

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



**CONSIDERACIONES PRACTICAS PARA
LA UTILIZACION DE TECNICAS DE
ESTIMACION DE ESTADO EN
SISTEMAS DE POTENCIA**

TESIS

**QUE PARA OBTENER EL GRADO DE
MAESTRO EN CIENCIAS EN INGENIERIA
ELECTRICA, ESPECIALIDAD POTENCIA
PRESENTA**

Fernando Manuel Betancourt Ramírez

MONTERREY, N. L.

DICIEMBRE DE 1988

FM

TK3101

B4

C.1



1080072436

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

CONSIDERACIONES PRACTICAS PARA LA UTILIZACION DE TECNICAS DE
ESTIMACION DE ESTADO EN SISTEMAS DE POTENCIA

T E S I S

QUE PARA OBTENER EL GRADO DE
MAESTRO EN CIENCIAS EN INGENIERIA
ELECTRICA, ESPECIALIDAD POTENCIA

PRESENTA

FERNANDO MANUEL BETANCOURT RAMIREZ

TM
TK 31
B4



AGRADECIMIENTOS

En especial al Dr. Florencio Aboytes García por su valiosa asesoría que hizo posible la realización de este trabajo y un reconocimiento a su alta calidad humana y profesional.

A la Comisión Federal de Electricidad por el apoyo económico prestado y la oportunidad de participar dentro del Programa Doctoral en Ingeniería Eléctrica de la UANL.

A la Universidad Autónoma de Nuevo León por el decidido apoyo de las autoridades de la Facultad de Ingeniería Mecánica y Eléctrica.

A todos mis compañeros y amigos del plan doctoral por sus comentarios presentados en este trabajo.

DEDICATORIA

Sea este trabajo un tributo especial para mis padres:

Enrique Betancourt Ríos

y

Martha Ramírez de Betancourt

de quienes he recibido todo el amor , apoyo y comprensión.

A mis hermanos:

Enrique

Miguel Angel

Alejandrina

Marco Antonio

y Olga Martha

por el apoyo siempre prestado.

A mis tías:

Graciela Betancourt de Meza

y Esthela Betancourt Ríos

por el amor y apoyo siempre otorgado.

INDICE

RESUMEN	1
INTRODUCCION	2
CONTENIDO DE LA TESIS	3
PRINCIPALES CONTRIBUCIONES DE ESTA TESIS	4
CAPITULO I	
EL ESTIMADOR DE ESTADO EN SISTEMAS ELECTRICOS DE POTENCIA	
I.1 Introducci3n	5
I.2 Estudio de Flujo y Estimaci3n de Estado	5
I.3 Estimaci3n de Estado en Sistemas El3ctricos de Potencia	8
I.4 Formulaci3n del Problema	9
Enfoque General	9
Modelo	11
Detecci3n	11
Identificaci3n	11
Resumen de Etapas del Estimador	12
CAPITULO II	
FORMULACIONES PARA ESTIMACION DE ESTADO EN SISTEMAS ELECTRICOS DE POTENCIA	
Introducci3n	14
II.1 M3todo de Transformaciones	14
Estimador AEP	14
Planteamiento Matem3tico	14
Caracter3sticas Especiales de Estimador	19
II.2 Algoritmo de Estimaci3n de Estado	
Utilizando un M3todo Desacoplado	20
Modelo	20
Estimador de Estado Desacoplado	21
Algoritmo de Estimaci3n	23
Detecci3n e Identificaci3n de Datos Anormales	26
CAPITULO III	
ESTUDIO TEORICO DEL ESTIMADOR EN LA ZONA COAHUILA	
Introducci3n	28
III.1 Caso Base	28
III.2 Medici3n de Flujo Anormal REC-FRO-400 (1)	32
III.3 Desviaci3n Estandar de Mediciones en Funci3n del Factor de Escala	40

III.4 Medición de Flujo Anormal REC-FRO-400 (2)	41
III.5 Desviación Estandar en Medición de Voltaje	49
III.6 Medición de Voltaje Anormal REC-400	50
III.7 Asignación de Peso Reducido a Medición Anormal ..	54
III.8 Error en Parámetro de Línea REC-FRO en 400 KV ...	58

CAPITULO IV

ESTUDIO PRACTICO DEL ESTIMADOR EN LA ZONA COAHUILA

Introducción	66
IV.1 Caso Base	66
IV.2 Medición de Flujo Anormal REC-FRO-400	72
IV.3 Medición de Flujo Anormal MON-FRO-230 (Sin Redundancia)	75
IV.4 Medición de Flujo Anormal REC-NAV-230 (Con Redundancia)	79
IV.5 Medición de Flujo Anormal REC-NAV-230 (Con Ponderación Reducida)	82
IV.6 Medición de Inyección Cero	88

CAPITULO V

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

V.1 Conclusiones	91
V.2 Recomendaciones	93

APENDICE

ESTIMADOR POR EL CRITERIO DE LOS MINIMOS

CUADRADOS PONDERADOS	96
----------------------------	----

BIBLIOGRAFIA	100
--------------------	-----

RESUMEN

El objetivo principal de esta tesis es el de presentar consideraciones prácticas para la implantación de un algoritmo de estimación de estado en un Sistema Eléctrico de Potencia (SEP). Se utiliza como sistema de prueba una red eléctrica de la Comisión Federal de Electricidad, correspondiente a la Zona Coahuila, del Area de Control Noreste (ACNE).

