Phua77] K. Phua, T. S. Dillon, *Optimal choice of measurements for state estimation*, Power Industry Computer Applications Conference (PICA), Toronto, Canada, pp. 431-441, May./1977.

[Ricc99b] O. F. Ricciari, D. M. Falcão, *A meter placement for state estimation using genetic algorithms*, *Intelligent System Application to Power Systems (ISAP)*, Rio de Janeiro, RJ, pp. 360-364, Abr./1999.

[Sarm94] N. D. R. Sarma, V. Veera Raju, K. S. Prakasa Rao, *Design of telemetering configuration for energy management systems*, IEEE Trans. PS, vol. 9, pp. 381-387, Feb./1994.

[Schw70] F.C.Schwepe, J. Wilder, *Power system static state estimation*, IEEE Trans. PAS, vol. PAS-89, pp.120-135, Ene./1970.

[Simo90] A. Simões-Costa, T. S. Piazza, A. Mandel, *Qualitative methods to solve qualitative problems in power system state estimation*, IEEE Trans. Ps, vol. 5, pp. 941-949, Ago./1990.

[Srin96] D. Srinivasan, F. Wen, C. S. Chang, A. C. Liew, *A survey of applications of evolutionary computing to power system state estimation*, IEEE Trans. PS, vol. 5, pp. 941-949, Ago./1990.

[Souz03] J. C. S. Souza, M. B. Do Coutto Filho, E. M. Meza, M. Th. Schilling, *Optimal meter placement for reliable state estimation*, Proc. 12th Intelligent Systems Application to Power Systems Conf. (ISAP'03). On PS, vol., pp 1700-1708, Ago./2003.

[Souz05] J. C. S. Souza, M. B. Do Coutto Filho, E., M. Th. Schilling, Ch. Capdeville, *Optimal metering systems for monitoring power networks under multiple topological scenarios*, IEEE Trans. PS, vol.20, pp 1700-1708, Nov./2005.

[Souz96] J. C. S. Souza, A. M. Leite da Silva, A. P. Alves da Silva, *Data visualization and identification of Anomalies in power system state estimation using artificial neural networks*, IEEE Trans. PS, vol. 11, p 1592-1599, Ago./ 1996.

[Wu90] F. F. Wu, *Power system state estimation: a survey*, Electrical Power & Energy System, vol. 12, pp. 80-87, Ene./1990.