

UNIVERSIDAD AUTONOMA DE NUEVO LEON
FACULTAD DE INGENIERIA MECANICA Y ELECTRICA
DIVISION DE ESTUDIOS DE POSTGRADO



**DETECCION E IDENTIFICACION DE ERRORES
TOPOLOGICOS MEDIANTE UNA TECNICA
DE ESTIMACION DE ESTADO GENERALIZADA**

TESIS
**EN OPCION AL GRADO DE MAESTRO EN CIENCIAS
DE LA INGENIERIA ELECTRICA CON
ESPECIALIDAD EN POTENCIA**
PRESENTA:
ERIK TARANGO BLANCO

SAN NICOLAS DE LOS GARZA, N. L.

JUNIO 2002

DETECCION E IDENTIFICACION DE ERRORES

E T B

TOPOLOGICOS MEDIANTE UNA TECNICA

DE ESTIMACION DE ESTADO GENERALIZADA

TM

Z5853

.M2

FIME

2002

T3

2002



1020147936

972521

TM
258-3
.M2
+ MC
2002
.13



FONDO
TESIS

UNIVERSIDAD AUTONOMA DE NUEVO LEON
FACULTAD DE INGENIERIA MECANICA Y ELECTRICA
DIVISION DE ESTUDIOS DE POSTGRADO



DETECCION E IDENTIFICACION DE ERRORES
TOPOLOGICOS MEDIANTE UNA TECNICA
DE ESTIMACION DE ESTADO GENERALIZADA

TESIS

REQUISITO AL GRADO DE MAESTRO EN INGENIERIA
DE LA INGENIERIA ELECTRONICA
ESPECIALIDAD EN POWER

PRESENTA:

ERIK TARANGO BLANCO

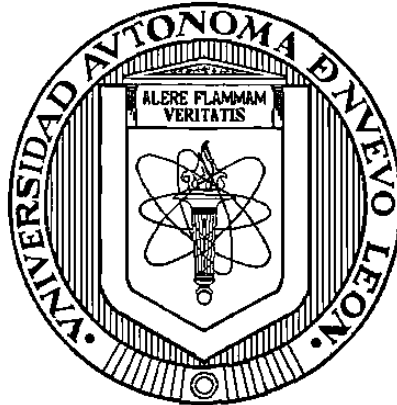
AL M. C. NICOLAS DE LOS GARZA, N. L.

JUNIO 2011

UNIVERSIDAD AUTONOMA DE NUEVO LEON

FACULTAD DE INGENIERIA MECANICA Y ELECTRICA

DIVISION DE ESTUDIOS DE POSTGRADO



**DETECCION E IDENTIFICACION DE ERRORES TOPOLOGICOS
MEDIANTE UNA TECNICA DE ESTIMACION DE ESTADO
GENERALIZADA**

TESIS

**EN OPCION AL GRADO DE MAESTRO EN CIENCIAS
DE LA INGENIERIA ELECTRICA CON
ESPECIALIDAD EN POTENCIA**

PRESENTA

ERIK TARANGO BLANCO

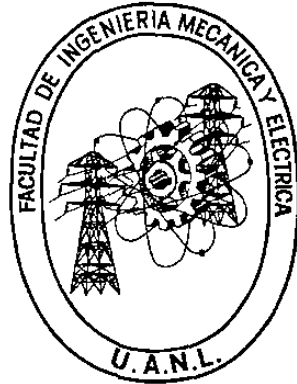
SAN NICOLAS DE LOS GARZA, N. L.

JUNIO, 2002

UNIVERSIDAD AUTONOMA DE NUEVO LEON

FACULTAD DE INGENIERIA MECANICA Y ELECTRICA

DIVISION DE ESTUDIOS DE POSTGRADO



**DETECCION E IDENTIFICACION DE ERRORES TOPOLOGICOS
MEDIANTE UNA TECNICA DE ESTIMACION DE ESTADO
GENERALIZADA**

TESIS

**EN OPCION AL GRADO DE MAESTRO EN CIENCIAS
DE LA INGENIERIA ELECTRICA CON
ESPECIALIDAD EN POTENCIA**

PRESENTA

ERIK TARANGO BLANCO

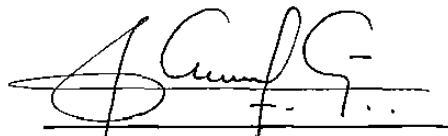
SAN NICOLAS DE LOS GARZA, N. L.


JUNIO, 2002


Universidad Autónoma de Nuevo León
Facultad de Ingeniería Mecánica y Eléctrica
Subdirección de Estudios de Postgrado

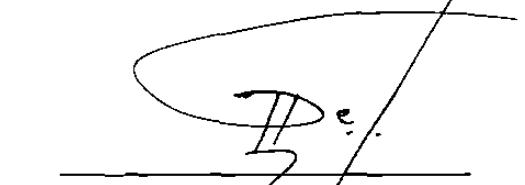
Los miembros de comité de tesis recomendamos que la tesis **DETECCION E IDENTIFICACION DE ERRORES TOPOLOGICOS MEDIANTE UNA TECNICA DE ESTIMACION DE ESTADO GENERALIZADA**, realizada por el alumno Erik Tarango Blanco, matrícula 1069241, sea aceptada para su defensa como opción al grado de Maestro en Ciencias de la Ingeniería Eléctrica con especialidad en Potencia.

El Comité de Tesis


Asesor
Dr. Florencio Aboytes García


Coasesor
Dr. Salvador Acha Daza


Coasesor
Dr. Rogelio Ramírez Barradas


Vo. Bo.
Dr. Guadalupe Alan Castillo Rodríguez
División de Estudios de Postgrado

DEDICATORIA

Dedico este trabajo a mis padres Gisela y Alberto quienes me han apoyado incondicionalmente en las decisiones que he tomado, les agradezco inmensamente su confianza y apoyo incondicional. Dedico también este trabajo a mis hermanos Alberto y Fabián por su apoyo en todo momento.

AGRADECIMIENTOS

Al Dr. Florencio Aboytes García por su asesoría y valiosos comentarios en la realización de este trabajo.

Al Dr. Salvador Acha Daza y al Dr. Rogelio Ramírez Barradas cuyos comentarios y sugerencias contribuyeron a mejorar este trabajo.

A los profesores del Programa Doctoral que contribuyeron a mi formación como estudiante.

A mis compañeros y amigos de la maestría con quienes conviví dos años de mi vida. A Semi por su apoyo y amistad.

Al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología por el apoyo brindado durante la maestría.

Y a todas aquellas personas que me ayudaron de una u otra forma para lograr esta meta personal y profesional..... gracias

RESUMEN

Publicación No. _____

Erik Tarango Blanco, M.C. en Ingeniería Eléctrica

Universidad Autónoma de Nuevo León, 2002

Profesor Asesor: Dr. Florencio Aboytes Garcia

El tema central de la tesis es la detección, identificación y eliminación de cualquier tipo de error anormal presente en el proceso de estimación de estado en un sistema de potencia, pudiendo ser de medición, topológico y/o paramétrico.

Los estimadores convencionales tienen la capacidad de detectar e identificar errores de medición, esto, siempre y cuando se disponga de la redundancia de mediciones necesaria. En este trabajo se presentan algoritmos generalizados con capacidad de detectar, identificar y eliminar cualquier tipo de error anormal.

Para tener la capacidad de detectar cualquier tipo de error es necesario que los algoritmos utilizados en el estimador de estado sean generalizados. Para el caso del procesador topológico de redes, es necesario tener la capacidad de expandir cualquier subestación a un nivel nodo-interruptor manteniendo las demás subestaciones en forma compacta. Para el caso del estimador de estado se detalla la modelación de los estados de interruptores en forma exacta de manera de tener la posibilidad de verificar la compatibilidad del flujo de potencia con el estado del interruptor. En cuanto al algoritmo de detección e identificación de errores, se presenta la metodología para identificar como

error anormal cualquier tipo de error que provoque la afectación de los residuales de mediciones por arriba de un cierto límite dado para un nivel de probabilidad.

Una vez detectado el error y usando el impacto en los residuales ponderados normalizados, se presenta un algoritmo con la capacidad de identificar el tipo de error presente en el proceso de estimación, donde una vez identificado se tendrá la opción para su eliminación, usando el proceso de expansión de subestaciones o modelación exacta de interruptores.

El algoritmo de estimación utilizado está basado en la formulación de mínimos cuadrados ponderados (WLS) utilizando el método de Newton-Raphson, los algoritmos se diseñaron pensando en su utilización a futuro por lo que son aplicables para cualquier tipo de sistema.

Se hicieron pruebas a dos sistemas de potencia, uno de los cuales servirá para demostrar la modelación de interruptores, así como la expansión de subestaciones, el otro sistema es usado para validar la técnica empleada para la detección e identificación de errores anormales.

Al final de los análisis se llega a la conclusión de que el método propuesto para la detección e identificación de errores anormales funciona correctamente, siempre y cuando se cumplan las condiciones necesarias y las restricciones correspondientes.

INDICE

Dedicatoria		iv
Agradecimientos		v
Resumen		vi
1	INTRODUCCION	
1.1	Motivación	1
1.2	Resumen histórico	5
1.3	Estructura de la tesis	9
1.4	Aportaciones del trabajo de investigación	10
2	PROCESADOR TOPOLOGICO DE REDES	
2.1	Introducción	11
2.2	Sistema topológico expandido y compacto	12
2.3	Islas internas en subestaciones	15
2.4	Asignación de nodos de envío y recepción	19
2.5	Islas eléctricas energizadas	22
2.6	Activación de elementos	24
2.7	Formación de base de datos del sistema	27
2.8	Consecuencias de cambios de estado en interruptores	28
3	ESTIMADOR DE ESTADO GENERALIZADO	
3.1	Introducción	30
3.2	Estimación mediante mínimos cuadrados ponderados	31
3.3	Formulación matricial	35
3.4	Estimación no lineal	37
3.5	Estimación de estado generalizado	39
3.6	Modelación de interruptores	39
3.6.1	Modelación de impedancia cero	41
3.6.2	Modelación de impedancia infinita	43
3.6.3	Modelación de interruptor con estado desconocido	44
3.7	Algoritmo de estimación	48
4	DETECCION E IDENTIFICACION DE ERRORES GENERALIZADA	
4.1	Introducción	50
4.2	Factores probabilísticos	51
4.2.1	Indice J	51

INDICE (continuación)

4.2.2	Detección de errores anormales	52
4.3	Residuales	55
4.4	Identificación de errores	56
4.5	Impacto de errores en residuales normalizados	61
4.5.1	Errores de medición	62
4.5.2	Errores de topología	63
4.5.3	Errores de parámetros	64
4.6	Detección e identificación de errores	65
4.6.1	Detección e identificación de errores en topología	71
4.6.2	Detección e identificación errores de medición	78
4.6.3	Detección e identificación de errores en parámetros	80
5	SISTEMA DE PRUEBA	
5.1	Introducción	84
5.2	Estimación de estado con errores anormales	85
5.2.1	Estimación con errores anormales de medición	88
5.2.1.1	Errores anormales en dos mediciones	89
5.2.1.2	Aumento del flujo de potencia en 3 mediciones	93
5.2.2	Estimación de estado con errores en parámetros	98
5.2.2.1	Error del 20% en L2, 30% en L4 y 25% en L10	99
5.2.3	Estimación de estado con errores en topología	104
5.2.3.1	Apertura de línea 3	104
5.2.3.2	Error en línea 1 y línea 10	109
5.3	Errores de topología y de medición anormales	118
5.3.1	Error de 20σ en medidor 2 y error de topología en línea 7	118
5.3.2	Separación en dos islas de la subestación C	124
5.4	Resumen de pruebas	132
5.4.1	Inversión de flujo de potencia activa	133
5.4.2	Errores pequeños de medición	134
5.4.3	Errores en parámetros	136
5.4.4	Errores en topología	138
6	CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	
6.1	Conclusiones	139
6.1.1	Conclusiones del procesador topológico de redes	140
6.1.2	Conclusiones del estimador de estado generalizado	141
6.1.3	Conclusiones sobre la detección e identificación de errores	143
6.2	Recomendaciones a trabajos futuros	146

INDICE (continuación)

REFERENCIAS		147
INDICE DE TABLAS		152
INDICE DE FIGURAS		154
APENDICE A	Deducción de ecuaciones de flujo de potencia	157
APENDICE B	Formación de matriz Jacobiana	162
APENDICE C	Tablas de Probabilidad	170
APENDICE D	Observabilidad	176
APENDICE E	Configuración de sistema de prueba 2	184

CAPITULO 1

INTRODUCCION

1.1 Motivación

Todo sistema eléctrico requiere contar con un centro de control para operar el sistema en condiciones óptimas de seguridad y calidad, mediante la supervisión y el control de las variables clave.

En este proceso de control, es necesario contar con operadores calificados y con un amplio conocimiento del sistema eléctrico para en caso de ser necesario, tomar las medidas correctivas con el fin de mantener al sistema operando en todo momento.

Como apoyo para la toma de decisiones, en los centros de control se requiere contar con información necesaria acerca de niveles de generación, demanda, flujo de potencia, nivel de voltaje, frecuencia y otras variables relevantes del sistema.

La información del sistema a los centros de control se recibe a través de diferentes medidores ubicados a lo largo del mismo, cada uno de los cuales tiene cierta precisión, lo que indica que la medición obtenida no es exacta pero se ubica dentro de cierta tolerancia. Sin embargo, en condiciones anormales tales como pérdida de comunicación,

medidores dañados o en mal estado, la información de entrada a los centros de control puede contener errores anormales (de estado en interruptores, de medición o en parámetros de elementos), por lo que resulta necesario procesar y filtrar toda la información recabada, presentando al operador sólo información que ha sido validada, de esta forma la toma de decisiones estará basada en información confiable.

El proceso a través del cual se valida la información es conocido como *estimador de estado*, el cual basa su función en la redundancia de información, lo que permite realizar el procesamiento de la información, el filtrado de errores, y la detección e identificación de errores anormales.

La estimación de estado cobra hoy día una mayor relevancia debido a la tendencia de interconectar sistemas eléctricos de diferentes países o regiones con el fin de llevar a cabo transacciones de energía eléctrica, por lo que contar con información libre de errores anormales es de vital importancia.

En los estimadores convencionales usualmente sólo se detectan e identifican errores anormales de medición, por lo que errores topológicos o paramétricos no es posible su identificación. En la mayoría de los casos los errores serían identificados como de medición, provocando con esto la eliminación de información correcta, reduciendo de esta manera la redundancia del sistema de medición.

Con base en lo anterior el tema de la tesis se centra en la detección e identificación de errores topológicos y paramétricos, aunado claro a errores de medición. Los errores topológicos son errores que no se presentan con frecuencia, pero dada la importancia, tanto técnica como económica del estimador de estado, éste debe ser capaz de detectar, identificar y posteriormente eliminar cualquier tipo de error para así proporcionar al operador del sistema información libre de cualquier error.

En la Figura 1.1 [33] se presentan en forma esquemática los pasos necesarios para construir un modelo del sistema eléctrico en tiempo real, donde el procesador

topológico, el estimador de estado y el procesamiento de datos anormales son abordados ampliamente en este trabajo.

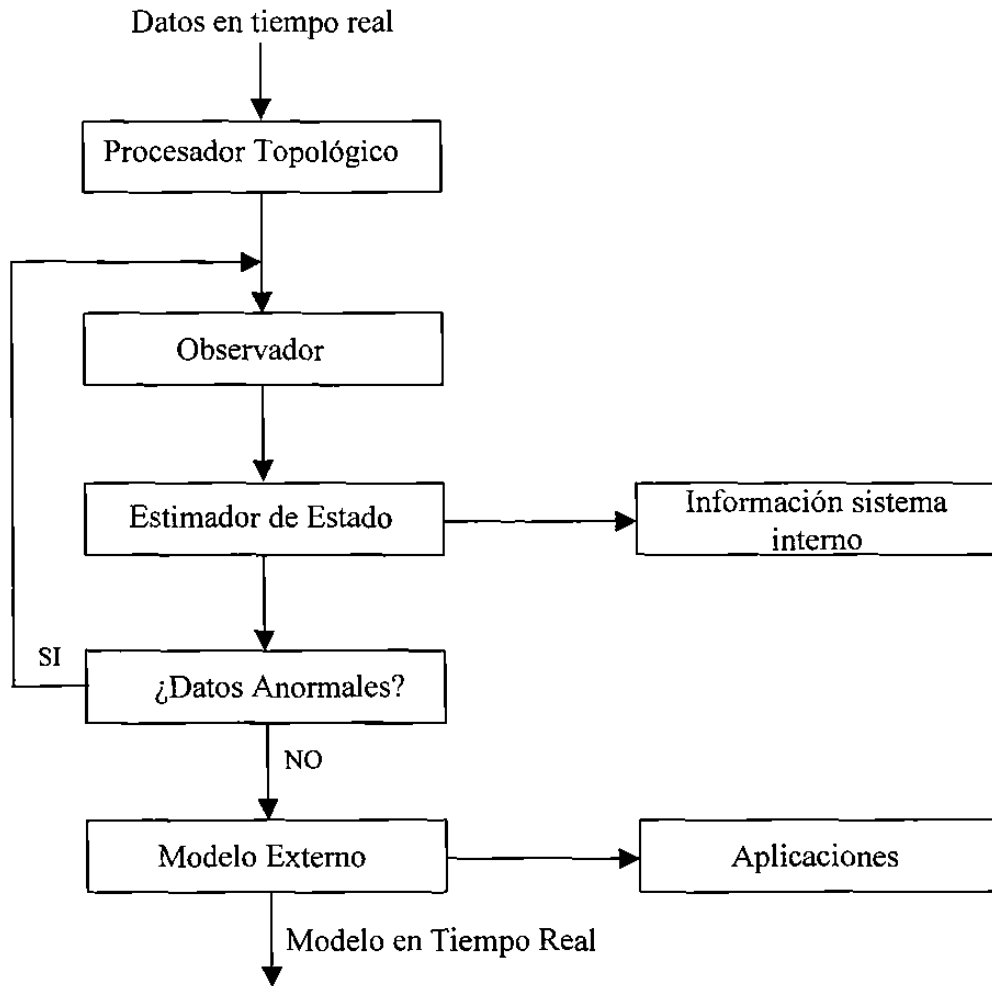


Fig. 1.1 Procesador de información

La Figura 1.2 [32] esquematiza la operación generalizada de un estimador de estado en un sistema de potencia. Se presenta como un sistema que recibe información, la procesa y genera una serie de resultados para validar la información empleada y para determinar las variables de estado del sistema de potencia.

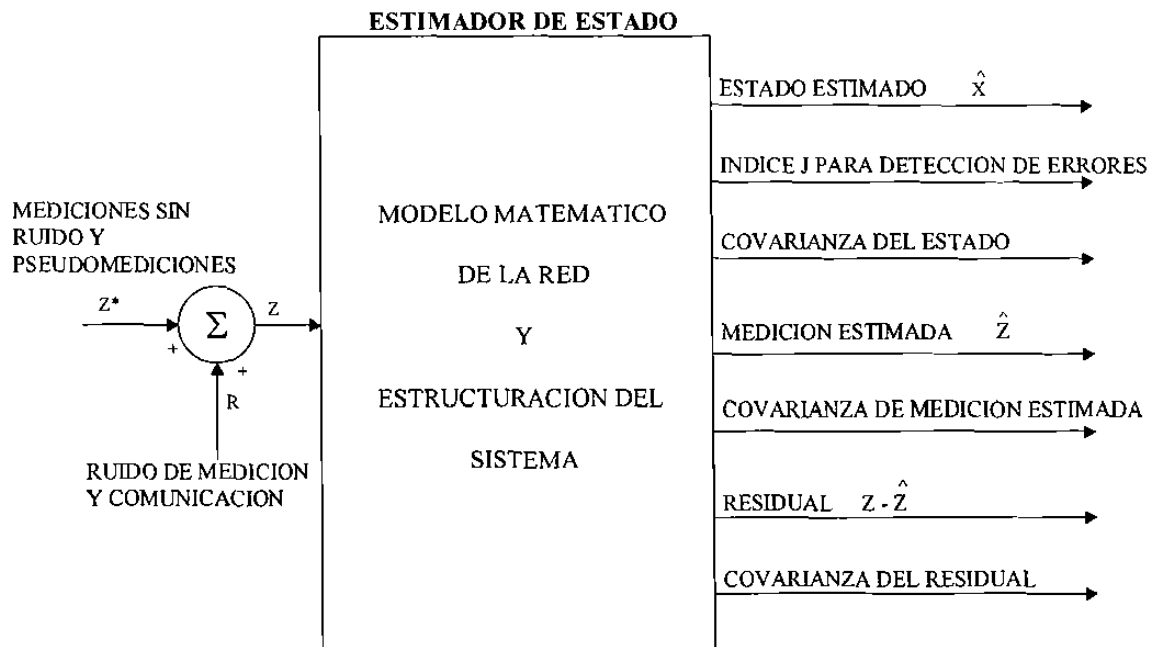


Fig. 1.2 Estimador de Estado

donde

- Z Conjunto de mediciones con ruido, generado en el proceso de toma y transmisión de lecturas en el sistema hacia el Centro de Control
- Z^* Representa las mediciones sin ruido. Sería el resultado de un esquema de medición y transmisión perfectos
- R Ruido de medición local y transmisión
- \hat{X} Estado estimado, consistente en la magnitud de voltaje y ángulos nodales, y en su caso flujos de potencia
- \hat{Z} Es la medición procesada. Si la redundancia proporcionada es suficiente se presenta un efecto de filtrado; siendo el error del estimado \hat{Z} menor que el del medido Z . Lo anterior se hace patente por el hecho de que \hat{Z} posea una menor varianza que la que tiene Z , para una adecuada estimación
- $Z - \hat{Z}$ representa el residual o diferencia entre la medición real y el valor estimado, usando el residual y su varianza como elementos de identificación de errores.

$J(\hat{X})$ Índice de sumatoria de cuadrado de residuales ponderados

1.2 Resumen histórico [33]

El problema de la estimación de estado en Sistemas de Potencia ha sido el tema de muchos trabajos desde finales de los años sesentas. El Profesor Schweppe, investigador del Instituto Tecnológico de Massachusetts (MIT), fue el primero en proponer y desarrollar la idea de estimación de estado para la supervisión de sistemas de potencia, dos grupos independientes también presentaron trabajos pioneros: American Electric Power Service Corporation (AEP) y Bonneville Power Administration (BPA). Desde entonces el tema ha llamado la atención de muchos investigadores de universidades, centros de investigación y la industria eléctrica.

En [1] Schweppe y Handschin presentan una de las primeras revisiones del estado del arte en la estimación de estado, esta revisión explora los avances hasta ese año. Muchos de los avances citados se refieren a la implementación de estimadores de estado, así como al desarrollo de nuevos algoritmos.

En los inicios de los setentas se establecieron los lineamientos generales para la solución por computadora digital de problemas relativos a la estimación de estado. Durante las últimas dos décadas se ha mejorado significativamente la formulación de mínimos cuadrados ponderados. Se han utilizado formulaciones más reducidas como la introducción del Estimador Desacoplado Rápido [13], así como técnicas más robustas que son menos sensibles al mal condicionamiento numérico y/o a datos anormales.

Schweppe introdujo la estimación de estado a los sistemas de potencia tratando de mejorar la supervisión de la seguridad de redes de transmisión en 1968 [4-6]. El concepto fue inmediatamente aceptado por la industria, aunque el método de solución propuesto no fue inmediatamente adoptado. Dos métodos alternativos fueron desarrollados. Dopazo et al. [7-8] usaron las mediciones de flujos en líneas y desarrollaron un método computacional más simple a través de transformaciones. Aun

cuando se presentaron aproximaciones en la derivación del método, el método fue implementado con éxito en el sistema de la AEP. Larson et al. [9-10] sugirieron el procesamiento secuencial de las mediciones redundantes y aplicaron la técnica del filtro de Kalman para la estimación. Después de varios años, ambos métodos fueron abandonados [13] y una versión modificada del método original de Schweppe es generalmente aceptada.

Entre los factores que hicieron los estimadores basados en la técnica de mínimos cuadrados ponderados (WLS) atractivos están: (i) el uso de técnicas para el manejo de matrices dispersas en la matriz de ganancia y (ii) el ahorro computacional con la formulación desacoplada rápida. Después de varios intentos recientes [11-15], García et al. [14] y Allemong et al. [13] realizaron de manera independiente pruebas exhaustivas para presentar una versión mejorada del método desacoplado rápido para la estimación de estado. Una justificación analítica de este método apareció recientemente [12]. En el mismo trabajo, Monticelli y García muestran que una versión ligeramente modificada es mejor. Estos desarrollos van a la par de las formulaciones de flujos desacoplados rápidos que han sido propuestas y probadas en años recientes.