Se presentan las bases conceptuales de un estimador de estado dentro de la operación del SEP, así como las características más relevantes que lo convierten en un valioso auxiliar del operador del sistema de potencia. Se concluye que la base de datos procesada por el estimador hace posible una toma de decisiones operativas más confiable y segura.

Se describe el fundamento matemático de dos formulaciones de estimación de estado que han mostrado su efectividad en aplicaciones prácticas. Se incluyen desarrollos matemáticos para el Método de Transformaciones (AEP) y el algoritmo Desacoplado Rápido para Estimación de Estado.

Las características de la formulación desacoplada son analizadas exhaustivamente mediante diferentes pruebas. Se estudia el efecto de las desviaciones estándar en mediciones, modelado de errores, redundancia del esquema de medición, detección e identificación de errores anormales y la influencia del criterio de convergencia. De esta forma, se llega finalmente a un estimador ajustado.

Se presentan diversos casos teóricos y prácticos. En los primeros se simulan las mediciones de campo en base a los resultados de una corrida de flujos para la Zona Coahuila. En el segundo, las mediciones utilizadas son las disponibles en el Sistema de Información y Control en Tiempo Real (SICTRE) del ACNE. Las mediciones son tomadas por terminales remotas ubicadas en diversas subestaciones y plantas del sistema estudiado.

Se incluyen conclusiones y recomendaciones que presentan los factores más relevantes a considerar en la implantación de un Estimador de Estado.

INTRODUCCION

La tarea de una compañía de suministro de energía eléctrica consiste en proporcionar el servicio en forma confiable y económica a los usuarios. Para ello se establecen sistemas de generación, transmisión y distribución de energía. En su conjunto forman un Sistema de Potencia.

Todo sistema está sometido a perturbaciones externas e internas, las cuales pueden alterar temporal o permanentemente el funcionamiento de alguno de sus componentes. La filosofía actual de operación de un Sistema de Potencia contempla no solo la protección y control de componentes separados o subsistemas, sino que se orienta a realizar una simulación del comportamiento global del sistema, ante la influencia de variables externas e internas.

El advenimiento de la computadora digital, con su rapidez y capacidad para el manejo masivo de información, ha hecho posible la operación de una red eléctrica desde una oficina de control central. En el Centro de Control se vigila periódicamente el estado eléctrico de la red y se realiza la simulación de fallas antes de efectuar cambios en la topología de la misma. Esto, con la intención de mantener un nivel apropiado de seguridad y confiabilidad en el sistema. Dada la rapidez con que se propaga el efecto de una falla sobre la red, las acciones correctivas desde el Centro de Control serían demasiado lentas, aún realizadas por una computadora, con los medios actuales. En ese caso, solo actúan las protecciones locales, las cuales no consideran el efecto de su operación sobre otros componentes de la red. De ahí que la simulación (Análisis de Seguridad) sea la base para lograr una protección preventiva del sistema.

Para realizar el análisis de una falla o cambio en la topología de la red, debe conocerse el estado eléctrico actual del sistema, lo cual no es una tarea simple, dada la naturaleza aleatoria de las mediciones y de los diversos factores que afectan la transmisión de datos; el conjunto de mediciones es perturbado continuamente por errores.

A fin de "filtrar" , en lo mayor posible, los errores aleatorios, eliminar las mediciones dudosas y determinar el conjunto coherente " más probable " para las variables eléctricas se hace uso de un Estimador de Estado, que es un algoritmo basado

en el análisis estadístico de las mediciones redundantes, relacionadas entre sí por las ecuaciones eléctricas de la red.

Desde el inicio de la aplicación de la estimación de estado en SEP, en 1969, se han propuesto e implementado diversos métodos para la estimación de las variables del Sistema Eléctrico. Entre los métodos que han mostrado resultados satisfactorios en el campo práctico se tienen el Método de Transformaciones (AEP) y el Método Desacoplado Rápido. Por lo cual es interesante la evaluación del funcionamiento de estos métodos en otra aplicación real.

El Estimador de Estado es un procesador de información, formado por etapas de configuración de la red, cálculo de variables de estado y la detección e identificación de errores anormales. El resultado de la interacción de estas etapas, da por resultado una base de datos validada y suficientemente confiable para llevar a cabo acciones de control.

CONTENIDO DE LA TESIS

Capítulo I.- Se describen las características del Estimador de Estado en el ámbito operativo del SEP. Se desarrolla un breve análisis comparativo de las características del estudio de flujos y el estimador de estado. Se señala el valor de este último como un procesador de información en línea. Finalmente, son expuestas globalmente las etapas que conforman la operación del Estimador.