Entre los investigadores que pusieron en relieve el problema del mal condicionamiento de las matrices en el problema de estimación de estado están: Aschmoneit et al [16] que incorpora las inyecciones cero como restricciones de igualdad en la formulación de estimación de estado. Gjelsvik et al. [17] proponen el uso del método de la matriz aumentada de Hachtel. También, Clements y colaboradores [18] y Quintana [19-20] han propuesto el uso de métodos más estables para la solución numérica del problema.

Merrill y Schweppe en 1971 sugirieron el uso de estimadores no-cuadráticos para la supresión de errores anormales [21]. Handschin et al [1] afectuaron un estudio exhaustivo sobre varios estimadores no-cuadráticos, así como de métodos para la detección e identificación de datos anormales. Irving et al [22] estuvo entre los primeros en proponer el estimador que utiliza la programación lineal para minimizar los valores

absolutos de residuales. Recientemente Mili et al. [23] reiniciaron el interés en los estimadores robustos.

Desde los inicios de la supervisión de redes en los setentas, se han desarrollado varios métodos para convertir la topología de la red expresada en secciones de barra e interruptores en un modelo expresado en barras y ramas. Algunos utilizan tablas lógicas y otros emplean la matriz de incidencia de la red. Sin embargo, en la actualidad el algoritmo basado en una búsqueda de árbol es el más utilizado [1-3].

En el campo de la observabilidad se han encontrado dos vías para atacar el problema: Observabilidad Topológica y Observabilidad Algebraica.

En la primera, Clements y Wollenberg [14] consideraron una red con mediciones de flujos en líneas e inyecciones de potencia. Posteriormente, en 1976 Horton y Masiello [15] partieron del desarrollo anterior pero utilizando una formulación desacoplada, Krumpholz y otros [24] en 1980 desarrollaron un algoritmo de carácter gráfico. En 1982 Quintana et al [25] propusieron otro algoritmo gráfico. En 1986 Slutsker et al [26] presentaron un algoritmo basado en la reducción simbólica de la matriz Jacobiana de medición.

El desarrollo de algoritmos algebraicos se inició en 1985 por Monticelli y Wu [27] teniendo una gran aceptación este tipo de algoritmos por su facilidad en la implementación.

En el campo de las técnicas para la detección e identificación de errores anormales, se pueden identificar tres tipos importantes: Identificación por eliminación de mediciones (IBE) en el que han trabajado Schweppe, Handschin, Broussolle, Aboytes y otros. [28-30]; Técnicas con un criterio no cuadrático (NQC) presentadas por Handschin, Merrill y Falcao entre otros. Una tercera opción basada en pruebas de hipótesis (HTI) ha sido utilizada por Mili, Van Cutsem y Ribbens-Pavella [31].

En primeras investigaciones la gente se enfocaba más en encontrar métodos robustos para la estimación de estado y no tanto en la detección de errores anormales, tales como los de topología, es a finales de los años ochentas cuando empiezan a surgir publicaciones [34] tratando el tema de detección e identificación de errores en topología. En 1988 K.A. Clements y P.W. Davis [34] proponen un método de detección e identificación por medio de una interpretación geométrica de los residuales modificados por el error, en el año de 1995 W-H. Edwin Liu et al [35] presentan una modificación a un método presentado en 1992 que resultaba útil pero difícil de implementar el cual para estimar los parámetros de la red ocupaba ciertos valores basados en sensibilidad; La modificación radica en considerar a los flujos como variables de estado en lugar de a los parámetros. En 1998 Kevin A. Clements et al [36] presentan un método basado en multiplicadores normalizados de Lagrange. L. Mili et al. presentan en 1999 [37] un método robusto donde los flujos de potencia son variables de estado de dos modelos desacoplados de potencia activa y reactiva mantienen para ambos una representación a detalle de las subestaciones.

En 1991 Monticelli et al. [38] proponen una técnica de modelación exacta de interruptores a través de la cual se hace posible la identificación de errores diferentes a los de medición, tales como los topológicos y paramétricos. A partir de esta modelación surgieron varios temas en donde se aprovechaba su uso [39-40], tal como la modelación exacta de subestaciones, dando origen a un nuevo concepto de observabilidad. La idea de ocupar estas modelaciones para la identificación de errores de topología consiste en poder expandir una subestación a nivel nodo-interruptor y verificar los flujos internos de la misma para así identificar al interruptores que estén provocando el error.

1.3 Estructura de la Tesis

En el Capítulo 1 se presenta una descripción general del uso de estimadores de estado en sistemas de potencia, así como la importancia de que la información proporcionada por el estimador esté libre de cualquier tipo de error. Se presenta un resumen de trabajos y su aportación en el proceso de estimación de estado y en la detección e identificación de errores. Finalmente se describe la estructura general del trabajo y se señalan las aportaciones más significativas del mismo.

En el Capítulo 2 se presenta el algoritmo para modelar la topología del sistema a través de un Procesador Topológico de Redes, el objetivo es proporcionar información de conectividad de elementos activos del sistema, así como una base de datos de los elementos activos en el sistema.

En el Capítulo 3 se presentan los fundamentos del estimador de estado generalizado, se utiliza el método Newton-Raphson en la solución, el algoritmo es generalizado debido a que tiene la capacidad de modelar exactamente a los interruptores en cada subestación en sus diferentes estados.

El Capítulo 4 presenta las bases para la detección e identificación de diferentes tipos de errores anormales. Se realiza un análisis detallado del impacto en los residuales de los diferentes tipos de error (Topológico, Paramétrico y de Medición). Se evalúan las técnicas empleadas para su identificación y eliminación.

El Capítulo 5 presenta los resultados del proceso de estimación de estado en un sistema de potencia de prueba de 9 nodos y 11 líneas de transmisión, se analizan errores anormales de medición, errores topológicos (apertura de líneas y separación de subestaciones), y errores paramétricos, para comprobar que al final del proceso de eliminación el estimador de estado queda libre de cualquier tipo de error anormal.

En el capítulo 6 se presentan las principales conclusiones del trabajo y se detallan áreas para trabajos futuros.

1.4 Aportaciones del trabajo de investigación

- Se desarrolló un procesador topológico de redes generalizado que incluye la opción de expansión de subestaciones a nivel nodo interruptor, se considera a los interruptores como elementos activos, generando nodos eléctricos dentro de una subestación y creando una topología expandida.
- Se desarrolló un algoritmo que a partir de la información proporcionada por el procesador de redes hace posible la modelación exacta de interruptores, eliminando con esto problemas de mal condicionamiento, y teniendo como principal ventaja identificar al interruptor(es) fallados en caso de errores topológicos, lo cual es posible a través de expandir la subestación afectada.
- Se presenta el resultado de la investigación sobre el impacto de los diferentes tipos de error en los residuales de las mediciones.
- Se propone un método para llevar a cabo la identificación de los diferentes tipos de errores a partir del impacto en los residuales.
- Se presenta una metodología generalizada a partir de la cual se pueden detectar, identificar y eliminar cualquier tipo de error anormal.

CAPITULO 2

PROCESADOR TOPOLOGICO DE REDES

2.1 Introducción

Todo sistema eléctrico se compone de una gran variedad de elementos donde cada uno realiza alguna función específica, entre los más comunes pueden mencionarse las líneas de transmisión, generadores, transformadores y cargas. La conexión de los elementos dentro del sistema determinará su topología.

Los elementos se conectan al sistema mediante interruptores, de esta forma mediante el estado del interruptor (abierto o cerrado) se activarán o desconectarán los elementos. Una vez conocidos los elementos activos será posible llevar a cabo la configuración topológica del sistema.

El cambio en el estado de interruptores puede deberse a diferentes factores, los cuales se clasifican como *programados o aleatorios*. Los primeros son debidos a las acciones normales de la operación del sistema (maniobras, licencias, mantenimientos,

etc), los segundos son debidos a la acción de alguna protección o a fallas del mismo interruptor.

El objetivo principal de un Procesador Topológico de Redes es determinar la topología de un sistema basado en la información del estado interruptores en todo el sistema.

Debido a la aleatoriedad de las fallas, la topología del sistema puede variar en un momento, por lo que es necesario que el procesador sea capaz de actualizar la configuración del sistema al momento de detectar un cambio en el estado de algún interruptor, esto, siempre y cuando el cambio altere la topología del sistema.

Para que el Procesador pueda llevar a cabo su tarea es necesario que la información sea proporcionada a nivel nodo-interruptor, esto es, que el sistema sea modelado partiendo de la ubicación y estado de cada interruptor dentro de las subestaciones y la conexión de cada elemento a nivel nodo interno.

2.2 Sistema topológico expandido y compacto

Un procesador de redes requiere como información la ubicación de cada interruptor, medidor, línea de transmisión, generador, carga y demás elementos existentes en el sistema, y para cada uno de ellos se deben proporcionar los valores correspondientes (flujos, parámetros, voltajes, etc.).

Un procesador convencional al analizar la configuración de un sistema a nivel nodo-interruptor, Figura 2.1, tiene como objetivo el "*unir*" aquellos nodos internos (de cada subestación) en donde se tenga una conexión mediante un interruptor cerrado (mismo nivel de voltaje), dando lugar a una pérdida en el detalle de la conexión interna en las subestaciones y teniendo como efecto la reducción de la información proporcionada por el sistema para su utilización en otras aplicaciones.

Los procesadores convencionales no requieren información de la configuración interna de cada subestación, asumiendo que la información del estado de interruptores no contiene errores.

La Figura 2.1 muestra a detalle para cada subestación el estado y la ubicación de cada interruptor, así como la conectividad de los elementos activos. La configuración de los sistemas que cuenten con este nivel de detalle se les conoce como *sistemas topológicos expandidos*.

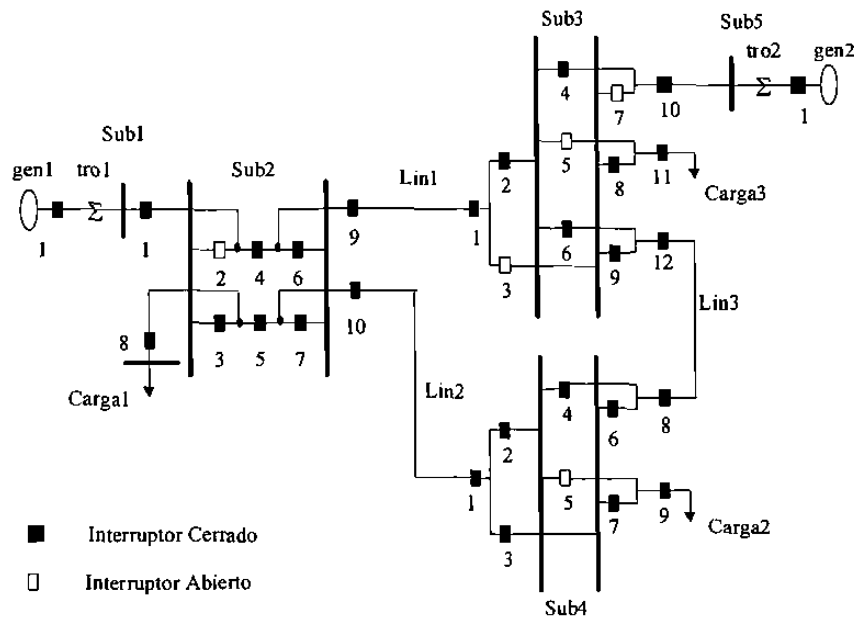


Fig. 2.1 Sistema a nivel nodo-interruptor

Al momento que el procesador topológico lleva a cabo la unión de los nodos internos con un mismo nivel de voltaje, se crea una configuración topológica conocida como *sistema topológico compacto*.

La Figura 2.2 muestra en forma compactada la configuración de la Figura 2.1.

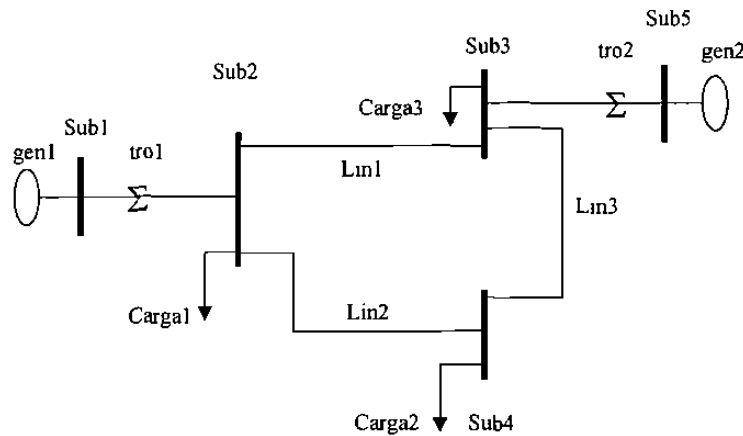


Fig. 2.2 Sistema Compacto

El nivel de detalle de la Figura 2.2 anterior es el normalmente utilizado para realizar diversos estudios en los sistemas de potencia.

En un estimador convencional el sistema compacto es el comúnmente utilizado para llevar a cabo el estudio, la suposición es que la topología del sistema corresponde siempre con los valores de la medición, esta suposición, aunque válida para la mayoría de los casos elimina la posibilidad de corregir errores anormales de topología.

Es de notarse que los algoritmos convencionales tendrían la capacidad de detectar errores anormales, pero serían incapaces de eliminarlos; para eliminarlos es indispensable contar con un procesador capaz de expandir una subestación a nivel nodo-interruptor.

Los pasos necesarios para formar la topología de un sistema a partir del estado y ubicación de los interruptores son:

- *Detección de islas eléctricas*
- *Asignación de nodos*
- *Activación de elementos*
- *Formación de Matriz de conectividad*
- *Formación de una base de datos de todos los elementos del sistema, activos o no.*

2.3 Islas internas en subestaciones.

El primer paso para llevar a cabo la configuración de un sistema es analizar la conexión y estado de los interruptores en cada subestación, a partir de lo cual se podrá determinar la existencia de islas internas.

En la Figura 2.1, la configuración y estado de los interruptores condujo a que *todos* los nodos internos en cada subestación estuviesen interconectados, formando un nodo eléctrico y llevando al sistema a una configuración compacta.

Es posible que bajo ciertas combinaciones en los estados de los interruptores algunos nodos internos de una subestación no estén conectados con el resto, provocando la creación de dos o más islas internas en la subestación, Figura 2.3. Cada isla interna tiene como característica contar con un valor de voltaje diferente debido a la configuración del sistema y al cambio en las trayectorias de flujo.

A continuación se mostrará un caso donde debido al cambio en el estado de un interruptor se crean dos islas internas en una subestación:

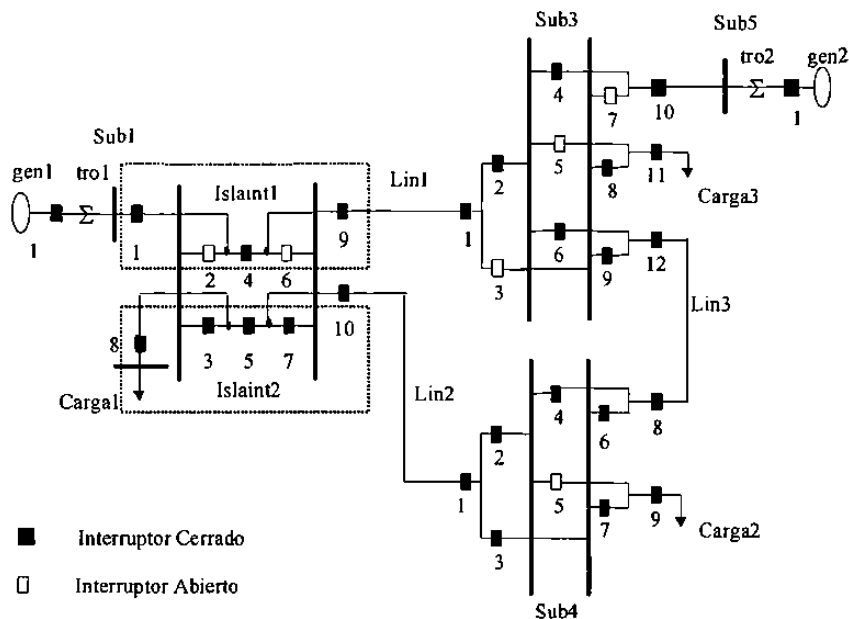


Fig. 2.3 Islas Internas a nivel nodo-interruptor

La subestación (Sub2) de la Figura 2.2 se separó debido al cambio en el estado del interruptor 6 (Figura 2.3). La isla interna *Islaint2* quedó compuesta de los nodos internos 2, 5, 6, 7, 8 y 10 y la isla interna *Islaint1* de los nodos internos 1, 3, 4 y 9, Figura 2.5, donde cada isla cuenta con un valor de voltaje diferente.

Al separarse la subestación Sub2, se provocó que las características operativas del sistema cambiaran radicalmente pasando de un sistema en anillo a un sistema radial.

El procesador debe detectar e identificar estas islas, teniendo como tarea modificar la base de datos correspondiente a la ubicación de los elementos para que la topología del sistema corresponda al estado actual de los interruptores. El sistema compactado de la Figura 2.3 se muestra en la Figura 2.4.

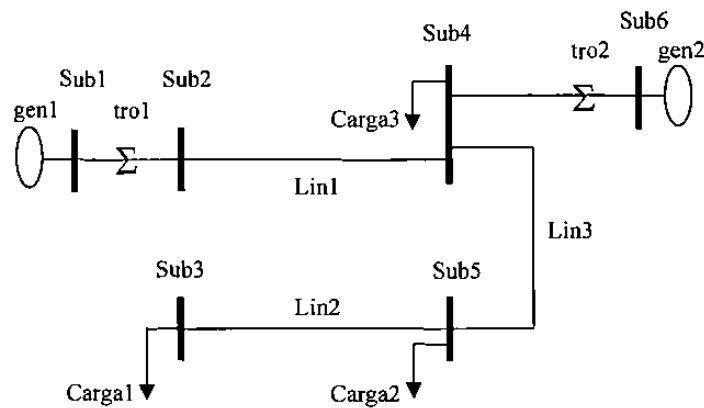


Fig. 2.4 Sistema compacto con islas internas

A continuación se presenta el procedimiento para que procesador de redes detecte la existencia de islas internas en subestaciones, para lo cual se enfocará la atención en la subestación Sub2 de la Figura 2.2.

La Figura 2.5 muestra el estado y ubicación de los interruptores así como el de los nodos internos.

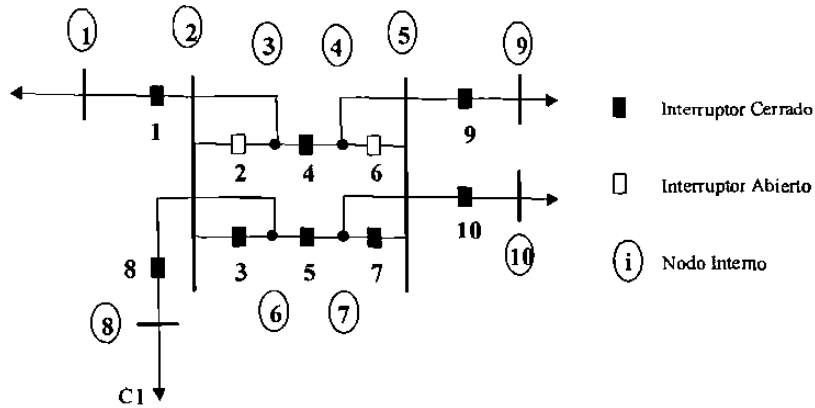


Fig. 2.5 Subestación Sub2

Para la detección de islas eléctricas internas es necesario contar con la información de conectividad de las subestaciones partiendo únicamente del estado y ubicación de los interruptores.

Algoritmo para detección de islas internas:

El primer paso en la detección consiste en ubicar al primer interruptor “cerrado” de la base de datos correspondiente a la subestación, asignando el número “1” a los nodos internos a los cuales esté conectado.

Al inicio de la detección todos los nodos internos tienen asignado un valor cero; un valor diferente implica que han sido activados, el número asignado corresponderá a la isla interna de la subestación en la que se encuentre el nodo interno. El segundo paso de la detección es iterativo, y dependerá del número de nodos internos de la subestación.

En el segundo paso se detectan uno a uno los interruptores cerrados de la base de datos, verificando si alguno de los nodos internos a los cuales esté conectado ha sido activado previamente; de ser así, al nodo restante se le asignará el mismo número que al nodo activado indicando con esto que están a un mismo valor de voltaje. En caso de que ninguno de los nodos internos esté activado, el procesador asignará a estos nodos el número inmediato superior, que en este caso sería el 2, con lo cual se indicaría que están a otro valor de voltaje, ver Tabla 2.1.

1	1
2	2
3	1
4	1
5	2
6	2
7	2
8	2
9	1
10	2

Los renglones (1-10) en la primera columna representan los nodos internos de conexión, y los números dentro de la matriz indican a que isla interna está conectado el nodo.

Para el caso aquí presentado se detecta la existencia de dos islas internas en la subestación.

Tabla 2.1 Vector de islas internas

En caso de que el interruptor 6 de la Figura 2.5 estuviese cerrado, es fácil notar la formación de una sola isla interna, por lo que el vector correspondiente a dicha subestación sería unitario, implicando con esto que todos los nodos internos forman un solo nodo eléctrico con el mismo voltaje.

Durante la detección de islas internas, el procesador creará un vector de asignación para cada subestación el cual indicará el número de islas presentes y el número de isla al cual está asignado cada nodo interno. Al final del análisis estarán almacenados en una matriz (*busI*) los vectores de asignación de todas las subestaciones.

A continuación se presentan las matrices de asignación del sistema de la Figura 2.1 (Tabla 2.2) y de la Figura 2.3 (Tabla 2.3).

$$\begin{array}{l}
 1 \\
 2 \\
 3 \\
 4 \\
 5 \\
 6 \\
 7 \\
 8 \\
 9 \\
 10
 \end{array}
 \begin{bmatrix}
 1 & 1 & 1 & 1 & 1 \\
 1 & 1 & 1 & 1 & 1 \\
 1 & 1 & 1 & 1 & 1 \\
 & 1 & 1 & 1 & \\
 & 1 & 1 & 1 & \\
 & 1 & 1 & 1 & \\
 & 1 & 1 & 1 & \\
 & 1 & 1 & 1 & \\
 & 1 & 1 & & \\
 & 1 & 1 & &
 \end{bmatrix}$$

Tabla 2.2 Sistema con una sola isla por subestación

$$\begin{array}{l}
 1 \\
 2 \\
 3 \\
 4 \\
 5 \\
 6 \\
 7 \\
 8 \\
 9 \\
 10
 \end{array}
 \begin{bmatrix}
 1 & 1 & 1 & 1 & 1 \\
 1 & 2 & 1 & 1 & 1 \\
 1 & 1 & 1 & 1 & 1 \\
 & 1 & 1 & 1 & \\
 & 2 & 1 & 1 & \\
 & 2 & 1 & 1 & \\
 & 2 & 1 & 1 & \\
 & 2 & 1 & 1 & \\
 & 1 & 1 & & \\
 & 2 & 1 & &
 \end{bmatrix}$$

Tabla 2.3 Sistema con dos islas internas en una subestación

Las tablas anteriores se leen de la siguiente manera, las columnas de la matriz representan las subestaciones del sistema, donde el valor máximo de cada columna indica el número de islas internas en las subestaciones y los renglones representan los nodos internos de la subestación. Al ocupar la información de la Tabla 2.3, se observa que la subestación 2 (2ª columna de la matriz) está formada por dos islas internas, en donde los nodos 2, 5, 6, 7, 8 y 10 están asignados a la segunda isla y los nodos restantes a la primera, por lo que cada isla contará con un valor de voltaje diferente; las subestaciones restantes están formadas por una sola isla interna por lo que todos sus nodos internos están a un mismo valor de voltaje.

2.4 Asignación de nodos de envío y recepción

Una vez calculada la matriz de islas internas (*busI*) se asignan a los elementos del sistema los nodos de envío y recepción, a partir de lo cual se forma una matriz de conectividad (*M*), la cual contendrá la ubicación de todos los elementos del sistema estén o no activados.

Para formar la matriz *M*, la información referente a la conexión de los elementos debe ser a nivel nodo-elemento, la ubicación de cada elemento está dada a nivel nodo

interno de subestaciones (nodo-elemento), Suponiendo que los siguientes datos corresponden a la ubicación de cuatro elementos dentro de un sistema, la información de su conectividad debe proporcionarse de la siguiente manera:

$$M = \begin{bmatrix} \text{bus1}(1, 1) & 1 & \text{bus1}(2, 1) & 1 \dots \\ \text{bus1}(3, 1) & 1 & \text{bus1}(2, 2) & 2 \dots \\ \text{bus1}(3, 2) & 2 & \text{bus1}(1, 3) & 3 \dots \\ \text{bus1}(7, 2) & 2 & 2i & 1 \dots \end{bmatrix} \quad (2.1)$$

Como se aprecia, la construcción de la matriz M está basada en la información proporcionada por la matriz bus1 , la cual contiene información de la isla interna a la cual está asignado cada nodo interno en una subestación.

Se observa que en la tercera columna puede existir un valor $2i$, la cual es una constante que sirve para indicar que el elemento es una carga.

La información de la matriz M se interpreta de la siguiente manera: La primera columna corresponde a la *isla eléctrica del nodo eléctrico* (subestación) *de envío*, la segunda corresponde al *nodo eléctrico de envío*, la tercera a la *isla eléctrica del nodo eléctrico de recepción*, y la cuarta al *nodo eléctrico de recepción* del elemento. Al vaciar la información de la matriz bus1 en la matriz M , se contará con una matriz en donde se tiene la conectividad de *todos* los elementos del sistema a partir de su ubicación en las subestaciones a nivel nodo-interruptor, y a partir de su ubicación dentro del sistema a nivel nodo eléctrico.

A manera de ejemplo se ocupará la información de la tabla 2.2 (matriz bus1), vaciándose en (2.1) para la formación de la matriz M :

$$M = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 & 1 \dots \\ 1 & 1 & 1 & 2 \dots \\ 1 & 2 & 1 & 3 \dots \\ 1 & 2 & 2i & 1 \dots \end{bmatrix} \quad (2.2)$$

En este caso la información del elemento que corresponda al tercer renglón de la matriz indica que el *nodo de envío* del elemento se encuentra ubicado en la isla interna 1 de la subestación 2, y el *nodo de recepción* en la isla interna 1 de la subestación 3; para el caso del elemento del cuarto renglón se tiene que se trata de una carga conectada en la isla interna 1 de la subestación 2.

En (2.2) sólo se muestra la ubicación de los elementos dentro del sistema pero no los valores relevantes del elemento, que en una línea de transmisión serían los parámetros (R , X , $Y/2$), para generadores la potencia activa y potencia reactiva, para transformadores la impedancia, para cargas la potencia activa y potencia reactiva, y para medidores los valores de flujo correspondientes o magnitudes de voltaje. Estos valores se almacenan en la matriz M aumentando columnas a la misma, dentro de estas columnas existe una asociada al estado de los elementos, a través de la cual es posible controlar su activación o desactivación; esta opción es de gran interés al momento de modelar cierto tipo de interruptor.

En este trabajo se consideran medidores independientes de potencia activa, potencia reactiva, y magnitud de voltaje, donde la información de conectividad, de valores y activación se introduce con el formato ya comentado. Para la asignación de nodos a los medidores se parte de la suposición de que cada medidor está colocado junto a un interruptor, Figura 2.6. Esta suposición tiene como fin utilizar la misma información de conectividad de los interruptores en los medidores.

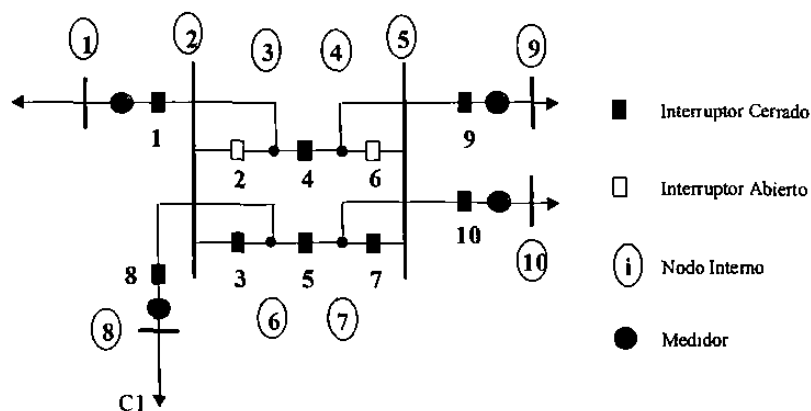


Fig. 2.6 Colocación de medidores

2.5 Islas eléctricas energizadas

En esta sección se analiza la forma de generar y tomar en cuenta las islas eléctricas energizadas a nivel sistema para el estudio de estimación de estado.

Estas islas se forman a partir de la separación de un sistema en dos o más sub-sistemas independientes, donde para que un sub-sistema pueda llamarse “*isla energizada*” es necesario que cuente con generación.

La separación de un sistema se debe al cambio en el estado de ciertos interruptores que provocan la salida total o parcial de elementos de conexión (transformadores, líneas de transmisión) o la separación de subestaciones que provocan a su vez la formación de islas a nivel de sistema. Al no existir conexión física entre sub-sistemas se tendrá que cada uno de ellos es independiente del otro, Figura 2.7. Al ser independiente un sub-sistema será necesario asignar un nodo compensador a cada uno.

A manera de ilustrar la formación de islas eléctricas energizadas, se modificarán algunos estados en los interruptores de la Figura 2.1, lo que provocará la separación del sistema en dos sub-sistemas, los cuales al contar con carga y generación podrán considerarse *islas eléctricas energizadas*. Las modificaciones a realizar se resumen en la Tabla 2.4 y son llevadas a cabo en la subestación Sub2.

Tabla 2.4 Cambios a los interruptores de la Figura 2.1

INTERRUPTOR	ESTADO	
	De	A
2	Abierto	Cerrado
4	Cerrado	Abierto
5	Cerrado	Abierto

En la Figura 2.7 se muestran los cambios llevados a cabo en la subestación Sub2.

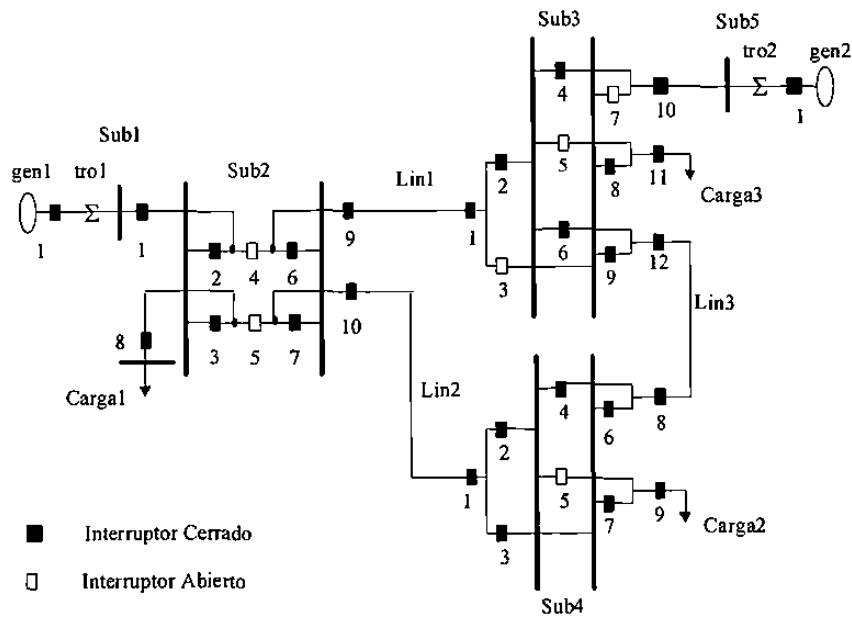


Fig. 2.7 Isla eléctrica a nivel nodo-interruptor

Para observar mejor los sub-sistemas creados se llevará el sistema expandido a nivel compacto, Figura 2.8.

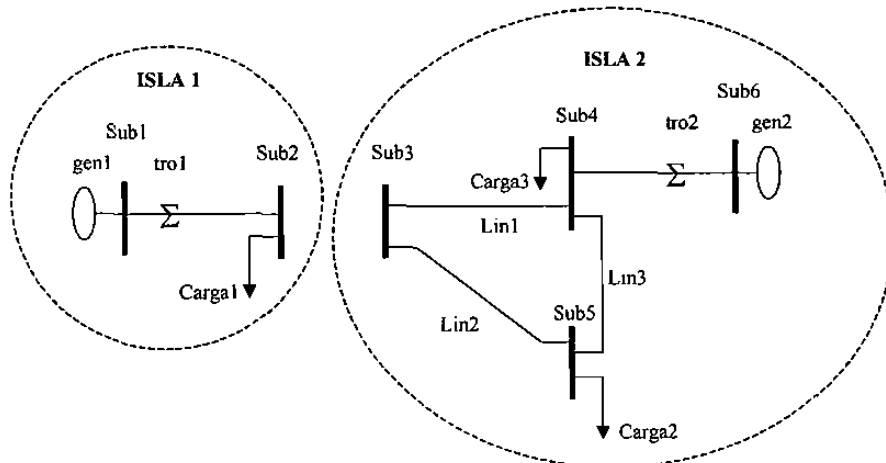


Fig. 2.8 Isla eléctrica en forma compacta

La Figura 2.8 muestra las islas creadas a partir de los cambios ya comentados, se observa que ambas islas son independientes, por lo que se asigna un nodo compensador a cada una de ellas.

Para este caso los cambios en los interruptores dieron lugar a sub-sistemas con generación y carga. Aunque la situación anterior es la ideal, no siempre se presenta, es posible que al modificar los estados en ciertos interruptores se tengan sub-sistemas en donde uno o varios sub-sistemas no cuenten con generación, en cuyo caso el procesador deberá eliminarlas.

Al momento de que un sistema se separa existirá un cierto desbalance entre la potencia de carga y generación en cada isla, lo anterior es debido a que en un sistema real es poco probable que la carga y generación estén distribuidas de manera uniforme a lo largo del mismo.

Existen casos documentados en donde la inestabilidad de los sub-sistemas provoca la formación de nuevas islas eléctricas, esto debido a la acción de las protecciones del sistema.

En teoría, el número máximo de islas eléctricas en un sistema es igual al número de generadores conectados, pero obviamente esto dependerá de la ubicación de generadores, cargas, de la interconexión del sistema y de factores tales como el tipo de arreglo en las subestaciones.

Hasta el momento se ha explicado la forma en que las islas eléctricas se crean, pero no se ha comentado la forma en que el algoritmo las detecta. La detección de este tipo de isla es a través de la conectividad de los *elementos activos* del sistema, ya que ellos determinarán la topología final del sistema, a partir de la cual se detectarán islas eléctricas energizadas.

2.6 Activación de elementos

Hasta el momento se han detectado e identificado islas internas en subestaciones y la forma en que islas eléctricas a nivel de sistema son creadas, también se ha formado una matriz de conectividad (M) pero no se han detectado a los elementos activos del sistema.

La matriz M cuenta con la información de todos los elementos del sistema sin importar su activación, por lo que no es válido ocupar esta información para la formación de la matriz de admitancia (Y_{bus}) del sistema. La matriz Y_{bus} debe contener a todos los elementos activos en un sistema energizado.

El uso de la Y_{bus} es prácticamente indispensable en estudios llevados a cabo a los sistemas eléctricos de potencia. En esta parte la matriz Y_{bus} servirá para detectar e identificar islas eléctricas energizadas, aunque para la estimación en general se ocupará como matriz de conectividad.

Como se ha mencionado la matriz Y_{bus} se forma con los elementos activos de un sistema energizado, a continuación se mostrarán los pasos para determinar si un elemento está activo o no.

El primer paso en la detección de elementos activos consiste en activar aquellos nodos eléctricos a los cuales esté conectado el primer generador de la matriz M , asignando a estos nodos un valor a través de un contador el cual asignará el número 1 al nodo de envío y el 2 al nodo de recepción; el algoritmo al momento de ir activando elemento por elemento construye una base de datos en donde se guarda el nombre del elemento, los valores correspondientes y los nombres de los nodos de envío y recepción; se forma además una matriz en donde se almacenan los valores asignados a los nodos de envío y recepción de cada elemento, que dependerán del orden en que fueron activados.

El segundo paso es similar al empleado para islas internas en subestaciones, con la diferencia que ahora se trata de elementos y no de interruptores, en la detección de islas en subestaciones se verificaba si alguno de los nodos internos correspondientes al siguiente interruptor cerrado estaba activado, y en caso de estarlo se asignaba el mismo número al nodo restante ahora, en lugar de asignar el mismo número al nodo restante se asigna el dado por el contador de nodos activos.

Al activar los nodos eléctricos a partir de un generador se facilita la detección de islas eléctricas en caso de existir, ya que la matriz de conectividad Ybus contará con ciertas características apreciables a simple vista, Figura 2.9.

Si al término de la primera activación el número de elementos activados no es igual al número de elementos existentes en la base de datos, y se detecta que existen generadores en los cuales ninguno de sus nodos ha sido activado se proseguirá con la activación de estos nodos, incrementando el contador y asignando su valor al nodo de envío, para posteriormente volver a incrementar el contador y asignar su valor al nodo de recepción del generador, siguiendo con la activación de los elementos que estén activados a estos nodos o que dependan en algún momento de estos. Este procedimiento se repite hasta activar todos los elementos del sistema o agotar los generadores con nodos inactivos.

Una vez terminada la activación de los elementos y asignación de valores a los nodos eléctricos, se contará con una base de datos a partir de la cual se formará la matriz Ybus del sistema.

Ybus Sistema A	0 0 0...0
	0 0 0...0
	.
	0 0 0...0
0 0 ...0	Ybus Sistema B
0 0 ...0	
0 0 ...0	

Fig. 2.9 Estructura de Ybus con islas eléctricas energizadas

En la Figura 2.9 se aprecia la existencia de islas eléctricas energizadas, se observa que la matriz Ybus está “*dividida*” en N^2 sub-matrices, donde N es el número de islas energizadas (2 en este caso).

La matriz Ybus estaría dividida de manera tal que las sub-matrices diagonales contienen la información de conectividad de cada sub-sistema existente, y las colocadas afuera de la diagonal estarían formadas exclusivamente por ceros.

Aunque aquí se representa la detección de una forma gráfica, el algoritmo detecta e identifica las islas eléctricas energizadas asignando cada una de estas a un vector diferente, en donde se colocan los nodos activos para cada isla teniéndose al final una matriz cuyas columnas corresponderán a las islas energizadas y los renglones contendrán los nodos activos pertenecientes a cada una de éstas.

Una ventaja de activar nodos eléctricos a partir de generadores es la asignación del nodo compensador para cada isla ya que el nodo compensador sería el colocado en el primer renglón de cada columna de la matriz. En caso de no haberse activado todos los elementos del sistema, el procesador eliminará aquellos no activados.

2.7 Formación de la base de datos del sistema

Como se ha mencionado, en un sistema existe una gran diversidad de elementos los cuales pueden o no estar activados, debido a lo cual es necesario contar con una base de datos donde se tengan señalizados todos los elementos inactivos del sistema.

Para los elementos activos del sistema, el procesador debe dar información acerca del sistema, tal como los nombres de sus nodos de envío y recepción, el nombre del elemento y sus parámetros característicos (impedancias para líneas de transmisión y transformadores, valores $Y/2$ para líneas de transmisión y potencias complejas para cargas y generadores)

El valor correspondiente a los medidores será la lectura obtenida en cada punto de medición.

Como dato adicional a la información de los elementos se debe contar con un listado de cada interruptor y su estado, con el cual el algoritmo tendrá la posibilidad de manipular la topología del sistema a través de modificar los estados en los interruptores.

Esta opción está dada en el algoritmo con la finalidad de modificar los estados de interruptores sin salir del programa de estimación.

2.8 Consecuencias de cambios en el estado de interruptores

Al modificar el estado de interruptores se debe tener cuidado de que el cambio no afecte la topología final del sistema, ya que esto provocaría que los valores de voltaje y flujos de potencia no correspondan con la nueva topología del sistema, produciendo así errores topológicos.

El algoritmo para determinar si hubo o no cambio en la topología final, compara el número de islas internas en cada nodo eléctrico antes y después del cambio en el estado del interruptor, si el número de islas internas es el mismo antes y después del cambio no se afectó la topología por lo que no será necesario modificar la base de datos ni la matriz de conectividad (Y_{bus}). En caso de que el número de islas sea diferente, el cambio modifica la topología siendo necesario actualizar la base de datos y la matriz Y_{bus} .

En sistemas topológicos expandidos se tiene información a detalle de la conexión y estado de los interruptores en cada subestación o nodo eléctrico, esta característica junto con técnicas de modelación de interruptores sirve para estimar flujos de potencia (P , Q) a través de los mismos.

Para llevar a cabo la estimación con topología expandida no es indispensable la presencia de medidores en los nodos internos de una subestación siempre y cuando el sistema sea observable [39], esto es, que se puedan estimar todas las variables sin llegar a singularidades numéricas durante la solución de la estimación.

El algoritmo presentado tiene la opción de expandir *un* nodo eléctrico a nivel nodo-interruptor manejando a los demás en forma compacta; lo anterior es debido a que durante el proceso de detección e identificación de errores la subestación se ha identificado y por tanto es innecesario expandir las demás subestaciones.

Para poder llevar a cabo lo anterior, es necesario hacer ciertos cambios en la matriz M , estos cambios tendrán como fin el que cada interruptor esté conectado ahora entre dos nodos eléctricos y no entre dos nodos internos, el hacer esto provoca que cada nodo al cual esté conectado un interruptor sea considerado como un nodo compacto. Una consecuencia de esta modificación, es el aumento significativo de nodos eléctricos. p. e., en la Figura 2.1, en el método compacto se tienen 5 nodos eléctricos, los cuales se convierten en 11 al momento de expandir el nodo 2, Figura 2.10.

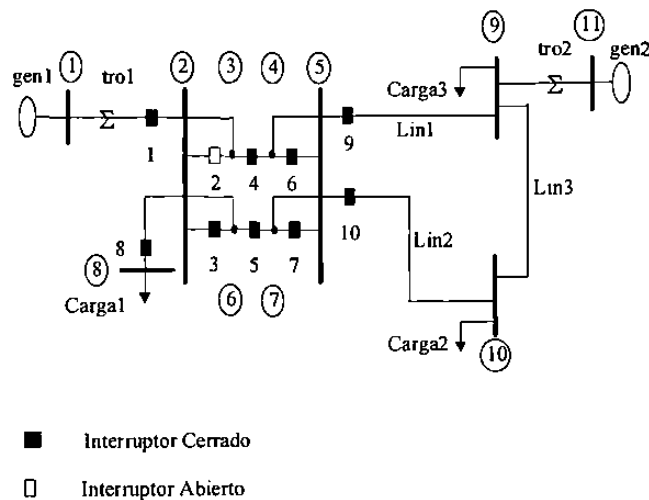


Fig. 2.10 Expansión de nodo eléctrico 2

Una vez que se ha modificado la matriz M , se continúa con la detección de islas, asignación de nodos, activación de elementos, etc., al igual que en el método compacto.

CAPITULO 3

ESTIMADOR DE ESTADO

GENERALIZADO

3.1 Introducción

La tarea principal de un estimador de estado consiste en validar la información del estado actual del sistema eléctrico y garantizar la obtención de una base de datos libre de error para ser empleada en tareas de control y operación de los sistemas, estas tareas son llevadas a cabo en los Centros de Control considerando los requisitos de redundancia y observabilidad en el sistema.

Un estimador realiza su tarea a través de *medir* diferentes variables eléctricas en diferentes puntos de la red, como no es factible por razones económicas medir todas las variables en todos los puntos de la red, se obtiene un *estimado* de aquellas variables sin medición a través de mediciones existentes en el sistema. Para llevar a cabo una buena estimación es necesario tener *redundancia*, esto es, se deben tener más mediciones que variables de estado, las cuales comúnmente son ángulos y voltajes nodales.

Un estimador generalizado tiene como característica principal el añadir como variables de estado los flujos de potencia activa y reactiva que circulan en algún elemento, y en caso de ser necesario agregar *pseudo-mediciones* (mediciones perfectas) a la modelación matemática. El añadir nuevas variables de estado y pseudo-mediciones hace posible la modelación exacta de interruptores, donde la característica principal radica en que el valor de impedancia de los elementos no es considerada durante el análisis.

Como se ha comentado para llevar a cabo una estimación de estado es necesaria la presencia de medidores los cuales por diseño tienen diferente grado de precisión. Dicha precisión debe estar incluida en la formulación matemática del problema, y la forma de lograrlo es a través de la desviación estándar que corresponda a la precisión de cada medidor, la cual contiene implícitamente un factor de peso que intervendrá en el proceso de estimación.

El peso específico asignado a cada medición afectará en forma importante al proceso de estimación, para aquellas mediciones con un peso alto (más precisas) su valor será tomado más en cuenta que el de aquellas con un peso menor. Las *pseudo-mediciones* al ser mediciones perfectas tienen asignado un peso muy grande, y son empleadas en aquellos nodos con inyección cero, esto es, en nodos donde no se tiene carga ni generación.

Debido a que los medidores tienen errores aleatorios el resultado dado por el estimador será probabilístico donde las variables de entrada son aleatorias y es probable obtener el valor esperado y un intervalo de confianza.

3.2 Estimación mediante mínimos cuadrados ponderados

La estimación en general, se refiere al procedimiento de encontrar uno o varios parámetros desconocidos de un sistema a partir de mediciones existentes en el mismo.

En la formulación del problema se parte de la idea de encontrar el mejor estimado posible de los parámetros desconocidos mediante un conjunto de mediciones redundante.

El objetivo de este método es minimizar la sumatoria al cuadrado de las diferencias ponderadas entre la medición actual z y el valor estimado de la medición \hat{z}

$$\text{Min } \sum \left(\frac{z - \hat{z}}{\sigma} \right)^2$$

Para la deducción de las ecuaciones de estimación se utilizará el Criterio de Máxima Probabilidad debido a que el factor de peso se obtiene de una manera sencilla [43].

Matemáticamente se puede modelar el sistema de medición de la siguiente manera:

Sea Z^m el valor medido. Sea Z^{ver} el valor verdadero de la cantidad medida, finalmente sea η el **error aleatorio** en la medición, con estas tres variables podemos representar el valor medido como:

$$Z^m = Z^{ver} + \eta \quad (3.1)$$

Se considera que la distribución de η es normal (Gaussiana), por lo que su función de **densidad de probabilidad** está definida por:

$$PDF(\eta) = \frac{1}{\sigma \sqrt{2\pi}} \exp(-\eta^2 / 2\sigma^2) \quad (3.2)$$

Donde σ es la desviación estándar, y σ^2 es la varianza del número aleatorio.

En la Figura 3.1, se observa que a medida que aumenta σ la medición se aleja del valor medio (cero en este caso), por lo que el medidor será menos preciso, en cambio, al

tener σ un valor pequeño implica que el error será menor (más cercano a la media) y por tanto será más preciso.

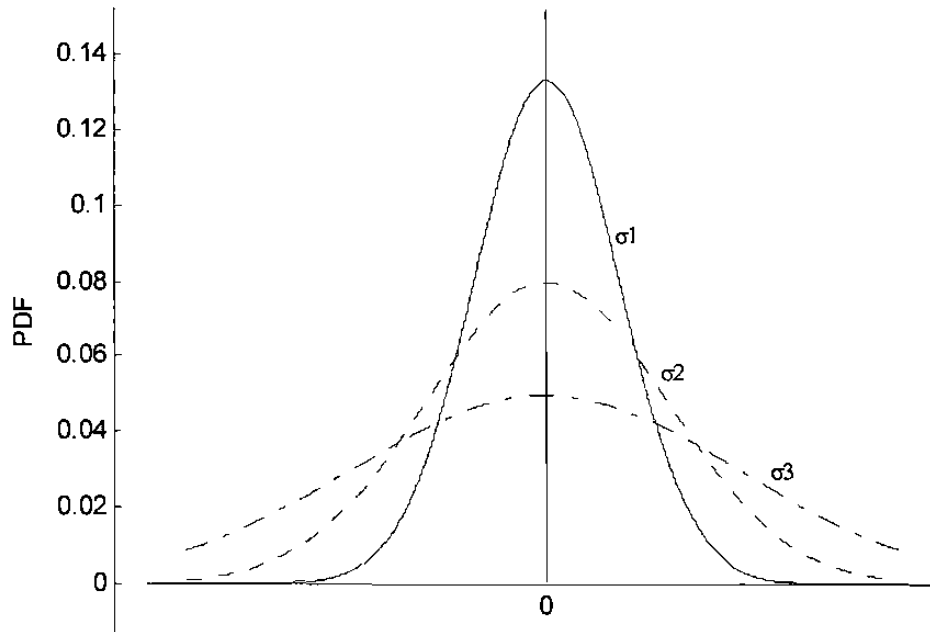


Fig. 3.1 Curvas normales para diferentes valores de σ y media cero

$$\sigma_1 < \sigma_2 < \sigma_3$$

Una vez que se tiene la ecuación de densidad de probabilidad y error aleatorio, se sustituye esta última en la primera dando como resultado:

$$PDF(z^m) = \frac{1}{\sigma \sqrt{2\pi}} \exp\left(-\frac{(z^m - z^{ver})^2}{2\sigma^2}\right) \quad (3.3)$$

donde z^{ver} es el valor que depende de una función dada a través de z , y σ es la desviación estándar para el error η

Si el objetivo es maximizar la probabilidad de que el estimado sea el correcto se tiene:

$$\max_x prob(z^m) = \max_x PDF(z^m) dz^m \quad (3.4)$$

Para simplificar operaciones se ocupará el logaritmo natural de $PDF(z^m)$, partiendo de que maximizar el logaritmo natural de $PDF(z^m)$ es igual a maximizar $PDF(z^m)$, por tanto:

$$\max_x \left[PDF(z^m) \right] \quad (3.5)$$

Ocupando la ecuación 3.3 y aplicando propiedades de logaritmos se tiene:

$$\max_x \left[-\ln(\sigma_i \sqrt{2\pi}) - \frac{(z_i^m - z^{ver})^2}{2\sigma_i^2} \right] \quad (3.6)$$

al ser el primer término constante se elimina, se observa que el segundo término está precedido por un signo negativo, donde el maximizar un número negativo es igual a minimizar un número positivo, por lo que la ecuación 3.6 será igual a:

$$\min_x \left[\frac{(z_i^m - z^{ver})^2}{2\sigma_i^2} \right] \quad (3.7)$$

Esta última ecuación indica la diferencia entre lo medido y lo verdadero, influenciado por la desviación estándar del medidor (peso específico)

Al llevar a cabo la sumatoria de la diferencia anterior, se tendrá al final un índice conocido como *Índice J* o *factor de utilización* que servirá como punto de comparación para determinar si es aceptable o no el estimado encontrado. El índice J está definido entonces como:

$$\min_x J(x) = \sum_{i=1}^{Nm} \left[\frac{z_i^m - f_1(x)}{\sigma_i^2} \right] \quad (3.8)$$

donde

f_i	=	Función que define el comportamiento de la i -ésima medición con respecto a las variables a estimar
σ_i^2	=	Varianza de la i -ésima medición
$J(x)$	=	Factor de utilización
N_m	=	Número de mediciones independientes
Z_i^m	=	i -ésima cantidad medida

Si se quieren estimar N_s parámetros desconocidos usando N_m medidores, se puede escribir:

$$\min_{\{x_1, x_2, x_3, \dots, x_{N_s}\}} J(x_1, x_2, x_3, \dots, x_{N_s}) = \sum_{i=1}^{N_m} \frac{[Z_i - f_i(x_1, x_2, x_3, \dots, x_{N_s})]^2}{\sigma_i^2} \quad (3.9)$$

Esta última ecuación es conocida como estimador de “**Mínimos Cuadrados Ponderados**”.

Esta ecuación será equivalente a la encontrada a través del criterio de mínimos cuadrados ponderados, siempre y cuando los errores aleatorios sean modelados con una distribución normal o Gaussiana.

3.3 Formulación matricial

La formulación matricial es ocupada debido a las ventajas computacionales que esta presenta.

Si $f_i(x_1, x_2, x_3, \dots, x_{N_s})$ son funciones lineales pueden escribirse como:

$$f_i(x_1, x_2, x_3, \dots, x_{N_s}) = f_i(x) = h_{i1}x_1 + h_{i2}x_2 + h_{i3}x_3 + \dots + h_{iN_s}x_{N_s} \quad (3.10)$$

que en forma matricial tendría la forma:

$$f(x) = \begin{bmatrix} f_1(x) \\ f_2(x) \\ \cdot \\ \cdot \\ f_{N_m}(x) \end{bmatrix} = [H] x \quad (3.11)$$

donde

$[H]$ = una matriz de (N_m, N_s) conteniendo los coeficientes de la función lineal $f_i(x)$.

N_m = Número de mediciones

N_s = Número de parámetros desconocidos a estimar (variables de estado)

Colocando las mediciones en un vector se tiene:

$$z^m = \begin{bmatrix} z_1^m \\ z_2^m \\ \cdot \\ \cdot \\ z_{N_m}^m \end{bmatrix} \quad (3.12)$$

Por lo que la ecuación 3.9 puede escribirse como:

$$\min_x J(x) = [z^m - f(x)]^T [R^{-1}] [z^m - f(x)] \quad (3.13)$$

donde

$$[R] = \begin{bmatrix} \sigma_1^2 & & & \\ & \sigma_2^2 & & \\ & & \ddots & \\ & & & \sigma_{Nm}^2 \end{bmatrix} \quad (3.14)$$

es la *matriz de covarianza* de errores de medición, o también matriz de ponderación.

Para minimizar se derivará la ecuación 3.13 con respecto a x dando como resultado:

$$\hat{x} = \left[[H]^T [R^{-1}] [H] \right]^{-1} [H]^T [R^{-1}] z^m \quad (3.15)$$

donde

$$\left[[H]^T [R^{-1}] [H] \right] \quad \text{es la matriz de ganancia } G.$$

La ecuación 3.15 es válida para sistemas lineales.

3.4 Estimación no lineal

El modelo no lineal de medición está definido por:

$$z = h(x) + e \quad (3.16)$$

Donde z es el vector de mediciones (dimensión m), x es el vector de variables de estado (dimensión n , donde $n < m$), h es un vector dado por una función no lineal de las mediciones (dimensión m) y e es el vector de error (dimensión m).

Las condiciones óptimas de primer orden aplicadas al índice J se definen como:

$$g(x) = \frac{\partial J(x)}{\partial x} \quad (3.17)$$

$g(x)$ denota el gradiente de $J(x)$. La solución a la ecuación no lineal $g(x) = 0$ es a través del uso del método de Newton Raphson donde la expansión en serie de Taylor es ocupada en dicha función para su linealización, la cual puede ser aproximada por:

$$g(x+\Delta x) \approx g(x) + G(x)\Delta x \quad (3.18)$$

donde $G(x)$ es la matriz Hessiana del índice $J(x)$.

$$G(x) = \frac{\partial^2 J(x)}{\partial x} = H^T(x) R_z^{-1} H(x) \quad (3.19)$$

y $H(x)$ es la matriz Jacobiana de $g(x)$.

La estimación de estado \hat{x} se realiza utilizando un procedimiento iterativo:

$$x^{n+1} = x^n + \Delta x^n \quad (3.20)$$

donde Δx^n está dado por:

$$\Delta x^n = \left[\left(H^T(x^n) R_z^{-1} H(x^n) \right) \right]^{-1} H^T(x^n) R_z^{-1} \Delta z(x^n) \quad (3.21)$$

$\Delta z(x^n)$ es el error entre el vector de medición y el vector estimado.

Las ecuaciones 3.20 y 3.21 son las utilizadas para llevar a cabo la estimación de estado considerando un modelo no lineal de medición.

En un estimador convencional las variables de estado son las magnitudes de los voltajes y ángulos de fase de los voltajes nodales.

3.5 Estimación de estado generalizado

Un estimador de estado generalizado cuenta con ciertas características que ayudan a la detección e identificación de errores anormales tales como topológicos o paramétricos que pudieran estar presentes en el proceso de estimación.

La característica principal de un estimador de estado generalizado radica en considerar como variables de estado no solo las magnitudes de los voltajes y los ángulos de fase de los voltajes nodales, sino también considerar como variables de estado a los flujos de potencia activa y reactiva que circulan a través de algún elemento del sistema tales como interruptores o líneas de transmisión.

El objetivo de considerar como variables de estado los flujos de potencia a través de elementos eléctricos, es con el fin de estimar los flujos internos en una subestación o estimar los parámetros de alguna línea de transmisión, para el primer caso el nivel de redundancia no se altera. Para llevar a cabo estas estimaciones es necesario añadir aparte de las variables de estado pseudo-mediciones al proceso de estimación, las cuales dependerán del tipo de modelación que se esté llevando a cabo.

3.6 Modelación de interruptores

En esta parte se explicará cómo se lleva a cabo la modelación de interruptores en sus diferentes estados (abierto, cerrado o desconocido) y se detalla la forma de eliminar los problemas de mal condicionamiento en la formación de la matriz de ganancia.

Uno de los problemas en la modelación de interruptores radica en el valor de impedancia del interruptor, ya que si el interruptor está cerrado se modelaría como una

impedancia cero que produce singularidad de la matriz de ganancia, simultáneamente si el interruptor está abierto se modela como impedancia infinita.

Una forma intuitiva de resolver este dilema sería asignando valores muy pequeños o muy grandes a las impedancias de los interruptores, sin embargo se debe conocer el rango de valores de impedancia para garantizar que la matriz de ganancia esté bien condicionada y que al mismo tiempo no se vea afectada la exactitud. Desgraciadamente no existe un valor que garantice lo anterior, por lo que se entraría en un proceso de prueba y error eligiendo al final el valor que mejor responda a la pregunta anterior.

En 1991 A. Monticelli y A. García [38] proponen la modelación exacta de interruptores a través de la cual se eliminan los problemas numéricos provocados por valores de impedancia extremos. Para llevar a cabo esta modelación es necesario crear nuevas variables de estado y añadir pseudo-mediciones en caso de ser necesario. Las modificaciones anteriores tienen la finalidad de **evitar la utilización de la impedancia del elemento en el proceso de estimación**, que es la idea básica detrás de estas modelaciones.

A través de la modelación exacta de interruptores se eliminan los problemas de indeterminación en la matriz de ganancia y con esto la necesidad de asignar valores extremos de impedancia.

Las variables de estado en el procedimiento generalizado serán los flujos de potencia a través de interruptor y la utilización de pseudo-mediciones para condicionar adecuadamente al problema.

En esta aplicación las pseudo-mediciones son condiciones matemáticas que siempre se cumplen en el circuito y por tanto no requieren mediciones que corroboren dicha información, por ejemplo, la sumatoria de potencias en un nodo sin carga y generación es siempre cero. El decir que son mediciones perfectas implica que tienen una desviación estándar σ muy pequeña.

En las modelaciones *de impedancia cero e infinita* el valor de redundancia no se ve afectado, ya que se aumentan la misma cantidad de variables de estado que de pseudo-mediciones, para el caso de modelación de interruptores con *estado desconocido* el nivel de redundancia sí se ve afectado debido a que no se aumentan pseudo-mediciones a la modelación.

Es necesario que el procesador topológico de redes proporcione información acerca de la conectividad y estado de los interruptores de la subestación seleccionada, junto con la conectividad de los demás nodos eléctricos en su forma compactada.

La matriz R es la encargada de almacenar la información relacionada con el peso específico asignado a cada una de las mediciones. Al observar la estructura de la ecuación 3.23 se aprecia que la matriz R debe ser invertida, por lo que el peso de las mediciones es el inverso del valor σ al cuadrado, ecuación 3.14. Para pseudo-mediciones el valor σ asignado es 1×10^{-4} y para mediciones comunes (flujo de Potencia por ejemplo) el valor σ es igual a 0.05.

3.6.1 Modelación de impedancia cero

Como se ha mencionado, un interruptor cerrado se modela con una impedancia cero al paso del flujo de potencia, por lo que se presentan errores numéricos al ocupar técnicas tradicionales en su modelación.

Al utilizar la modelación exacta en interruptores cerrados, las nuevas variables de estado a estimar serán los flujos de potencia P_{kl} y Q_{kl} que pasan a través de cada interruptor, y las pseudo-mediciones a ocupar serán:

diferencias de ángulos de fase ($\delta_k - \delta_l$) igualadas a cero.

diferencias de magnitud voltaje ($V_k - V_l$) igualadas a cero.

Estas pseudo-mediciones fueron elegidas debido a que en una subestación los nodos internos conectados a un interruptor cerrado tienen el mismo voltaje, lo cual es cierto aún cuando no se tenga un medidor que corrobore lo anterior.

Con las nuevas variables de estado y pseudo-mediciones, las ecuaciones a utilizar por el estimador serán:

Para flujos de potencia en ramas con impedancia cero:

$$P_{kl}^m = P_{kl} + \eta_{P_{kl}} \quad (3.22)$$

$$Q_{kl}^m = Q_{kl} + \eta_{Q_{kl}} \quad (3.23)$$

Para inyecciones nodales en donde se incluyen ramas normales (k, j) y ramas con impedancia cero (k, l) :

$$P_k^m = \sum P_{kj} + P_{k1} + \eta_{P_k} \quad (3.24)$$

$$Q_k^m = \sum Q_{kj} + Q_{k1} + \eta_{Q_k} \quad (3.25)$$

$$P_l^m = \sum P_{lj} + P_{l1} + \eta_{P_l} \quad (3.26)$$

$$Q_l^m = \sum Q_{lj} + Q_{l1} + \eta_{Q_l} \quad (3.27)$$

Las pseudo-mediciones ocupadas para esta modelación:

$$\Delta\delta_{k1} = \delta_k - \delta_1 = 0 \quad (3.28)$$

$$\Delta V_{kl} = V_k - V_l = 0 \quad (3.29)$$

donde

P_{kb} , Q_{kb} , δ_k , δ_b , V_k , V_b , P_k y P_l representan el valor verdadero, el superíndice m indica valores medidos, y las variables η representan errores en la medición. La matriz Jacobiana se modifica con respecto a las consideraciones mencionadas (Apéndice 2).

En la Figura 3.2 se resumen las modificaciones a realizar en esta modelación

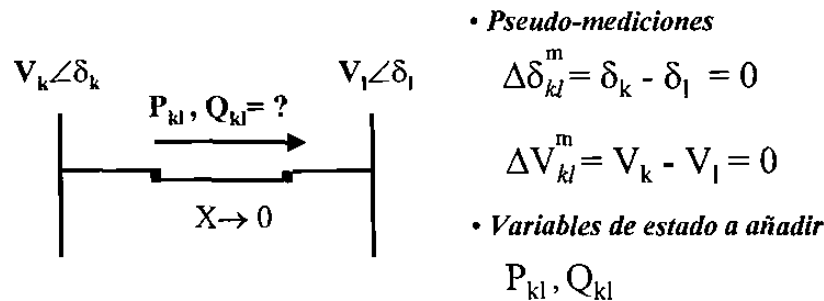


Fig 3.2 Modelación de interruptor cerrado

3.6.2 Modelación de impedancia infinita

La idea para este tipo de modelación es similar a la de impedancia cero, esto es, que la impedancia del elemento no sea considerada durante el análisis. La diferencia entre este modelo y el anterior radica en las pseudo-mediciones a utilizar, pero en lo referente a variables a estimar, mediciones de flujos de potencia a través de líneas y transformadores e inyecciones nodales, las ecuaciones (3.22 a 3.27) siguen siendo válidas.

Para este tipo de modelación las pseudo-mediciones a ocupar serán:

$$P_{kl}^m = P_{kl} = 0 \quad (3.30)$$

$$Q_{kl}^m = Q_{kl} = 0 \quad (3.31)$$

Ya que al tener un interruptor abierto el único dato conocido es el flujo de potencia a través del interruptor igual a cero.

La Figura 3.3 muestra en resumen las modificaciones a realizar

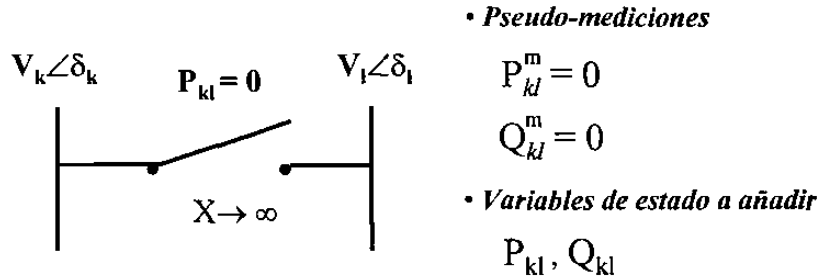


Fig. 3.3 Modelación de interruptor Abierto

3.6.3 Modelación de interruptor con estado desconocido

Esta modelación difiere de las anteriores al no requerir pseudo-mediciones en la modelación, esto debido a que no es válido hacer suposición alguna acerca de la distancia eléctrica entre nodos o del flujo a través del elemento. En la modelación se aumentan variables de estado teniendo como consecuencia un nivel de redundancia menor.

El empleo de esta modelación es con la finalidad de estimar los parámetros (R , X y $Y/2$) de una línea de transmisión, esto cuando se sospeche que uno o varios de estos parámetros contienen errores anormales. En este caso los flujos *de envío y recepción* de potencia activa y reactiva del elemento son tomados como variables de estado.

Una vez que se obtienen los flujos de potencia y voltajes nodales estimados será posible encontrar el valor de los parámetros. En el cálculo se utilizan cuatro ecuaciones de flujo (envío y recepción de P y Q) y tres incógnitas (R , X y $Y/2$), por lo que se emplea el método de mínimos cuadrados para encontrar la solución.

Las ecuaciones de flujo a utilizar son:

$$P_{kl} = V_k^2 G_{kl} - V_k V_l (G_{kl} \cos(\delta_k - d_l) - V_k V_l B_{kl} \sin(\delta_k - d_l)) \quad (3.32)$$

$$Q_{kl} = -V_k^2 (B_{kl} + B_c) + V_k V_l B_{kl} \cos(\delta_k - d_l) - V_k V_l G_{kl} \sin(\delta_k - d_l) \quad (3.33)$$

$$P_{lk} = V_l^2 G_{lk} - V_l V_k (G_{lk} \cos(\delta_l - d_k) - V_l V_k \sin(\delta_l - d_k)) \quad (3.34)$$

$$Q_{lk} = -V_l^2 (B_{lk} + B_c) + V_l V_k B_{lk} \cos(\delta_l - d_k) - V_l V_k G_{lk} \sin(\delta_l - d_k) \quad (3.35)$$

donde

B es la susceptancia, G es la conductancia y B_c es el valor $Y/2$ de la línea de transmisión.

El método de mínimos cuadrados utiliza la siguiente ecuación:

$$x = [A^t A]^{-1} A^t y \quad (3.36)$$

Donde A es una matriz conteniendo las derivadas de flujo de potencia (3.32-3.35) expresadas con respecto a las variables B , G y B_c , el vector de medición (y) contendrá los valores de las variables de flujo las cuales fueron estimadas previamente.

Para las mediciones de flujos de potencia ya sean activas o reactivas:

$$P_{kl}^m = P_{kl} + \eta_{P_{kl}} \quad (3.37)$$

$$Q_{kl}^m = Q_{kl} + \eta_{Q_{kl}} \quad (3.38)$$

$$P_{ik}^m = P_{ik} + \eta_{Pik} \quad (3.39)$$

$$Q_{ik}^m = Q_{ik} + \eta_{Qik} \quad (3.40)$$

En estas ecuaciones se debe recordar que los flujos de potencia P_{kb} , P_{lk} , Q_{kl} y Q_{lk} se han tomado como variables de estado, por lo que al momento de calcular la matriz Jacobiana ésta se modificará de acuerdo a lo anterior.

Para inyecciones nodales en donde se incluyen ramas normales y ramas con impedancia cero (k, m) las ecuaciones 3.22-3.27 siguen siendo válidas:

$$P_{kl}^m = P_{kl} + \eta_{Pkl} \quad (3.22)$$

$$Q_{kl}^m = Q_{kl} + \eta_{Qkl} \quad (3.23)$$

$$P_k^m = \sum P_{kj} + P_{kl} + \eta_{Pk} \quad (3.24)$$

$$Q_k^m = \sum Q_{kj} + Q_{kl} + \eta_{Qk} \quad (3.25)$$

$$P_l^m = \sum P_{lj} + P_{lk} + \eta_{Pl} \quad (3.26)$$

$$Q_l^m = \sum Q_{lj} + Q_{lk} + \eta_{Ql} \quad (3.27)$$

La Figura 3.4 resume las modificaciones a realizar en esta modelación:

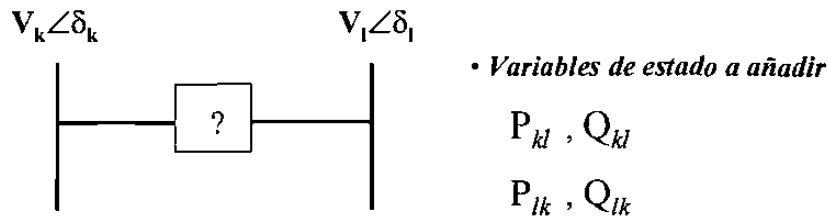


Fig. 3.4 Modelación de interruptor con estado desconocido

En la tabla 3.1 se presentan todas las modificaciones llevadas a cabo en los diferentes tipos de modelación de interruptores.

Tabla 3.1 Resumen de Modificaciones

Modelo	Variables de Estado						Pseudo-mediciones			
	Voltaje V	Angulo δ	P_{env}	Q_{env}	P_{rep}	Q_{rep}	$\delta_k - \delta_l$	$V_k - V_l$	P_{kl}	Q_{kl}
Compactado	√	√								
Modelación Interruptor cerrado	√	√	√	√			√	√		
Modelación Interruptor Abierto	√	√	√	√					√	√
Modelación Interruptor estado desconocido	√	√	√	√	√	√				

En la siguiente sección se presentará el algoritmo de estimación en forma esquemática, en donde se observan las rutinas y pasos necesarios para llevar a cabo la estimación de estado a un sistema de potencia.

3.7 Algoritmo de estimación

Este algoritmo es el ciclo básico para la estimación de estado.

Inicio del Programa

Se crean los vectores de medición y a estimar, se asignan valores iniciales para δ y V . Se pueden añadir errores a las mediciones.

Dependiendo del tipo de medición se irá creando la matriz R y su inversa para aplicaciones posteriores

Ciclo while donde se indica si el programa ha convergido o no, el criterio de convergencia es que el error máximo del vector Δx sea menor a $5e^{-5}$

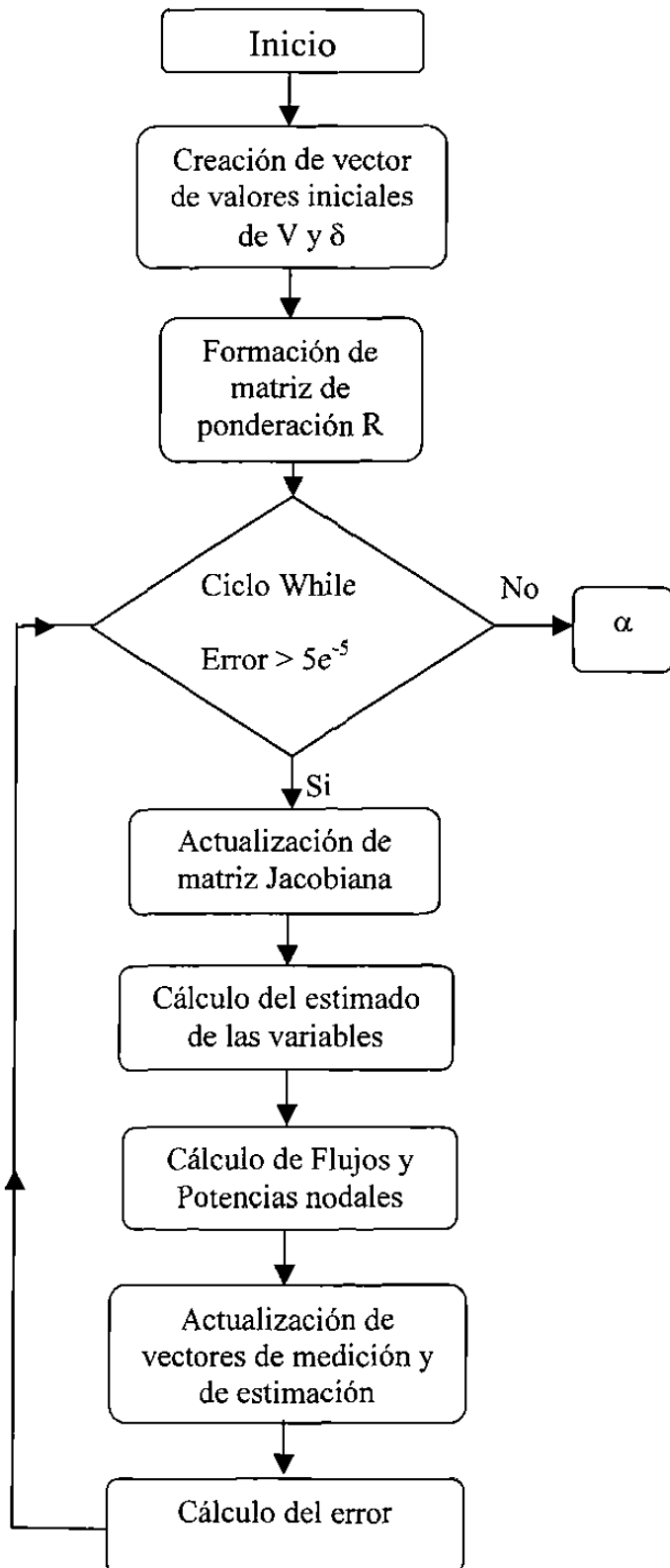
Se forma y actualiza la matriz Jacobiana, donde su estructura dependerá de si se están modelando interruptores o no

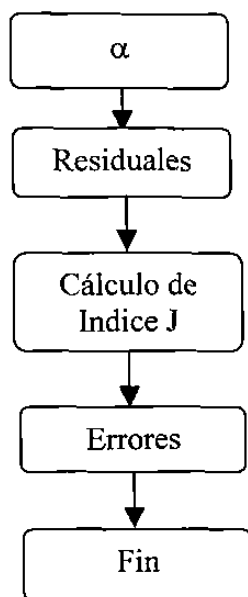
Se calcula el estimado de las variables δ , V y cuando se modelen interruptores P_{kl} , Q_{kl} , P_{lk} y Q_{lk} .

Se calculan los flujos de potencia a través de líneas y transformadores, y las potencias nodales a partir de los flujos.

Actualizan los vectores de estimación a partir de los flujos y potencias nodales.

Cálculo del error





Converge

Cálculo de residuales normalizados respecto a la desviación estándar y respecto a la matriz de covarianza

Cálculo de índice J, el cual se ocupa en la detección de errores

Programa que detecta e identifica los diferentes tipos de error

Finaliza el programa

CAPITULO 4

DETECCION E IDENTIFICACION DE ERRORES GENERALIZADA

4.1 Introducción

La validación de información es la tarea principal de un estimador de estado, para lograr este objetivo se utiliza la medición de diferentes variables eléctricas en todo el sistema de potencia así como de una base de datos con los parámetros de los elementos del sistema.

En la modelación del sistema eléctrico hay diversos tipos de error a considerar, en este trabajo se analizan los errores de topología, de parámetros y de medición.

Los errores anormales de medición pueden deberse a fallas de los equipos. Un error anormal es aquel que se encuentra fuera de una banda estadística probable.

Los errores de topología son debidos a la señal errónea del estado de uno o varios interruptores que ocasionan que la topología real del sistema no concuerde con el modelo matemático utilizado en el proceso de estimación de estado.

Los errores en parámetros son debidos a errores anormales en los parámetros de elementos del sistema, provocando que los flujos de potencia a través del sistema se distribuyan de diferente manera.

En este capítulo se analizará la forma en que estos errores afectan los valores estimados y en especial se enfocará la atención a *identificar* el tipo de error presente en el sistema aplicando diversos criterios a los residuales ponderados. El algoritmo propuesto tiene la característica de poder detectar e identificar errores aún cuando la prueba de hipótesis determine la aceptación del estimado.

4.2 Factores probabilísticos

4.2.1 Índice J

Como se mostró en el Capítulo III, en la estimación de estado el objetivo es minimizar el índice J.

$$\min_x J(x) = \sum_{i=1}^{Nm} \frac{[z_i^m - f_i(x)]^2}{\sigma_i^2} \quad (3.8)$$

donde la *sumatoria* de las diferencias entre la cantidad medida y la estimada al cuadrado dividida entre la varianza del medidor servirá como indicador para determinar si el estimado es aceptable o no.

Suponiendo mediciones perfectas (sin ningún tipo de error) el índice J será cero, ya que el valor medido será igual al valor estimado.

Para determinar la aceptación de la estimación se lleva a cabo una prueba de hipótesis sobre el valor del índice J.

4.2.2 Detección de errores anormales [44]

La teoría estadística muestra que *la suma ponderada* de los cuadrados de los valores medidos y estimados (Ec. 3.8), tiene una distribución probabilística **Xi-cuadrada** si los errores aleatorios de la medición tienen una distribución normal.

La distribución Xi-cuadrada está definida como:

$$f(x) = \frac{1}{2^{v/2} \Gamma(v/2)} x^{(v/2)-1} e^{-x/2} \quad (4.1)$$

donde

- v = grados de libertad
- x = variable independiente
- Γ = función Gamma con v/2 grados de libertad

a su vez la función Gamma está definida como:

$$\Gamma(\delta) = \int_0^{\infty} x^{\delta-1} e^{-x} dx \quad (4.2)$$

donde

- δ = v/2 (grados de libertad /2)
- x = variable independiente

La distribución Xi-cuadrada tiene la característica de no ser simétrica para valores pequeños de grados de libertad (menores a 30), pero conforme estos aumentan la distribución Xi-cuadrada tiende a comportarse como si fuese normal (Gaussiana) y por tanto simétrica, Figura 4.1.

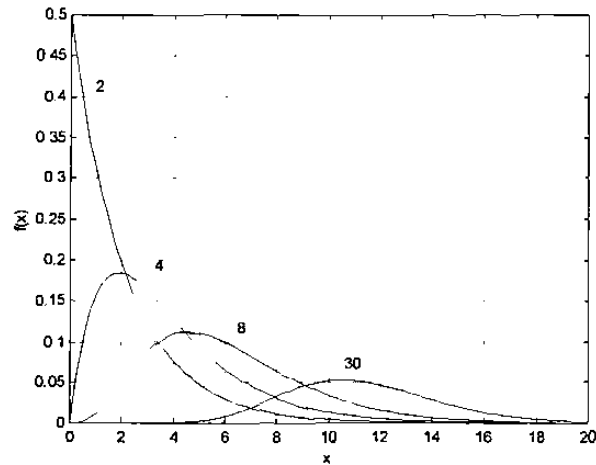


Fig. 4.1 Función de densidad de probabilidad de la distribución Xi-cuadrada para diferentes grados de libertad

Para determinar si la estimación de estado es aceptable se debe encontrar el valor X_α Figura 4.2 y compararlo con el índice J. El valor X_α está determinado por el valor α y los grados de libertad del sistema.

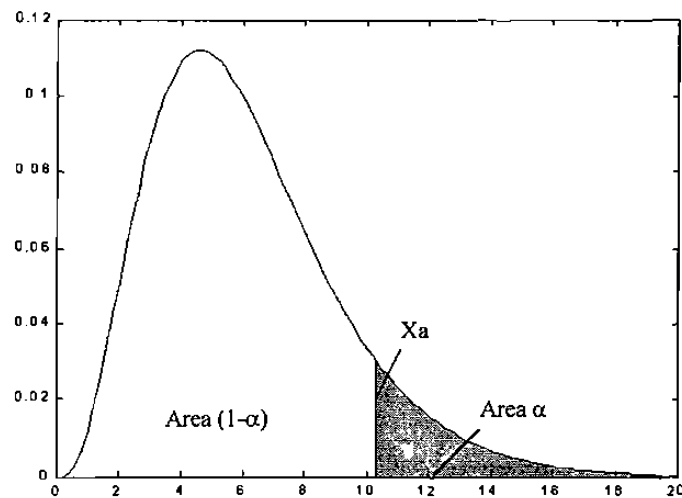


Fig.4.2 Areas de la Función de densidad de probabilidad de la distribución Xi-cuadrada para un valor de 8 grados de libertad

El área bajo la curva hacia la derecha del valor X_α en el eje x (Figura 4.2) es igual a α , la cual es la probabilidad de que el índice J exceda el valor X_α . El área restante bajo la curva es la *probabilidad (1- α)* de que el valor calculado del índice J con ciertos grados de libertad tenga un valor menor a X_α .

Una vez calculado el índice J y el valor límite X_α , es posible determinar la aceptación o rechazo de la estimación a través de la siguiente desigualdad:

- **Si el índice J \leq límite X_α , el estimado es aceptado, en caso contrario el estimado se rechaza.**

este proceso de comparación es conocido como **Prueba de Hipótesis** para un nivel de confianza (1- α), es decir, hay una probabilidad α de que se rechace una estimación aceptable.

El procedimiento anterior es el utilizado por los estimadores convencionales para determinar si el estimado contiene errores anormales. Como se ha mencionado, hay errores que aún estando presentes en el proceso de estimación afectan al índice J de manera tal que su valor es menor al límite X_α , por lo que estos errores en un estimador convencional no serían detectados.

El algoritmo presentado en este trabajo es capaz de detectar e identificar este tipo de error (índice $J < X_\alpha$), para lo cual se hace uso de otra prueba de hipótesis basada en la distribución **t-student**, que servirá como punto de comparación para la identificación de errores anormales.

4.3 Residuales

Una vez que se tiene el estimado de las variables de estado del sistema, es lógico pensar que la medición errónea es aquella en donde la diferencia (residual) entre el valor medido y el estimado es mayor.

Se tienen diferentes tipos de residual, donde el más sencillo se calcula simplemente restando el valor medido del estimado, teniendo como desventaja no tomar en consideración la exactitud del medidor; este es el *Residual Simple*:

$$\hat{r} = z - \hat{z} \quad (4.3)$$

donde

z = Valor medido

\hat{z} = Valor estimado

El *residual normalizado ponderado* se obtiene al dividir el residual simple entre la desviación estándar de cada medidor:

$$r^w = R_z^{-1} \hat{r} \quad (4.5)$$

donde

R_z = Matriz diagonal de las desviaciones estándar de los medidores.

Un tercer tipo de residual es el llamado *residual normalizado* y se obtiene al dividir el residual simple entre la desviación estándar del residual el cual está definido como:

$$\mathbf{r}^n = (\text{diag}(R_r))^{-1/2} \hat{\mathbf{r}} \quad (4.6)$$

donde

$$R_r = R_z - R_z \quad (4.7)$$

donde R_z y R_z están definidos por:

$$R_z = \begin{bmatrix} \sigma_1^2 & & \\ & \sigma_2^2 & \\ & & \ddots \\ & & & \sigma_n^2 \end{bmatrix} \quad (4.8)$$

y

$$R_z = H(H^T R_z^{-1} H)^{-1} H^T \quad (4.9)$$

4.4 Identificación de errores

Para identificar si alguna medición ha sido afectada de manera anormal es necesario comparar el residual normalizado de la medición contra un cierto valor, en este tipo de estudio el valor ocupado es el límite de la prueba t-student, basado en la distribución probabilística t-student.

Antes de explicar y mostrar la formulación matemática de la distribución t-student se presentarán algunos conceptos que servirán de fundamento para entender el uso de este límite en la identificación de mediciones erróneas:

Al llevar a cabo las simulaciones se observó que al colocar un error de medición y llevar a cabo la estimación de estado, el residual normalizado *reflejaba* de manera muy similar la magnitud (en sigmas σ) del error colocado en la medición fallada.

Para lo anterior se colocará un error de medición en alguna parte del sistema de potencia, por el momento no es de interés la configuración del sistema ni los valores propios de los elementos del mismo, lo relevante será observar la forma que el residual normalizado es afectado debido al error de medición introducido.

Se afectará la medición 5 correspondiente a un medidor de potencia activa con un error de 5σ . La Figura 4.3 muestra la forma en que el residual normalizado ha sido afectado una vez llevada a cabo la estimación de estado con el error.

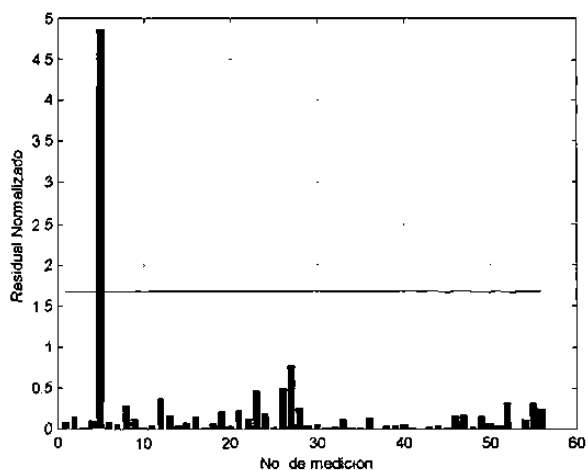


Fig. 4.3 Residual normalizado con errores de medición

La Figura 4.3 muestra que el error colocado en la medición 5 ha provocado que el residual normalizado correspondiente a dicha medición *refleje* una magnitud muy similar al error introducido (5σ).

El concepto restante a mencionar es la forma de la distribución normal (Gaussiana), la cual es importante para entender cuando una medición puede estar fuera de valores probables. De la teoría estadística se sabe que al tomar la lectura de algún medidor hay una probabilidad de que este valor estará dentro de $\pm 1\sigma$ del valor medio (μ) de la

medición, así mismo se puede definir la probabilidad que el valor esté dentro de $\pm 2\sigma$ del valor medio del medidor.

La Figura 4.4 muestra la distribución normal

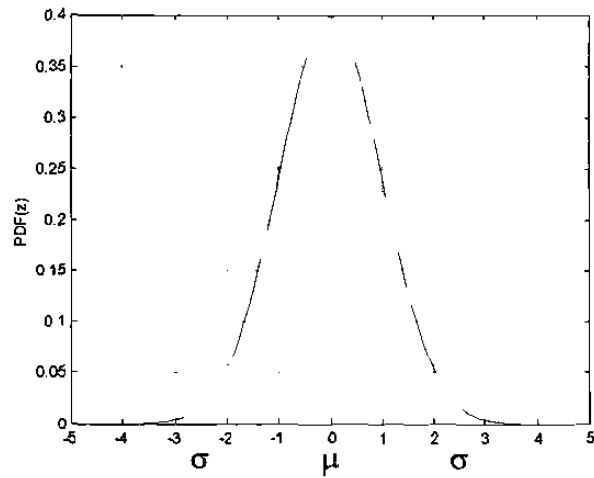


Fig. 4.4 Distribución normal

En la Tabla 4.1 se muestran algunos valores de la probabilidad para diversos valores de σ .

Tabla 4.1 Valores de áreas bajo curva normal para diferentes σ

Valor de σ	Probabilidad
± 4	0.999936
± 3	0.997309
± 2	0.954608
± 1.6	0.903207
± 1	0.683177

Una vez definido el residual y valor del área bajo la curva (probabilidad) de la distribución normal con respecto a σ , se procederá a definir la distribución t-student:

$$h(t) = \frac{\Gamma[(v+1)/2]}{\Gamma(v/2)\sqrt{\pi v}} \left(1 + \frac{t^2}{v}\right)^{-(v+1)/2} \quad \text{con } -\infty < t < \infty \quad (4.10)$$

donde

Γ = función gamma

v = grados de libertad

t = variable independiente con valor de $-\infty < t < \infty$

La gráfica de la distribución t-student para diferentes grados de libertad se presenta en la Figura 4.5

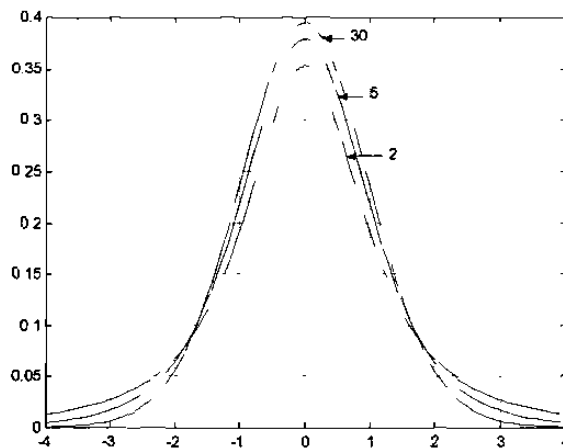


Fig. 4.5 Distribución t-student para diferentes valores de grados de libertad

Como se ha comentado, para la detección de errores anormales es necesario comparar los residuales normalizados contra un valor dado por el límite de la distribución t-student, donde el proceso de comparación es llamado prueba de hipótesis.

La prueba de hipótesis para la distribución t-student requiere de un valor α (no necesariamente el mismo) al igual que la prueba de hipótesis de la distribución Xi-cuadrada. Los pasos a seguir para encontrar el valor límite son similares a los utilizados para encontrar el límite de la prueba Xi-cuadrada (X_α), pero en este caso al ser la

distribución t-student simétrica no es necesario encontrar el área bajo la curva $(1-\alpha)$, por lo que al integrar se busca únicamente el valor α y se toma como límite de la prueba el valor absoluto correspondiente al valor del eje X donde el valor del área sea igual a α .

Se consideró para este trabajo un valor α de **0.05** para ambas pruebas de hipótesis. En el Apéndice C se muestran valores tabulados de la distribución para diferentes grados de libertad y valores α . Es de mencionarse que el valor α en la prueba de hipótesis corresponde a los residuales y no a las mediciones. *El valor α similar al ocupado en el índice J indica la probabilidad de considerar un residual aceptable como erróneo.*

Se presentarán a continuación valores de límite de la prueba t-student elaborada a partir del apéndice C, donde se muestran para un mismo grado de libertad diferentes valores α .

Tabla 4.2 Valores de límite t-student

Grados de Libertad	Valor α				
	<i>0.1</i>	<i>0.05</i>	<i>0.025</i>	<i>0.01</i>	<i>0.005</i>
10	1.372	1.812	2.228	2.764	3.169
20	1.325	1.725	2.086	2.528	2.845
29	1.311	1.699	2.045	2.462	2.756
Inf.	1.282	1.645	1.960	2.326	2.576

Se observa que a medida que α disminuye el valor límite de la prueba t-student aumenta, lo cual indica una probabilidad cada vez más baja de considerar un residual normalizado aceptable como erróneo.

Para el sistema de prueba de 9 nodos, 11 líneas, 3 transformadores y 4 cargas se tiene que los grados de libertad son 66 con el sistema topológico compactado, donde al calcular el límite de la prueba t-student con α igual a 0.05 se obtuvo un valor límite de 1.66, el cual es representado en forma gráfica en la Figura 4.3 como una línea horizontal donde el valor sobre el eje Y es igual al valor límite t-student. Al comparar los residuales

normalizados contra el valor límite de la Figura 4.3, se observa que la única medición afectada de manera anormal fue la número 5, cuyo residual *refleja* de cierta manera la magnitud del error introducido (5σ).

Otra forma de interpretar el valor límite t-student es considerando al valor límite como el valor σ en la distribución normal. Se ha mencionado que es posible calcular el área (probabilidad) dentro de un valor $\pm\sigma$ de la función normal, donde en este caso el valor límite t-student correspondería a ese valor. Ocupando la información de la tabla 4.1 se tiene que la probabilidad para un valor σ de ± 1.66 es 0.903.

Una vez que se cuenta con el índice J, la prueba de hipótesis sobre el índice J y los residuales normalizados es posible detectar e identificar los diferentes tipos de error que puedan presentarse en el proceso de estimación.

4.5 Impacto de errores en residuales normalizados

En esta parte se mostrará que el impacto en los residuales normalizados dependerá del tipo de error presente en el sistema. En la fase de detección e identificación de errores se observará que los errores de medición afectan de un modo muy diferente al residual normalizado que uno topológico o de parámetro. Es a través del impacto en los residuales normalizados que será posible identificar el tipo de error presente en el proceso de estimación.

Los estimadores convencionales detectan únicamente errores de medición utilizando el índice J y la prueba de hipótesis correspondiente. El algoritmo que se presenta está diseñado para detectar e identificar errores topológicos, de medición y/o de parámetros siempre y cuando al menos un residual normalizado sea detectado en la prueba de hipótesis de los residuales.

4.5.1 Errores de medición

Los residuales normalizados para este tipo de error muestran que al estar presentes uno o más errores estos se propagan a través de otras mediciones, siendo las más afectadas aquellas que se encuentren ubicadas en las proximidades de la errónea, la afectación de las mediciones dependerá del grado de error en la medición.

La Figura 4.6a muestra la forma en que un error de medición de 5σ se propaga a través de otras mediciones, la Figura 4.6b muestra la propagación del error pero con un error de 20σ .

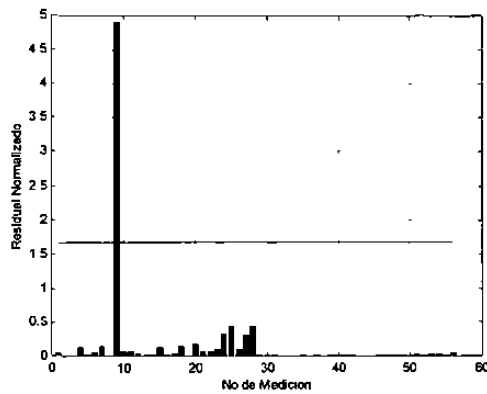


Fig. 4.6a Residual normalizado para un error de medición de 5σ

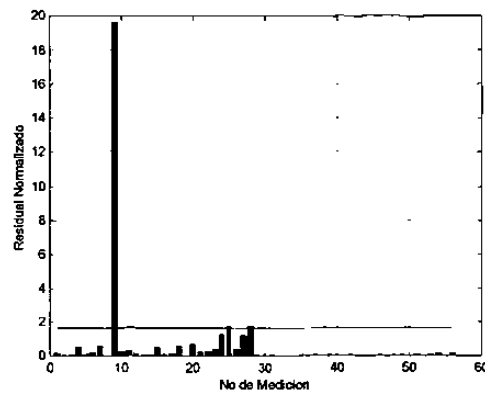


Fig. 4.6b Residual normalizado para un error de medición de 20σ

En la Figura 4.6a se observa que el error de 5σ se ve *reflejado* con una magnitud muy similar en el residual normalizado, provocando esto que la única medición a considerarse como errónea sea aquella donde se ha colocado el error, el resto de las mediciones no se afectan en gran medida debido al error.

En la Figura 4.6a y Figura 4.6b se observa una línea horizontal la cual significa el *límite de la prueba t-student* a partir de la cual es posible considerar mediciones como sospechosas, este valor es el utilizado en la prueba de hipótesis de los residuales.

En la Figura 4.6b se tiene que el colocar un error de 20σ en la medición para caso anterior se provoca la afectación de otras mediciones (25 y 28), las cuales al observar su

ubicación tienen un nodo en común como era de esperarse. La afectación en estas mediciones es tal que al comparar su valor residual normalizado contra el valor límite de la prueba t-student se consideren como erróneas o fuera de un rango confiable.

Al observar la *forma* de impactar de los errores en los residuales normalizados se tiene que para ambos casos el resultado es el mismo, siendo la única diferencia la magnitud del residual normalizado. Esto tiene un gran significado ya que eso indica que la *forma* del impacto de un error de medición en los residuales normalizados es siempre similar, no importando la magnitud del error.

4.5.2 Errores de topología

Este tipo de error tiene como característica que la topología del sistema real no corresponde con el modelo utilizado en el proceso de estimación, por lo que es de esperarse que el valor residual normalizado de un gran número de mediciones resulte con un valor mayor al límite establecido en la prueba de hipótesis de los residuales.

Para analizar lo anterior se modificará el estado de algún interruptor el cual provocará la separación de una subestación y la creación de un nodo eléctrico adicional, con este cambio habrá una inconsistencia entre el modelo y las mediciones.

Por el momento el objetivo es observar el impacto en los residuales normalizados del error de topología. La Figura 4.7 muestra la forma en que fueron afectados los residuales normalizados al presentarse un error de topología.

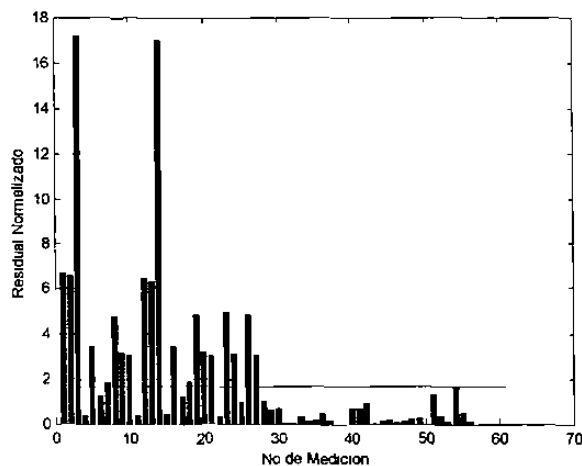


Fig. 4.7 Residual normalizado de un error en topología

Para este caso se observa un gran número de mediciones afectadas (residual normalizado mayor al límite establecido).

Al comparar los resultados de las Figuras 4.6 y 4.7 se aprecia que los errores de medición y topológicos afectan de muy diferente manera a los residuales, en cuanto al número de mediciones afectas como en la magnitud de los residuales.

4.5.3 Errores en parámetros

Este tipo de error surge al momento de tener algún error en la base de datos correspondiente a los parámetros de un elemento del sistema eléctrico.

Para este tipo de error se consideran errores máximos del 50% en la longitud de la línea, ya que errores superiores a este valor no serían aceptables.

La Figura 4.8 muestra el impacto de un error en parámetro en los residuales normalizados del sistema. Los parámetros afectados de la línea corresponderán a una línea de transmisión ubicada en un extremo de la subestación anteriormente separada.

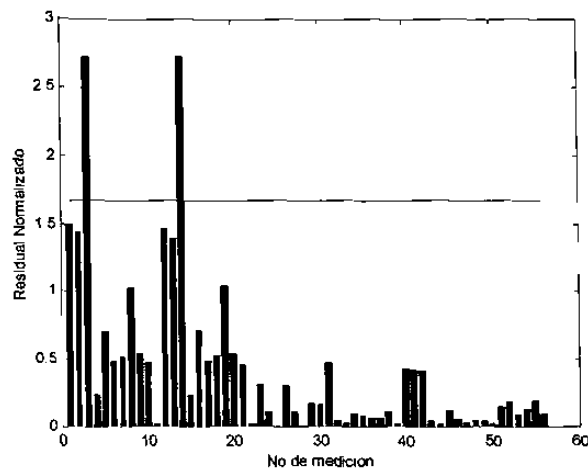


Fig. 4.8 Residual normalizado de un error en parámetro

Para este caso se observa que la *forma* de impactar de un error de parámetro a los residuales es parecido a la forma de uno de topología, con la diferencia de que el número de mediciones con valor residual normalizado mayor al límite es menor.

En el caso topológico se tuvieron arriba de 20 mediciones con valor residual mayor al límite, en cambio con el error en parámetro se tuvieron únicamente dos mediciones, otro aspecto importante a notar es la magnitud del residual, para el caso topológico se tiene un valor máximo de 17, y para el de parámetro de 2.7, siendo esta su principal diferencia.

Estas diferencias en la forma de impactar a los residuales servirán como base para identificar el tipo de error presente en el proceso de estimación.

4.6 Detección e identificación de errores

Una vez que se ha observado la forma en que los diferentes tipos de error impactan sobre los residuales, se procederá a utilizar esta característica para **Identificar** el tipo de error presente en el proceso de estimación.

La **Detección** de errores anormales se lleva a cabo al momento que algún residual normalizado de alguna medición supere los límites de la prueba t-student. La diferencia entre la detección aquí presentada y la de un estimador convencional radica en que este último considera como aceptable cualquier estimado siempre y cuando el índice J sea menor al límite de la prueba de hipótesis con la distribución Xi-cuadrada, en cambio el algoritmo propuesto considera que algo anormal ha sucedido si el residual normalizado de alguna medición excede los límites de la prueba t-student.

Para poder llevar a cabo la identificación de errores se hará uso de dos factores, uno de los cuales será el *valor máximo del Residual Normalizado* y el otro corresponderá al valor de la *Mediana del espectro* de residuales, dicho espectro contiene los valores residuales normalizados de aquellas mediciones donde el valor residual normalizado sea mayor a un tanto por ciento de los límites de la prueba t-student, dicho porcentaje será igual a un 10% si el índice J es mayor que el valor Xi-cuadrada y de 7% en caso contrario, esto con el fin de darle una mayor *sensibilidad*.

Al momento de que el espectro es ordenado en forma descendente, la posición de las mediciones se perderá importando únicamente la *forma*.

La mediana de una serie de números está definida de la siguiente forma:

Si $x_1, x_2, x_3, \dots, x_n$ representan una muestra aleatoria de tamaño n , acomodada en orden decreciente en magnitud, entonces la mediana muestral se define por el estadístico:

$$\tilde{X} = X_{(n+1)/2} \quad \text{si } n \text{ es impar} \quad (4.10)$$

$$\tilde{X} = \frac{X_{(n/2)} + X_{(n/2)+1}}{2} \quad \text{si } n \text{ es par} \quad (4.11)$$

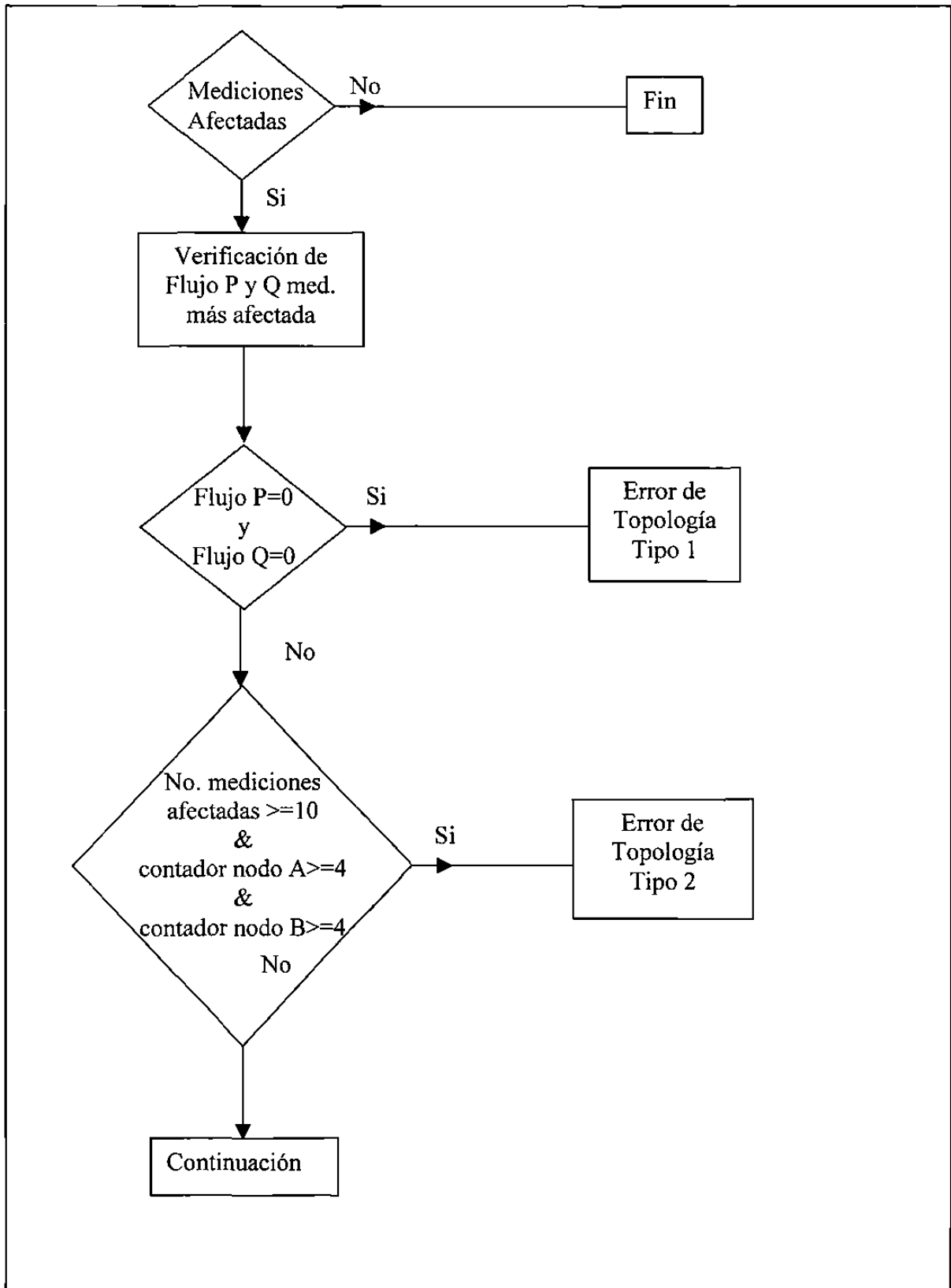
por ejemplo, para los siguientes datos [1.9, 2.3, 2.5, 2.7, 2.9, 3.1] el valor de la mediana es 2.6, donde este valor es calculado observando primeramente si n es par o impar, siendo en este caso par (6), y utilizándose la Ecuación 4.11 para calcular la mediana:

$$\tilde{X} = \frac{2.5 + 2.7}{2} = 2.6$$

Una vez explicado la forma de impactar los errores a los residuales se presentará a continuación el algoritmo desarrollado para la detección e identificación de errores, Fig. 4.9, para posteriormente explicar su funcionamiento.

En la Fig. 4.9, se observa que los errores de topología están catalogados en dos tipos: Los de primer tipo constan de aperturas de líneas de transmisión de un extremo, y los segundos a la separación de subestaciones.

Algoritmo compactado de detección e identificación de errores generalizado:



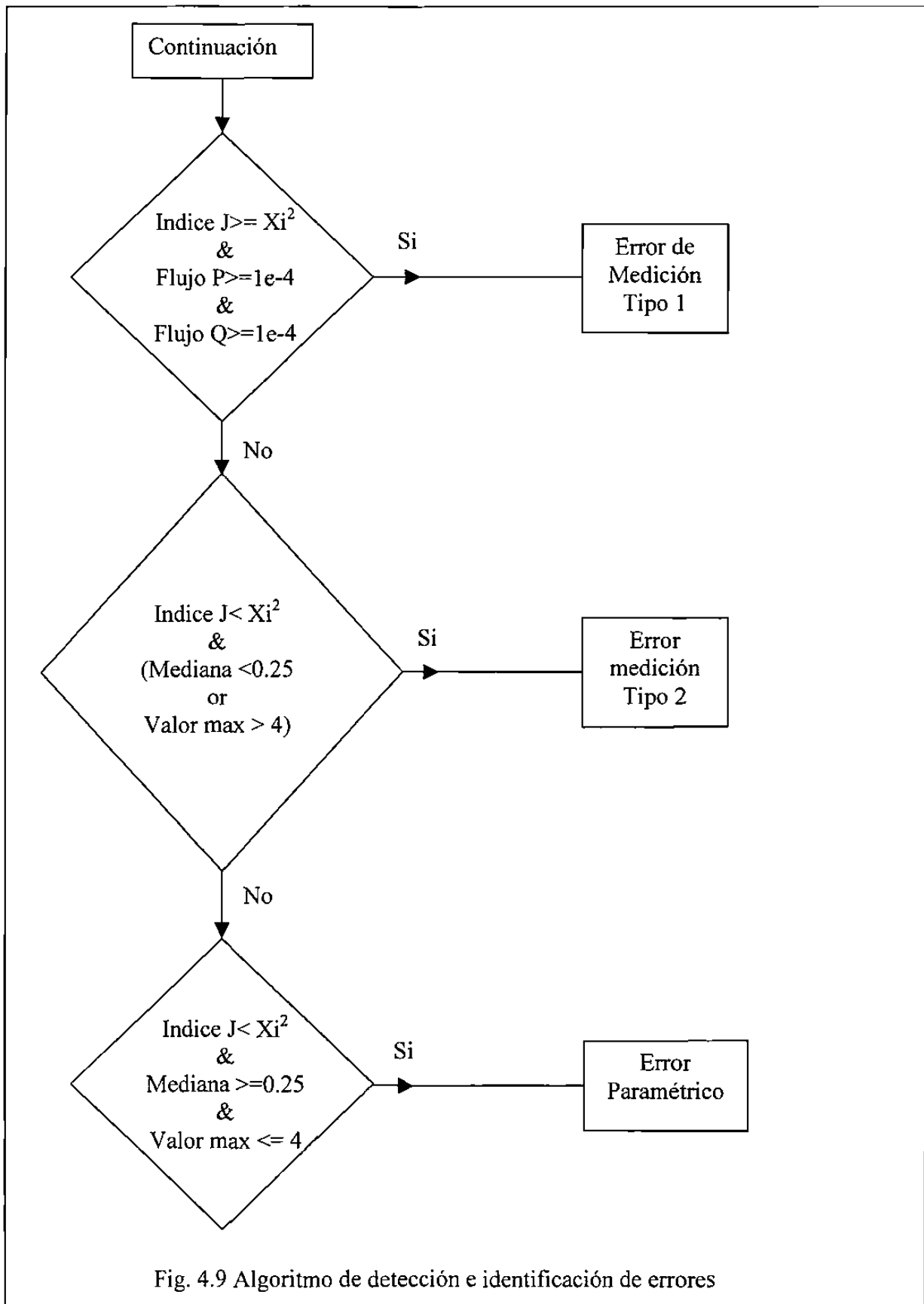


Fig. 4.9 Algoritmo de detección e identificación de errores

Una vez obtenidos los valores residuales normalizados de las mediciones, y con base a la forma de impactar los errores a los residuales será posible su identificación.

La forma en que el algoritmo identifica los distintos tipos de error es a través de una jerarquización en el tipo de error a identificar.

El algoritmo necesita forzosamente que exista al menos una medición con valor residual normalizado mayor al límite de la prueba t-student para identificar errores. Una vez comprobado lo anterior, el algoritmo compara si la *forma* en que fueron afectados los residuales en el proceso de estimación debido al error corresponde a la *forma* típica de afectar de cada uno de los diferentes tipos de error. En primer lugar verifica si la *forma* de impactar corresponde al de un error de topología, si la *forma* de afectar no corresponde a uno de topología, el algoritmo verifica si la *forma* de impactar a los residuales corresponde a un error de medición.

El algoritmo trata hasta este punto de identificar a los errores que afectan al índice J de manera tal que éste sea mayor al límite de la prueba Xi-cuadrada.

Para el caso donde la forma de impactar los residuales no corresponda a ninguna de las dos anteriores, se procederá identificar errores con índices J menores al valor límite de la prueba Xi-cuadrada. Los errores que entran dentro de esta categoría pudieran ser de medición o de parámetro.

Hasta el momento lo único que se ha hecho es identificar al tipo de error mas no se ha explicado la forma en que se corrige, lo cual dependerá del tipo de error identificado. Para errores identificados como de medición la forma de corregir el error es eliminando la medición con mayor residual; Para errores identificados como de topología se debe identificar la subestación donde se presume exista el error y expandirla a un nivel nodo-interruptor estimando los flujos de potencia a través de cada interruptor, identificándose al interruptor con estado erróneo y estableciéndose la nueva topología; Para errores

identificados como de parámetro la forma de corregirlos es a través de modelar el elemento sospechoso como interruptor con estado desconocido.

El algoritmo utiliza contadores para aquellos nodos afectados con el fin de que cada vez que se detecte una medición cuyo residual normalizado sea mayor al límite de la prueba t-student se incremente en uno el contador asociado a cada nodo (envío y recepción) de la medición afectada. Al final del proceso se tendrá una lista de aquellos nodos afectados y un cierto valor en cada uno, el cual dependerá del número de mediciones afectadas asociadas a dicho nodo.

Como se comentó el algoritmo tiene jerarquizados los errores a identificar, pero en todos los casos el algoritmo identifica en principio a la medición con mayor residual y verifica los valores estimados de flujos de potencia correspondientes a dicha medición.

Es a partir de estos valores de flujo estimados, de la magnitud máxima del residual, de los contadores asociados al nodo de envío y recepción, y del valor de la mediana del espectro será posible identificar al tipo de error.

A continuación se presentará a detalle los diferentes tipos de error y la forma en que se identifica y corrige uno de ellos.

4.6.1 Detección e identificación de errores en topología

Para llevar a cabo el estudio de estos errores se dividirá su análisis en dos partes. El primer caso consiste en la apertura de líneas de transmisión en uno de sus extremos, y el segundo caso consiste en la separación subestaciones donde exista carga en cada uno de los nodos creados.

Una característica de los errores topológicos es que el índice J es siempre mayor que el límite de la prueba Xi-cuadrada.

El algoritmo en primer instancia trata de identificar al error como un topológico tipo uno, Figura 4.9. Para *identificar* si el error corresponde a este caso, el algoritmo verifica los valores estimados de flujos de potencia activa y reactiva de envío y recepción asociados a los residuales con mayor valor. El siguiente paso en la identificación consiste en verificar si los valores estimados de flujo de *Potencia Activa* son cero o menores a un valor pequeño (10^{-4}), lo cual implicaría la inexistencia de flujo de potencia activa a través de la línea de transmisión, lo cual es posible sólo si está desconectada en un extremo.

En caso de cumplirse lo anterior, *se habrá identificado al error como topológico* procediéndose a determinar el nodo sospechoso e identificar al interruptor que está provocando el error.

Una vez clasificado el error como de topología se identificará al nodo sospechoso de contener al error, para esto último se verifican los valores estimados del flujo de *potencia reactiva* correspondientes a los nodos de la medición con mayor residual, donde a través de la siguiente lógica se identificará el extremo fallado:

Suponga una línea ubicada entre los nodos A-B la cual está abierta en uno de sus extremos. Al estar abierta la línea el valor estimado de los flujos de potencia activa serán cero (o con un valor pequeño 10^{-4}) tanto de envío como de recepción, con lo cual el error se identifica como de topología. Para identificar al nodo sospechoso se verifican los valores estimados de potencia reactiva en ambos extremos de la línea, donde a causa de los efectos capacitivos propios de la línea, uno de estos valores será diferente de cero. Ahora bien, suponiendo que el estimado de la medición ubicada de B-A sea diferente de cero, el valor estimado del extremo A-B tendrá que ser menor a 10^{-4} implicando con esto que el circuito está abierto por el extremo A. El algoritmo considerará como nodo sospechoso aquel donde el valor estimado de flujo de potencia activa y reactiva asociados a la medición con mayor residual sean cero (o menores a 10^{-4}).

Para errores en topología del segundo tipo, los valores de flujo estimados de potencia activa serán mayores a 10^{-4} por lo que la lógica de detección anterior no es válida para este caso.

La lógica de detección en este caso estará basada en el número de mediciones afectadas y los contadores de los nodos asociados al mayor residual.

Como se ha visto, un error en topología tiene como característica el afectar a un gran número de residuales de mediciones (Figura 4.7), siendo las más propensas aquellas conectadas a la subestación con el error.

La lógica para detectar este tipo de error parte del hecho de que las mediciones más afectadas son aquellas ubicadas en las cercanías del error, para lo cual se registran los nodos afectados y el número de mediciones afectadas ubicadas en dichos nodos. Una vez contabilizadas las mediciones afectadas y las repeticiones de sus nodos, se tendrá que el nodo con el mayor número de repeticiones será considerado como el candidato para contener el error de topología.

Para este tipo de error en topología y sistema, se deben cumplir las siguientes condiciones para su identificación:

- *Número total de mediciones afectadas mayor o igual a 10*
- *Los contadores correspondientes a los nodos de la medición con mayor residual deben ser mayores o iguales a 4*
- *El índice J mayor al límite de la prueba χ^2 -cuadrada*

En resumen el algoritmo lleva a cabo los siguientes pasos para identificar al error como uno de topología:

- *Compara el valor del índice J contra el límite de la prueba χ^2 -cuadrada*
- *Verifica los valores estimados de flujos de potencia de envío y recepción ubicados entre los nodos correspondientes a la medición con mayor residual normalizado*
- *Si los valores estimados de flujo de potencia activa son menores a 10^{-4} se trata de un error tipo 1*
- *Si los valores estimados de P son mayores a 10^{-4} y se cumplen las 3 restricciones correspondientes, el algoritmo identificará el error como tipo 2*

Una vez identificado el error como de topología tipo 1 o 2, se le tratará simplemente como de topología y se procederá a identificar al interruptor o interruptores que puedan estar causando el error.

Una vez identificado el nodo candidato a contener el error de topología se realiza su expansión a nivel nodo-interruptor, lo cual requerirá determinar la topología expandida del sistema.

Con la topología expandida del sistema se realizará una nueva estimación de estado donde los flujos internos de la subestación serán los de interés, enfocándose la atención en aquellos flujos estimados de interruptores que compartan *alguno de los nodos* correspondientes a la medición con mayor residual normalizado.

Al momento de realizar la nueva estimación de estado, el algoritmo tratará nuevamente de identificar el error presente, mas debido a la topología expandida uno de los nodos correspondientes a la medición con mayor residual será un nodo interno de la subestación sospechosa. El siguiente paso es la verificación de los valores estimados de flujos de potencia activa y reactiva en aquellos interruptores que compartan alguno de los nodos de la medición con mayor residual, donde una vez identificados se tendrán varias opciones para identificar al erróneo que dependerán del número de interruptores asociados y su estado:

- En caso de que el sistema *no cuente con medidores dentro de la subestación sospechosa* y se haya detectado un solo interruptor asociado, se verificará si los valores estimados de flujo de potencia a través del interruptor son cero y el estado del interruptor. Si el estado es *abierto*, se tendrá la seguridad de haber identificado al interruptor causante del error de topología.

El siguiente paso consiste en modificar el estado de dicho interruptor y determinar la nueva topología del sistema llevándose a cabo la estimación de estado con la nueva topología del sistema. En caso de no contener errores anormales el algoritmo habrá detectado, identificado y eliminado el error en topología; en caso de encontrar nuevamente errores anormales el algoritmo entraría nuevamente al proceso de identificación.

- En caso de que el sistema *no cuente con mediciones dentro de la subestación sospechosa* y se haya detectado un solo interruptor asociado, se verificará si los valores estimados de flujo de potencia a través del interruptor son cero y el estado del interruptor. Si el estado es *cerrado*, se tendrá que verificar la configuración de la subestación (Apéndice E) para determinar al interruptor erróneo. Para lo anterior se presenta en la Figura 4.10 la subestación B del sistema de prueba, al cual se le ha modificado el estado al interruptor 5. El cambio provoca que la subestación se divida y se genere un nuevo nodo eléctrico.

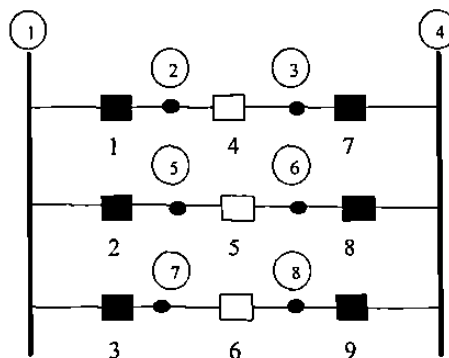


Fig. 4.10 Configuración de subestación con interruptor erróneo

Una vez expandida la subestación la base de datos de los estados en interruptores dependerá de la configuración presentada en la Figura 4.10. Se observa que es posible *compactar* la subestación ya sea modificando el estado del interruptor 4, 5 o 6, donde el algoritmo al considerar como verdadera la configuración y no tener más información, no está en la capacidad de identificar al interruptor erróneo. Lo anterior tiene como consecuencia que sea el operador el encargado de elegir al interruptor a modificar, para lo cual el algoritmo presenta una lista de los interruptores de la subestación junto con su estado. En la Figura 4.11 se muestra la configuración real de la subestación.

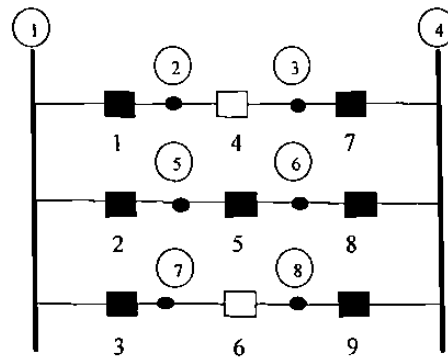


Fig. 4.11 Configuración real de subestación B

- Para que el algoritmo identifique a los interruptores erróneos es necesario colocar *medidores de flujo de potencia dentro de la subestación*, teniendo estos que estar ubicados de manera tal que al obtenerse su valor estimado se pueda identificar al interruptor erróneo, donde una vez calculado el valor estimado de la medición se compara contra su valor medido. En el caso de la Figura 4.10 para identificar al interruptor erróneo el medidor dentro de la subestación tendría que estar colocado ya sea entre los nodos internos 6 – 4 Figura 4.12, entre los nodos internos 5 – 6 Figura 4.13, o entre los nodos internos 1 – 5.

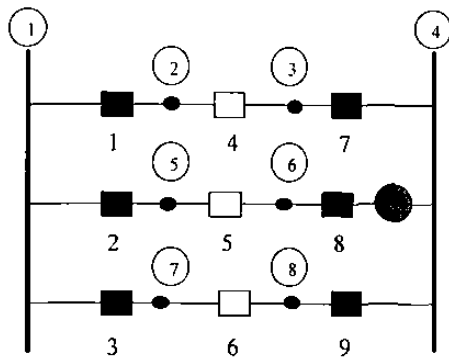


Fig. 4.12 Colocación de medidor interno asociado a interruptor 8

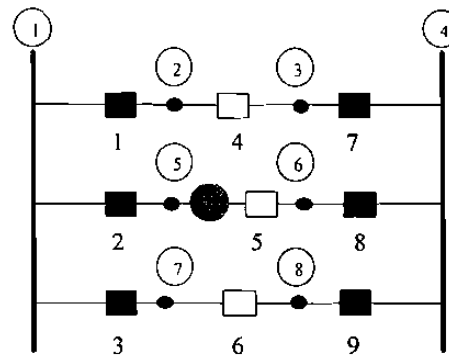


Fig. 4.13 Colocación de medidor interno asociado a interruptor 5

Suponiendo la medición ubicada entre los nodos internos 6 – 4, Figura 4.12. *El valor medido tendrá una magnitud de flujo diferente a cero* debido a que *físicamente* el interruptor 5 está cerrado, Figura 4.11. La base de datos a partir de la cual se crea la topología de la subestación corresponde a la Figura 4.10. Al ocupar la topología errónea del sistema, el estimador de estado *asignará al interruptor 8 un flujo de potencia cero* debido a que el interruptor 5 en la base de datos tiene un estado abierto.

Al comparar la cantidad medida y la estimada se tendrá una inconsistencia en los valores, a partir de lo cual el algoritmo prosigue con la identificación del interruptor con estado erróneo. El algoritmo en este momento verifica el estado del interruptor que comparte los mismos nodos de la medición ubicada dentro de la subestación. Si el *estado* del interruptor asociado es *abierto* el algoritmo identificará como erróneo a dicho interruptor; En el caso que el estado sea *cerrado* se sabrá que este interruptor no es el erróneo, por lo que se deberá verificar el estado de los interruptores ubicados sobre la misma barra (2 y 5), logrando reducir el número de interruptores sospechosos.

El algoritmo estructura la nueva topología de la subestación una vez identificado el interruptor erróneo o el operador modificó el estado del mismo, para así llevar a cabo una nueva estimación del sistema.

Para llevar a cabo la segunda estimación de estado (ya con el estado del interruptor modificado) se ocupa el modelo topológico compactado, manejando así un menor número de nodos.

4.6.2 Detección e identificación de errores de medición

De la Figura 4.9 se observa que si el error presente en la estimación no cuenta con las características propias de un error de topología, el algoritmo verifica si la característica en los residuales corresponde a errores de medición.

Para la detección de este tipo de error se consideran dos situaciones, la primera de ellas para casos donde el índice J sea mayor al límite de la prueba Xi-cuadrada, y la segunda donde el índice J es menor al límite de la prueba Xi-cuadrada.

Como se comentó en el impacto de errores en residuales normalizados Capítulo 4, sección 5, los errores que impactan de manera tal que el índice J sea mayor al límite de la prueba t -student son los errores de topología y de medición.

Para el primer caso, de la Figura 4.9 se observa que si el impacto en los residuales no cuenta con las características propias de un error en topología y el *índice J es mayor al límite t -student*, el algoritmo para identificar al error como de medición verifica los valores estimados de flujo de potencia activa y reactiva correspondientes a la medición con mayor residual, en caso de ser mayor a cero (o un valor chico, 10^{-4}) el algoritmo identificará al error como de medición. En caso de que los valores estimados de la medición con mayor residual fueran cero el algoritmo los detectaría como de topología, siguiendo el procedimiento correspondiente para su eliminación.

Para el caso donde el índice J sea menor al límite de la prueba Xi-cuadrada, en un estimador convencional consideraría al estimado como aceptable. El algoritmo presentado considera que algo anormal ha sucedido al momento de existir mediciones

con residuales normalizados mayores al límite de la prueba t-student tratando de identificar el tipo de error.

Para identificar errores en medición donde el índice J es menor al límite χ^2 -cuadrada, la lógica de detección dependerá del valor máximo del residual ponderado y del valor de la mediana del espectro de residuales. De la Figura 4.9 se observa que el valor clave para la mediana es 0.25 y para el valor máximo del residual es 4. Fue a través de llevar a cabo muy diversas simulaciones con el sistema de prueba que se concluyó que estos valores eran los adecuados para llevar a cabo la identificación de errores de este tipo.

Estos valores de mediana y máximo del residual son válidos únicamente para este sistema. Para un sistema diferente es necesario llevar a cabo simulaciones para diversos errores y magnitudes para así determinar los valores adecuados para la mediana y el valor máximo del residual.

Una vez que el error se ha clasificado como de medición se procede a eliminar aquella medición con mayor residual normalizado provocando que los grados de libertad se reduzcan y los factores probabilísticos dependientes de este se modifiquen. Una vez eliminada la medición con mayor residual se lleva a cabo una nueva estimación de estado del sistema.

Si una vez eliminada la medición con mayor residual y llevar a cabo la estimación se detectan residuales con magnitud mayor al límite t-student, se procede a identificar al error con base al algoritmo de la Figura 4.9.

Es posible la existencia de dos errores de diferente tipo durante el proceso de estimación, donde el algoritmo en primera instancia identificaría al error que afecte en mayor medida a los residuales; donde una vez eliminado el primer error el algoritmo identificaría al segundo error con base al impacto en los residuales que este provoque.

4.6.3 Detección e identificación de errores en parámetros

De la Figura 4.9 se observa que el algoritmo considera a los errores en parámetro como la última opción para identificar al error presente en el proceso de estimación. Estos errores consisten en valores anormales de parámetros de los elementos del sistema.

El algoritmo considera desviaciones máximas del 50% en los valores de parámetros de líneas de transmisión.

La detección de errores en parámetros al igual que los de medición del segundo tipo, está basada en la forma de ser afectados los residuales normalizados de las mediciones. Al comparar la Figura 4.8 con respecto a la Figura 4.7, se tiene que los errores en parámetro afectan a los residuales de similar *forma* que los topológicos, donde la diferencia principal radica en el valor que tome el índice J .

De las simulaciones realizadas se concluye que el grado máximo de error que una línea puede soportar sin afectar ciertas restricciones depende del valor de flujo de potencia que exista a través de la línea afectada; esto es, si se tiene una línea de transmisión donde el flujo de potencia es muy chico comparado con los demás, no importa cuan exagerados sean los errores introducidos en los parámetros de la línea, ya que no se afectará a ningún residual, en cambio, si tiene una línea por donde pasa una gran cantidad de flujo de potencia (comparado con los demás) cambios pequeños en la longitud de la misma provocarán una gran cantidad de residuales afectados, llegando al extremo de provocar que el índice J sea mayor al límite de la prueba Xi-cuadrada, con lo cual el algoritmo identificaría al error como de topología o medición dependiendo de cuanto se hayan afectado los residuales.

Como se comentó es indispensable para la detección de estos errores que el índice J sea menor al límite de la prueba t-student, donde a partir de las simulaciones llevadas a cabo se concluye que el índice J en la mayoría de los casos será menor que el límite de la prueba Xi-cuadrada en este tipo de error.

A través de llevar a cabo muy diversas simulaciones al sistema se encontró que los errores en parámetro cuentan con la característica de afectar a los residuales de manera tal que el valor de la mediana es mayor o igual a 0.25, y el valor máximo del residual normalizado es menor a 4.

En resumen el algoritmo sigue la siguiente secuencia para la identificación de este tipo de error:

- *Verificar que el índice J sea menor que el límite de la prueba χ^2 -cuadrada*
- *Verifica la existencia de por lo menos un residual normalizado con valor mayor al límite de la prueba t -student.*
- *Calcula la mediana del espectro y el valor máximo de la misma*
- *Compara los valores calculados de la mediana y valor máximo contra los límites especificados para estos errores.*

Una vez que se ha identificado al error como de parámetro el algoritmo lo indica, y hace la recomendación de modelar al error como de parámetro.

La forma de identificar la línea sospechosa de contener el error en parámetro se hace a través de identificar los nodos donde se encuentre la medición con mayor residual normalizado. El algoritmo muestra un listado de las líneas activas del sistema junto con sus nodos, donde se modela aquella donde sus nodos correspondan con los de la medición con mayor residual.

El modelar al error como de parámetro implica necesariamente modelar como interruptor con valor desconocido a la línea sospechosa. La característica de esta modelación como se comentó en el Cap. III consiste en considerar como variables de estado a los flujos de potencia de envío y recepción de potencia activa y reactiva, esto último con el fin de que los parámetros de la línea no intervengan en el proceso de

estimación. Al considerar como variables de estado a los flujos de potencia los grados de libertad se verán afectados junto con los factores probabilísticos dependientes de este.

Una vez llevada a cabo la estimación de estado con la modelación respectiva de la línea de transmisión, se tendrá en caso de no existir algún otro error que el índice J disminuyó su valor con respecto al de la primera estimación hecha, aparte de no encontrar mediciones afectadas. El algoritmo en este momento presenta la opción de *verificar valores estimados de flujo de potencia* donde presentará en pantalla un listado de los valores estimados de flujo de potencia activa y reactiva. Se muestra una lista con los valores de parámetro de la línea antes de la modelación y los valores de parámetro después de la modelación, donde estos valores estimados como se comentó en el Capítulo III, se calculan una vez conocidos los voltajes nodales de la línea y los flujos estimados de potencia a través de la línea; Se contará con un sistema de ecuaciones lineales con 4 ecuaciones (2 de potencia activa, y 2 de potencia reactiva) y 3 incógnitas (B , G , y $Y/2$), este sistema de ecuaciones es resuelto a través del método de mínimos cuadrados.

Una vez calculados los parámetros de la línea el algoritmo cuenta con la opción de actualizar la base de datos, con lo cual los valores estimados de parámetro de la línea serán considerados como verdaderos para la línea de transmisión. Actualizados los valores de la línea de transmisión se lleva a cabo una nueva estimación de estado.

Como se ha mencionado un error en parámetro afecta de manera similar a los residuales que uno de topología, en donde las principales diferencias observadas son:

- *El índice J es siempre mayor al límite de la prueba χ^2 -cuadrada para errores de topología*
- *Las magnitudes de los residuales normalizados son menores en los errores de parámetro*

Una conclusión a la que se llegó en esta parte del trabajo es que un error en topología podría clasificarse como un caso de error en parámetro, esto debido a la forma en que el error en topología afecta los residuales. Se dice que un error en topología podría clasificarse como de parámetro con base a la siguiente analogía:

Supóngase una línea de transmisión a la cual se le han modificado sus parámetros para que estos tengan valor *cero*, lo anterior implicaría que han sido *multiplicados por un factor cero*, teniendo como consecuencia que el estimador considere como inexistente dicha línea y provocando un error de topología. Normalmente un error en parámetro se simula *multiplicando* por un factor a los parámetros de la línea para así modificar su longitud, por lo que un error en topología es un caso particular de error en parámetro, donde la constante a utilizar para errores en topología sería *cero*.

Los valores *0.25, 10 y 4* correspondientes a la mediana del espectro, el número de mediciones afectadas y el contador de nodos se obtuvieron con base a observaciones del comportamiento del sistema ante diferentes magnitudes y tipos de error, estos valores no serán válidos para otro sistema debido a que el número de medidores no será el mismo y a que en este caso se hicieron suposiciones que en algún otro sistema podrían no cumplirse, por lo que para cada sistema se tendrían que *sintonizar* estos valores.

Los valores variarán de un sistema a otro pero la estructura del algoritmo sigue siendo la misma, donde la tarea del usuario será *sintonizar* estos valores al momento de introducir un nuevo sistema para que así los valores seleccionados correspondan a las características propias del sistema.

CAPITULO 5

SISTEMA DE PRUEBA

5.1 Introducción

En este capítulo se presentarán resultados de haber llevado a cabo diferentes pruebas para verificar el funcionamiento de los algoritmos de Estimación de Estado Generalizado, el cual se compone principalmente de: **Procesador Topológico de Redes Generalizado, Estimador de Estado Generalizado y Procesador para la Detección e Identificación de Errores.**

Las simulaciones llevadas a cabo se hacen bajo las siguientes suposiciones:

- *Se tienen medidores de Potencia Activa y Reactiva independientes*
- *Se cuenta con mediciones de Flujo de Potencia en todas las líneas*
- *Se tienen medidores de envío y recepción en cada línea*
- *Se tienen medidores de voltaje en cada nodo eléctrico*
- *Se cuenta con inyecciones cero en aquellos nodos sin carga y generación*
- *Se considera un valor σ de 0.05 para todos los medidores*
- *El valor σ para pseudo-mediciones es $1e-4$*

Se presentan únicamente las simulaciones llevadas a cabo para *errores anormales* de medición, de topología o de parámetro. En el reporte anexo se muestra el funcionamiento paso por paso del algoritmo para dos sistemas de potencia diferentes, el primero de los cuales sirve de base para comprender el funcionamiento de un estimador de estado y modelación de interruptores; el segundo sistema es al cual se le añaden diversos errores de medición, de topología o de parámetro para comprobar el funcionamiento de los diferentes algoritmos que componen la estimación de estado generalizada.

Se recomienda ocupar el diagrama de flujo de la Fig. 4.9 presentado en el Capítulo IV para observar la forma en que se detectan e identifican a los errores. En este capítulo se mostrarán las variables necesarias para poder hacer uso de este diagrama.

Al final del capítulo se mostraran todas las simulaciones llevadas a cabo al sistema de prueba ante diversos tipos y magnitudes de error.

5.2 Estimación de estado con errores anormales

En esta parte se tomará como base el sistema de la Figura 5.1, el cual se presenta en forma compacta, la configuración interna de cada subestación se detalla en el Apéndice E.

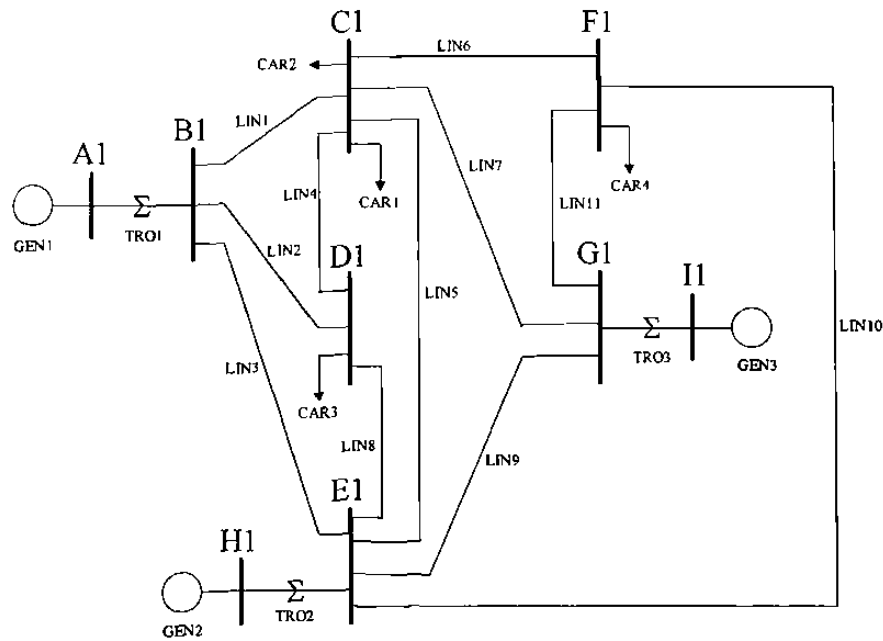


Figura 5.1 Sistema de 9 nodos

El sistema de prueba consta de 9 nodos eléctricos, 11 líneas de transmisión, 3 generadores, 4 cargas y 3 transformadores.

La tabla 5.1 muestra los voltajes y potencias nodales que se obtuvieron al hacer el estudio de flujos de potencia para el sistema de la Figura 5.1, los cuales se utilizan para simular las mediciones en el sistema. Los detalles de valores de los elementos se presentan en el Apéndice E.

Tabla 5.1 Voltajes y Potencias nodales

Nodo	Voltaje	Angulo	P.Generada	Q.Generada	P. Carga	Q. carga
A1	1.0000000	0.0000000	3.3164267	0.5982976	0.0000000	0.0000000
B1	0.9879016	-1.8543568	0.0000000	0.0000000	0.0000000	0.0000000
C1	0.9536614	-6.9812419	0.0000000	0.0000000	1.6999906	0.9999983
D1	0.9484590	-7.2374464	0.0000000	0.0000000	2.2999904	1.1100034
E1	0.9850498	-4.6922337	0.0000000	0.0000000	0.0000000	0.0000000
F1	0.9456693	-7.9608597	0.0000000	0.0000000	1.8999941	1.1700020
G1	0.9869121	-5.5954804	0.0000000	0.0000000	0.0000000	0.0000000
H1	1.0000000	-3.8390257	1.7000136	1.1659418	0.0000000	0.0000000
I1	1.0000000	-5.1440193	1.0000125	1.1118635	0.0000000	0.0000000

Los flujos de potencia a través de las líneas de transmisión y transformadores se presentan en la tabla 5.2.

Tabla 5.2 Flujos de Potencia a través de líneas y transformadores

Nodo Env.	Nodo Recep.	P.Env-Recep	QEnv-Recep	P.Recep-Env	QRecep-Env
A1	B1	3.3164079	0.5982943	-3.2936949	-0.4847291
H1	E1	1.6999995	1.1659376	-1.6915007	-1.1234436
I1	G1	0.9999991	1.1118581	-0.9955267	-1.0894958
B1	C1	1.1869578	0.2630977	-1.1698619	-0.2807609
B1	D1	1.2468506	0.3285684	-1.2275769	-0.3308618
B1	E1	0.8598862	-0.1069417	-0.8536190	0.0463193
C1	D1	0.2529339	0.2151086	-0.2525794	-0.2445851
C1	E1	-0.5533728	-0.3763223	0.5582487	0.2767285
C1	F1	0.3505371	0.0755657	-0.3495087	-0.1480685
C1	G1	-0.5802359	-0.6335893	0.5854365	0.5856874
D1	E1	-0.8198427	-0.5345516	0.8281700	0.4918441
E1	G1	0.2656907	-0.1215862	-0.2650494	0.0231650
E1	F1	0.8930099	0.4301343	-0.8827333	-0.4758517
F1	G1	-0.6677575	-0.5460817	0.6751400	0.4806401

En la Tabla 5.3 se presenta una lista de medidores los cuales han sido numerados y clasificados dependiendo el tipo de potencia que miden, se indica también los nodos de envío y recepción a los que están asignados. La numeración y los nodos serán los utilizados durante este análisis.

Tabla 5.3 Asignación de medidores

Medición	Potencia Activa		Medición	Potencia Reactiva	
	Nodo Envío	Nodo Recepción		Nodo Envío	Nodo Recepción
1	B1	C1	29	B1	C1
2	B1	D1	30	B1	D1
3	B1	E1	31	B1	E1
4	C1	D1	32	C1	D1
5	C1	E1	33	C1	E1
6	C1	F1	34	C1	F1
7	C1	G1	35	C1	G1

8	D1	E1	36	D1	E1
9	E1	G1	37	E1	G1
10	E1	F1	38	E1	F1
11	F1	G1	39	F1	G1
12	C1	B1	40	C1	B1
13	D1	B1	41	D1	B1
14	E1	B1	42	E1	B1
15	D1	C1	43	D1	C1
16	E1	C1	44	E1	C1
17	F1	C1	45	F1	C1
18	G1	C1	46	G1	C1
19	E1	D1	47	E1	D1
20	G1	E1	48	G1	E1
21	F1	E1	49	F1	E1
22	G1	F1	50	G1	F1
23	A1	B1	51	A1	B1
24	H1	E1	52	H1	E1
25	I1	G1	53	I1	G1
26	B1	A1	54	B1	A1
27	E1	H1	55	E1	H1
28	G1	I1	56	G1	I1

Al momento de detectar e identificar los diferentes tipos de error se hará uso de diferentes herramientas para lograr su eliminación del sistema, tales como modelación de interruptores, expansión de nodos eléctricos a nivel nodo-interruptor, cálculo de la mediana del espectro y el valor máximo del valor residual normalizado.

5.2.1 Estimación con errores anormales de medición

En esta parte se llevarán a cabo simulaciones donde se han colocado errores anormales a mediciones, partiendo de lo explicado en el Capítulo IV respecto a la forma de afectar de los errores a los residuales normalizados, se ilustra la forma de identificación de la medición errónea para posteriormente eliminarla, donde una vez eliminada se hará un nuevo estudio de estimación verificando con esto si existen más errores en el proceso de estimación o si es confiable el resultado estimado.

5.2.1.1 Errores anormales en dos mediciones

En este caso se introducirán dos errores anormales a medidores de potencia activa, las mediciones a afectar serán:

Error de 49σ al Flujo de Nodo B1 a Nodo D1 (medición 2)

Error de 23σ al Flujo de Nodo C1 a Nodo G1 (medición 7)

La tabla 5.4 presenta los resultados obtenidos:

Tabla 5.4 Resultados

FACTOR		VALOR	
Valor del Error de Convergencia		2.03e-5	
Número de Iteraciones		4	
Grados de Libertad		66	
Valor α para la prueba Xi-cuadrada		0.05	
Indice J		2911	
Límite de la prueba Xi-cuadrada		86	
Límite de la prueba t-student		1.66	
Valor del máximo error normalizado		48.3	
Número de mediciones afectadas		6	
Mediciones más afectadas		No. Medición	Nodo Envío
		2	B1
		7	C1
		26	B1
No. Repeticiones nodo envío más afectado	No. Repeticiones nodo recepción más afectado	Flujo P por Nodo envío	Flujo P por Nodo recepción
3	1	> 1e-4	> 1e-4
Valor de la Mediana del Espectro: 0.67			

En este caso el índice J fue de 2911 lo cual indica la presencia de algún tipo de error, ya que este valor es mucho mayor que el límite de la prueba Xi-cuadrada (86).

El algoritmo detecta en primera instancia la presencia de un error anormal (índice $J >$ límite χ^2), del diagrama de la Fig. 4.9 se observa que las características de los residuales no corresponden a un error en topología, continuándose la identificación del error. El algoritmo dada la forma de ser afectados los residuales (Figura 5.2), identifica al error como de medición.

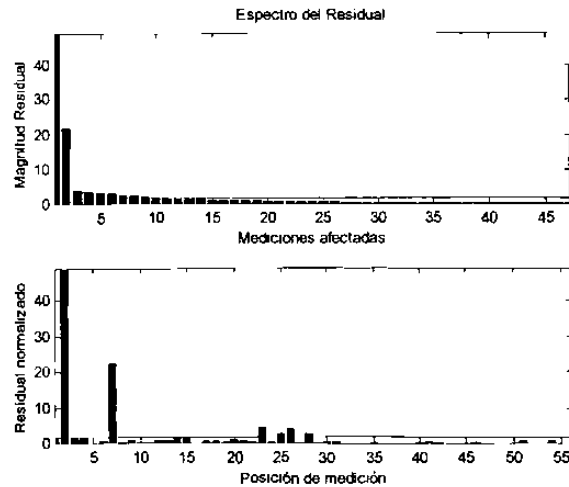


Fig. 5.2 Espectro y residuales normalizados

La Figura 5.2 muestra los residuales normalizados de los diferentes medidores, se observa que la medición 2 fue la más afectada seguida de la medición 7, las cuales son las mediciones afectadas. Una vez identificada la medición con mayor residual se procede a su eliminación del proceso de estimación.

En este sistema la forma de afectar los residuales de un error de medición difiere de la común debido a que es un sistema muy mallado, y cuenta con mediciones en todos los nodos y líneas, por lo que cuenta con suficiente información para no afectar la medición del extremo opuesto.

La tabla 5.5 muestra el resultado de eliminar la medición 2 del estimado:

Tabla 5.5 Resultados

FACTOR		VALOR	
Valor del Error de Convergencia		2.12e-5	
Número de Iteraciones		4	
Grados de Libertad		65	
Valor α para la prueba Xi-cuadrada		0.05	
Índice J		503	
Límite de la prueba Xi-cuadrada		84.8	
Límite de la prueba t-student		1.66	
Valor del máximo error normalizado		21.7	
Número de mediciones afectadas		3	
Mediciones más afectadas		No. Medición	Nodo Envío
		6	C1
		24	I1
		27	G1
No. Repeticiones nodo envío más afectado	No. Repeticiones nodo recepción más afectado	Flujo P por Nodo envío	Flujo P por Nodo recepción
1	3	> 1e-4	> 1e-4
Valor de la Mediana del Espectro: 0.50			

En esta nueva simulación se observa que el valor del índice J disminuyó significativamente con respecto al de la primera simulación, pasando de 2911 a 503, por lo que una vez eliminada la medición 2 el estimado se mejora, pero aún el índice J es mayor que el límite de la prueba Xi-cuadrada, por lo que el algoritmo trata de identificar nuevamente al error presente en el estimador.

Se observa que los grados de libertad se reducen, lo cual es debido a la medición eliminada, por lo que los factores dependientes de este valor se modifican. El límite de la prueba Xi-cuadrada pasa de un valor de 86 a un valor de 84.8.

El algoritmo en primera instancia trata de identificar al error como de topología, donde al no contar los residuales con las características propias de este tipo de error procede a tratar de identificarlo como uno de medición. Al ser el índice J mayor al límite de la prueba χ^2 y los flujos de potencia correspondientes a la medición con mayor residual diferentes de cero, el algoritmo lo identifica como un error de medición.

Una vez identificado al error como de medición se procede a eliminar la medición con mayor valor residual, en este caso fue la 6 la más probable de contener el error de medición. La medición 6 fue la más probable y no la 7 Figura 5.2, debido a que al eliminar la medición 2 las mediciones posteriores se recorren un lugar.

La Figura 5.3 muestra la forma en que el segundo error afecta al estimado y por tanto a los residuales. Analizando la gráfica se observa que sólo se tiene una medición con un residual elevado, por lo que se puede concluir que eliminando la medición 6 se tendrá un sistema sin errores anormales.

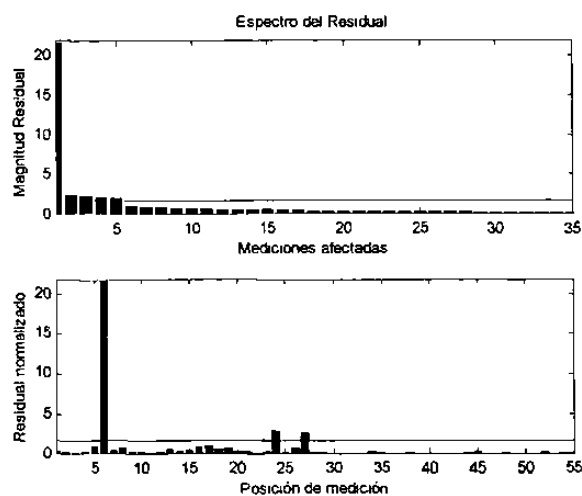


Fig. 5.3 Espectro y residuales normalizados

Una vez eliminada la medición 6, la tabla 5.6 muestra el estimado del sistema:

Tabla 5.6 Resultados

FACTOR		VALOR		
Número de Iteraciones		4		
Grados de Libertad		64		
Valor α para la prueba Xi-cuadrada		0.05		
Índice J		1.03		
Límite para la prueba Xi-cuadrada		83.7		
Límite para la prueba t-student		1.66		
Valor del máximo error normalizado		0		
Número de mediciones afectadas		0		
Mediciones más afectadas		No. Medición	Nodo Envío	Nodo Recepción
		-	-	-
No. Repeticiones nodo envío más afectado	No. Repeticiones nodo recepción más afectado	Flujo P por Nodo envío	Flujo P por Nodo recepción	
-	-	-	-	
		Valor de la Mediana del Espectro: 0		

El resultado muestra que el índice J es mucho menor que el límite de la prueba Xi-cuadrada, por lo que el sistema está libre de cualquier error anormal.

Como resumen de esta simulación se tiene que el algoritmo en primera instancia detectó la existencia de un error anormal el cual fue clasificado como de medición, posteriormente identificó a la medición errónea donde una vez eliminada se mejora el estimado del sistema, el algoritmo nuevamente detecta la presencia de errores anormales y clasifica a este segundo error como de medición, identificando la medición con mayor residual para posteriormente eliminar dicha medición, donde una vez eliminada el sistema queda libre de errores anormales.

5.2.1.2 Aumento del flujo de potencia en 3 mediciones

Este caso tiene la finalidad mostrar que el algoritmo tiene la capacidad de detectar e identificar errores aún y cuando el índice J sea menor que el límite de la prueba Xi-cuadrada, para esto se aumentará el valor de flujo de potencia a 3 mediciones:

Las mediciones a perturbar son:

Flujo de Nodo B1 a Nodo C1, Aumento de 23 σ (medición 1)

Flujo de Nodo C1 a Nodo F1, Aumento de 3.5 σ (medición 6)

Flujo de Nodo E1 a Nodo F1, Aumento de 9 σ (medición 10)

Al llevar a cabo la estimación de estado el algoritmo arroja los resultados presentados en la tabla 5.7.

Tabla 5.7 Resultados

FACTOR		VALOR	
Número de Iteraciones		4	
Grados de Libertad		66	
Valor α para la prueba Xi-cuadrada		0.05	
Índice J		637	
Límite de la prueba Xi-cuadrada		86	
Límite de la prueba t-student		1.66	
Valor del máximo error normalizado		23.2	
Número de mediciones afectadas		5	
Mediciones más afectadas		No. Medición	Nodo Envío
		1	B1
		10	E1
		6	C1
No. Repeticiones nodo envío más afectado	No. Repeticiones nodo recepción más afectado	Flujo P por Nodo envío	Flujo P por Nodo recepción
3	2	> 1e-4	> 1e-4
Valor de la Mediana del Espectro: 0.52			

El algoritmo identifica el error como de medición e identifica la medición con mayor valor residual normalizado, para este caso la medición 1 la cual corresponde a un medidor de flujo de potencia activa el cual está ubicado en los nodos B1-C1.

En este caso se observa que las tres primeras mediciones más afectadas corresponden a las mediciones donde se han introducido los errores. Una vez eliminada la medición con mayor residual se procede a calcular el estimado del sistema, dando como resultado (Tabla 5.8):

Tabla 5.8 Resultados

FACTOR		VALOR	
Número de Iteraciones		4	
Grados de Libertad		65	
Valor α para Xi-cuadrada		0.05	
Índice J		81.8	
Límite de la prueba Xi-cuadrada		84.8	
Límite de la prueba t-student		1.66	
Valor del máximo error normalizado		8.1	
Número de mediciones afectadas		2	
Mediciones más afectadas		No. Medición	Nodo Envío
		9	E1
		5	C1
No. Repeticiones nodo envío más afectado	No. Repeticiones nodo recepción más afectado	Flujo P por Nodo envío	Flujo P por Nodo recepción
1	2	> 1e-4	> 1e-4
Valor de la Mediana del Espectro: 0.22			

Ahora al momento de eliminar la medición uno, se tiene que el índice J es menor que el límite de la prueba Xi-Cuadrada, en un estimador convencional se consideraría como aceptable al estimado, pero el algoritmo presentado tiene la capacidad de detectar e identificar errores aún y cuando el índice J sea menor al valor establecido, esto, siempre y cuando se cumplan condiciones necesarias.

Para determinar si se trata de un error de medición o en parámetro, se utiliza el valor de la mediana del “espectro” y el valor máximo del residual normalizado.

Para un error de medición se sabe que el valor de la mediana debe ser menor a 0.25 o el valor máximo del error normalizado mayor a 4. Para este ejemplo el valor de la mediana fue igual a 0.22, por lo que se presume que el error es de medición.

Una vez modelado el error como de medición y eliminado la medición con mayor residual se obtiene un nuevo estimado del sistema, Tabla 5.9.

Tabla 5.9 Resultados

FACTOR		VALOR	
Número de Iteraciones		4	
Grados de Libertad		64	
Valor α para Xi-cuadrada		0.05	
Índice J		12	
Límite de la prueba Xi-cuadrada		83.7	
Límite de la prueba t-student		1.66	
Valor del máximo error normalizado		3.1	
Número de mediciones afectadas		1	
Mediciones más afectadas		No. Medición	Nodo Envío
		5	C1
No. Repeticiones nodo envío más afectado	No. Repeticiones nodo recepción más afectado	Flujo P por Nodo envío	Flujo P por Nodo recepción
1	1	> 1e-4	> 1e-4
Valor de la Mediana del Espectro: 0.18			

En esta nueva estimación se observa que existe una sola medición afectada (5) y donde el valor de la mediana es menor a 0.25, por lo cual el algoritmo identifica al error como de medición. Una vez eliminada la medición con mayor residual se lleva a cabo una nueva estimación del sistema, dando como resultado Tabla 5.10

Tabla 5.10 Resultados

FACTOR	VALOR
Número de Iteraciones	4
Grados de Libertad	63
Valor α para Xi-cuadrada	0.05

Índice J		0.9	
Límite de la prueba Xi-cuadrada		82.5	
Límite de la prueba t-student		1.66	
Valor del máximo error normalizado		0	
Número de mediciones afectadas		0	
Mediciones más afectadas		No. Medición	Nodo Envío
		-	-
No. Repeticiones nodo envío más afectado	No. Repeticiones nodo recepción más afectado	Flujo P por Nodo envío	Flujo P por Nodo recepción
1	1	> 1e-4	> 1e-4
Valor de la Mediana del Espectro: 0			

Donde no hay ninguna medición afectada por lo que el algoritmo determina que no hay ningún tipo de error anormal en el sistema.

Con este caso se muestra que el algoritmo es capaz de identificar errores anormales aún y cuando el índice J es menor al límite de la prueba Xi-cuadrada. Se observa que el valor encontrado para la mediana del espectro sirve para identificar de manera correcta al error de medición.

5.2.2 Estimación de estado con errores en parámetros

Este tipo de error tiene la característica de afectar en comparación con los de medición a un gran número de residuales, provocando con esto que el valor de la *mediana* del espectro aumente con respecto a los de medición.

Se consideran errores máximos de hasta un 50% en los valores de los parámetros. En caso donde el error en parámetro sea demasiado grande es posible que el índice J llegue a ser mayor que el límite de la prueba Xi-cuadrada, donde el algoritmo lo identificará como un error de topología o medición dependiendo del número residuales afectados; Para el primer caso el algoritmo identificará a la subestación con el mayor número de residuales afectados como la sospechosa de contener al error, indicando con esto la necesidad de llevar a un nivel nodo-interruptor a la subestación para estimar los flujos de potencia a través de interruptores. En este punto al igual que para los errores en topología si existe alguna medición dentro de la subestación se observará que el valor de la medición corresponde con el valor estimado del interruptor correspondiente, por lo que se presumirá como de parámetro debido a su similar forma de impactar a los residuales. En caso de no existir medición dentro de la subestación, el operador con base a los estados de los interruptores determinará si se trata de un error en topología o en parámetro. Para el segundo caso el algoritmo identificará a la medición con mayor residual y la eliminará, al llevar a cabo nuevamente la estimación de estado se tendrá que el índice J no ha disminuido (pudiendo inclusive ser mayor debido a la eliminación de una medición correcta) donde el algoritmo identificará nuevamente un error anormal identificándolo como de medición, el proceso de identificación y eliminación puede llegar a eliminar tantas mediciones que es posible eliminar las mediciones correspondientes a la línea con el error en parámetro, por lo que el estimador de estado no encontraría ningún error, no tanto por haber eliminado el error si no por la eliminación de mediciones clave.

Del diagrama de la Figura 4.9 se sabe que este tipo de error es el último al cual el algoritmo trata de identificar, como se ha comentado el algoritmo presentado detectará

este tipo de errores siempre y cuando el índice J sea menor al límite de la prueba Xi-cuadrada, condicionado a que exista al menos una medición con un residual normalizado arriba del límite de la prueba t-student.

5.2.2.1 Error del 20% en L2, 30% en L4 y 25% en L10

En este caso se modificarán los parámetros de la línea dos un 20%, de la línea cuatro un 30% y de la línea diez un 25%, se eligieron tres líneas con el fin de demostrar que el algoritmo funciona con errores múltiples. El resumen de la estimación inicial se presenta en la Tabla 5.11

Tabla 5.11 Resultados

FACTOR		VALOR	
Número de Iteraciones		4	
Grados de Libertad		66	
Valor α para Xi-cuadrada		0.05	
Índice J		56	
Límite de la prueba Xi-cuadrada		86	
Límite de la prueba t-student		1.66	
Valor del máximo error normalizado		2.9	
Número de mediciones afectadas		6	
Mediciones más afectadas		No. Medición	Nodo Envío
		13	D1
		2	B1
		10	E1
No. Repeticiones nodo envío más afectado	No. Repeticiones nodo recepción más afectado	Flujo P por Nodo envío	Flujo P por Nodo recepción
4	2	> 1e-4	> 1e-4
Valor de la Mediana del Espectro: 0.54			

Como se sabe el algoritmo identifica a un error en parámetro cuando el valor de la mediana es mayor a 0.25 y el valor máximo de residuales es menor o igual a 4. En este caso se tiene que el valor de la mediana es igual a 0.54 y el valor máximo del residual

normalizado es igual a 2.9, por lo que el algoritmo identifica al error como de parámetro y no de medición.

En la Figura 5.4 se observa la forma de impactar de los errores en parámetro sobre los residuales.

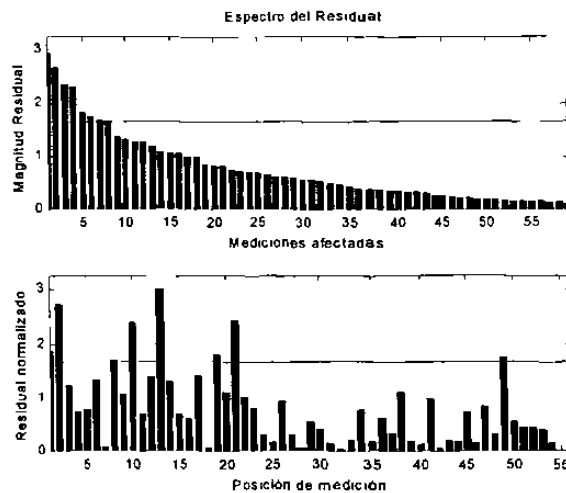


Fig. 5.4 Espectro y residuales normalizados

Como se ha mencionado las diferencias principales entre errores de medición y errores en parámetro son:

- **Un error anormal de medición afecta a pocas mediciones, donde la medición errónea tiene un residual usualmente mayor a 4.**
- **Un error anormal en parámetro afecta a muchas mediciones donde el valor residual máximo generalmente no es mayor a 4.**

En este caso el algoritmo identificó al error como de parámetro, por lo que es necesario modelar la línea de transmisión asociada a la medición con mayor residual como *interruptor con valor desconocido*. Se presenta a continuación los resultados relevantes de modelar la línea ubicada entre los nodos D1-B1 (Línea 2) como interruptor con valor desconocido.

Tabla 5.12 Potencias y parámetros estimados

Grados de Libertad		62			
Indice J		30			
Limite de la prueba Xi-cuadrada		81			
Limite de la prueba t-student		1.67			
Potencia activa de envío		Potencia activa de recepción			
1.2492		-1.2269			
Potencia reactiva de envío		Potencia reactiva de recepción			
0.3362		-0.3282			
Valor Impedancia		Valor Admitancia		Valor Y/2	
Real	Imaginaria	Real	Imaginaria	Imaginaria	
0.010984	0.074000	1.962600	-13.222222	0.070456	Real
0.009153	0.061666	2.355123	-15.866639	0.084547	Errónea
0.009925	0.072194	1.868983	-13.594479	0.063172	Estimada

Se observa que el índice J disminuye al momento de modelar la línea como interruptor, pasando de 56 a 30; en la Tabla 5.12 se muestran los valores estimados de flujos de potencia activa y reactiva de envío y recepción a través de la línea, los cuales se consideran como variables de estado por el estimador de estado. Estos valores estimados de flujo junto con los voltajes nodales hacen posible estimar los valores de parámetros de la línea, donde una vez estimados se observa que los valores estimados son muy cercanos a los reales.

Al actualizar los valores de los parámetros, reactivar la línea y volver a correr el algoritmo de estimación se tiene:

Tabla 5.13 Resultados

FACTOR	VALOR
Número de Iteraciones	4
Grados de Libertad	62
Valor α para Xi-cuadrada	0.05
Indice J	28
Límite de la prueba Xi-cuadrada	81
Límite de la prueba t-student	1.67
Valor del máximo error normalizado	2.5

Número de mediciones afectadas		2	
Mediciones más afectadas		No. Medición	Nodo Envío
		21	F1
		10	E1
No. Repeticiones nodo envío más afectado	No. Repeticiones nodo recepción más afectado	Flujo P por Nodo envío	Flujo P por Nodo recepción
2	2	> 1e-4	> 1e-4
Valor de la Mediana del Espectro: 0.46			

En este caso nuevamente el índice J es menor al límite de la prueba Xi-cuadrada, por lo cual el algoritmo trata de identificar al error presente, donde al verificar el valor de la mediana y la magnitud máximo de residuales el algoritmo identificó nuevamente al error como de parámetros. El valor de la mediana (0.46) es mayor a 0.25 y el valor máximo de residuales (2.5) menor a 4.

Al modelar la línea correspondiente a la medición 21 (Línea 10) como interruptor con estado desconocido se obtiene:

Tabla 5.14 Resultados

FACTOR		VALOR	
Número de Iteraciones		4	
Grados de Libertad		62	
Valor α para Xi-cuadrada		0.05	
Índice J		1.4	
Límite de la prueba Xi-cuadrada		81	
Límite de la prueba t-student		1.67	
Valor del máximo error normalizado		0	
Número de mediciones afectadas		0	
Mediciones más afectadas		No. Medición	Nodo Envío
		-	-
No. Repeticiones nodo envío más afectado	No. Repeticiones nodo recepción más afectado	Flujo P por Nodo envío	Flujo P por Nodo recepción
-	-	> 1e-4	> 1e-4
Valor de la Mediana del Espectro: 0			

En donde ya no hay ninguna medición afectada por lo que el tercer error en parámetro no afecta substancialmente al estimado del sistema.

Los valores estimados de los parámetros de la segunda línea modelada son:

Tabla 5.15 Potencias y parámetros estimados

Potencia activa de envío		Potencia activa de recepción			
0.8944		-0.8804			
Potencia reactiva de envío		Potencia reactiva de recepción			
0.4296		-0.4738			
Valor Impedancia		Valor Admitancia		Valor Y/2	
Real	Imaginaria	Real	Imaginaria	Imagianria	
0.009611	0.064750	2.243000	-15.111111	0.061649	Real
0.007688	0.051800	2.803718	-18.888856	0.077061	Errónea
0.009876	0.064926	2.289943	-15.053730	0.060780	Estimada

Donde se observa que el valor estimado es muy cercano al valor real.

La Figura 5.5 muestra las gráficas de residuales normalizados para este ultimo caso:

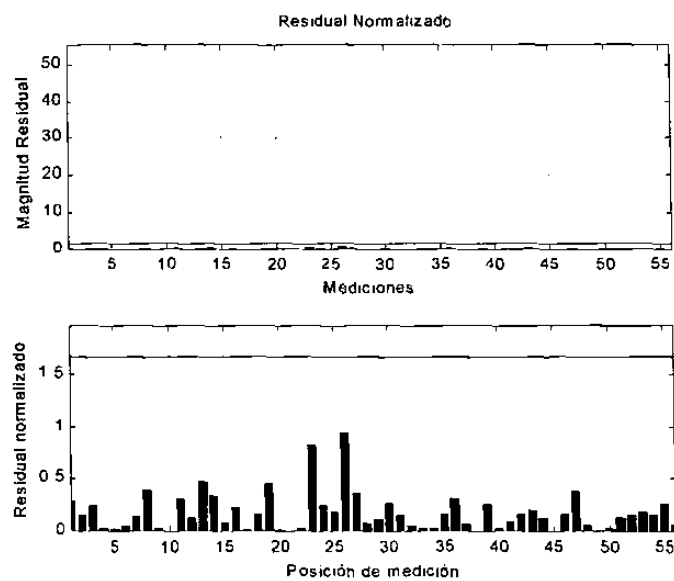


Fig. 5.5 Espectro y residuales normalizados

De la Figura 5.5 se tiene que aún y cuando existen mediciones afectadas, estas no han sido lo suficiente como para considerarlas anormales.

Un aspecto importante a recordar es que todo lo anteriormente expuesto aplica en el caso donde el índice J es menor que el límite de la prueba χ^2 -cuadrada.

5.2.3 Estimación de estado con errores en topología

Este tipo de error se puede producir cuando uno o más interruptores mandan una señal errónea de su estado, lo cual provoca que el procesador topológico de redes forme una matriz de conectividad que no corresponde con la del sistema, esto siempre y cuando el error en el estado del interruptor afecte la topología del sistema.

En las pruebas se ocupará el sistema de 9 nodos de la Figura 5.6.

5.2.3.1 Apertura de línea 3

En este caso se simulará un estado erróneo del interruptor uno de la subestación E1 (ver Apéndice E), con lo cual la línea estará desconectada en un extremo provocando con esto la creación de un nodo extra (E2) correspondiente al extremo desactivado de la línea, el sistema con la topología errónea se presenta en la Figura 5.6.

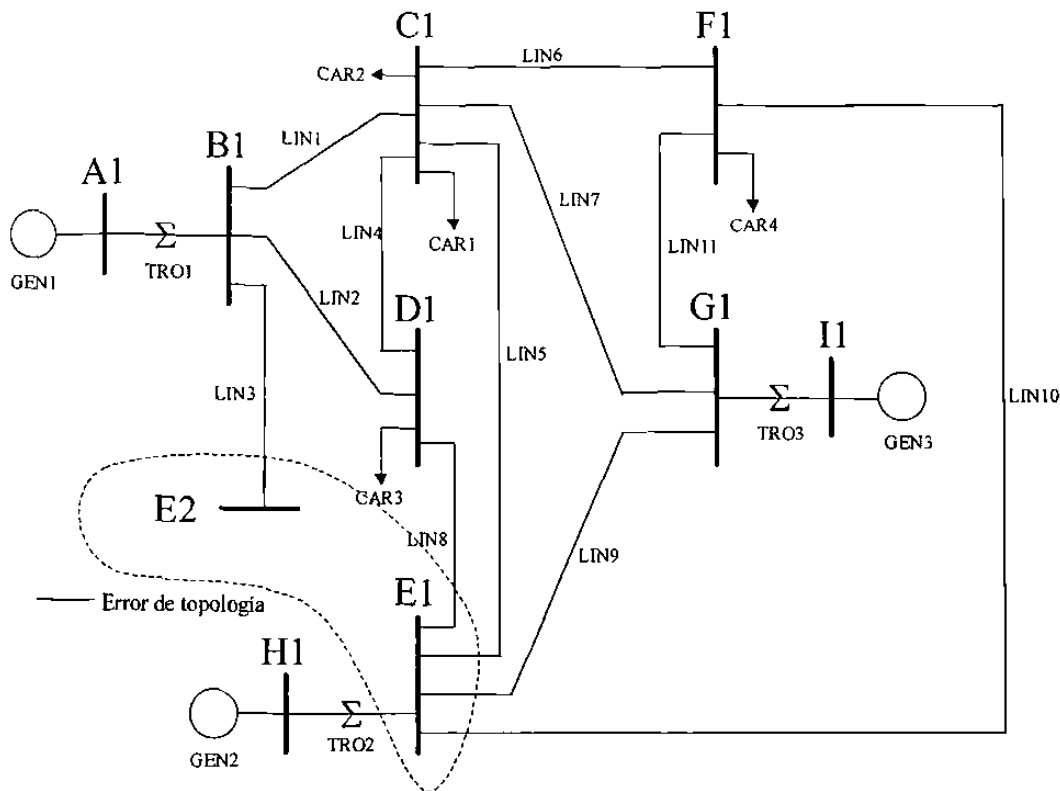


Fig. 5.6 Error en topología en subestación E

Al tener un modelo erróneo del sistema se tendrá que las mediciones recibidas no serán consistentes con la topología del sistema. La tarea del estimador generalizado es detectar al error de topología e identificar el interruptor con estado erróneo, donde una vez modificado el estado de dicho interruptor se actualizará la topología. Los resultados del análisis con error en topología se presentan a continuación.

Tabla 5.16 Resultados

FACTOR	VALOR
Número de Iteraciones	4
Grados de Libertad	67
Valor α para Xi-cuadrada	0.05
Indice J	988
Límite de la prueba Xi-cuadrada	87
Límite de la prueba t-student	1.66
Valor del máximo error normalizado	17.4
Número de mediciones afectadas	21