Capítulo II.- En esta sección son descritos los fundamentos matemáticos de dos formulaciones para el Estimador de Estado en Sistemas de Potencia: Método de Transformaciones y el Método Desacoplado Rápido.

Capítulo III.- Este capítulo se dedica al estudio de la influencia de diversos factores en el estimador - exactitud del esquema de medición, magnitud de errores, criterio de convergencia, redundancia del esquema de medición, error en parámetros del modelo, etc. -. Se analiza el impacto sobre las tres etapas básicas que configuran al estimador de estado: cálculo de variables de estado, detección e identificación de errores anormales. Se presentan resultados de la prueba del Estimador Desacoplado en diversos casos teóricos, recurriendo a la

simulación de la Zona Coahuila, que es parte del Area de Control Noreste de CFE.

Capítulo IV.- En esta sección se prueba el estimador desacoplado en casos con mediciones reales. Se forma la base de datos del estimador por medio de las mediciones tomadas por el Sistema de Información y Control en Tiempo Real (SIGTRE) de CFE. Los casos desarrollados son similares a los abordados en el Capítulo III. Se evalúa el funcionamiento práctico del estimador ante diferentes situaciones.

Capítulo V.- Se resumen las conclusiones más importantes del trabajo, resultado de las diversas pruebas efectuadas con el estimador. Así mismo, se presentan recomendaciones sobre la implantación del algoritmo desacoplado y la sintonización de sus características básicas.

PRINCIPALES CONTRIBUCIONES DE ESTA TESIS

- o Clarificar las características más sobresalientes del Estimador de Estado Desacoplado en la operación de los Sistemas Eléctricos de Potencia.
- o Presentar los principales factores que influyen en el funcionamiento del Estimador de Estado, así como la evaluación de alternativas para el ajuste del estimador.
- o Presentación de resultados del algoritmo desacoplado en una red de potencia real, que es parte del Sistema Eléctrico Nacional.
- o Se propone la utilización de un algoritmo auxiliar en la etapa de identificación de errores anormales. Mostrando su valor en el caso de mediciones sin redundancia.

CAPITULO I

EL ESTIMADOR DE ESTADO EN SISTEMAS ELECTRICOS DE POTENCIA

I.1 Introducción

En la operación de un Sistema Eléctrico de Potencia (SEP) la continua supervisión del mismo hace posible una eficiente explotación de sus características, así como una oportuna aplicación de medidas correctivas ante contingencias. En la actualidad, el operador del Sistema de Potencia requiere hacer uso de herramientas más avanzadas para asegurar la operación del Sistema. Esto es debido principalmente a los siguientes factores:

a).- Dado su crecimiento y complejidad, los Sistemas Eléctricos de Potencia requieren mejores esquemas de medición y control, para operar con mayor eficiencia y seguridad.

b).- La instalación de grandes computadoras permiten la implantación de algoritmos avanzados de control en tiempo real.

El contar con un esquema de mediciones confiables es requisito fundamental para lograr una operación segura del SEP. Normalmente, la incertidumbre y los errores en las mediciones, impiden utilizar directamente la información de un sistema de adquisición de datos, de ahí que se requiera un proceso de validación de información.

El estimador de estado es fundamentalmente un procesador en línea de las mediciones de campo que se reciben en la computadora del Centro de Control. A través del estimador, es posible detectar e identificar datos anormales, presentando finalmente al operador un panorama confiable del estado del SEP. Para lograr lo anterior, el estimador utiliza la redundancia en la información para su evaluación estadística. Se parte del principio de que no toda la información es errónea, aunque ahí puede haber algunos datos anormales. De esta manera, se logra obtener una nueva base de datos suficientemente confiable para implantar acciones de control.

I.2 Estudio de Flujos y Estimación De Estado

El modelado matemático del comportamiento del SEP es una herramienta útil dentro del ámbito operativo, pues permite

establecer un juicio a priori de lo que será el estado del Sistema ante diversas condiciones de operación.

En el renglón de modelos computacionales del SEP se han desarrollado una amplia gama de ellos, desde los simuladores analógicos hasta los actuales del tipo digital. Estos últimos utilizan en su implementación un modelo matemático del problema, el cual se resuelve la mayoría de las veces mediante un proceso iterativo.

En los estudios de flujo convencionales siempre se llega a una solución ajustada a los datos. Lo anterior, aunado a las características de solución de los algoritmos utilizados, hace que se identifiquen tres problemas para la aplicación en línea de estos métodos.

- o Un error en los datos nodales se verá amplificado en las soluciones de flujos.
- o El método carece de la facultad de detectar, identificar y discriminar datos anormales.
- o Ante la falta de uno o varios datos, el método se encuentra imposibilitado para desarrollar el cálculo. Es decir, se requiere un número de datos igual a las variables a determinar.

Así, se impone la necesidad de recurrir a un método que aproveche la información redundante que se recaba constantemente en un Centro de Control.

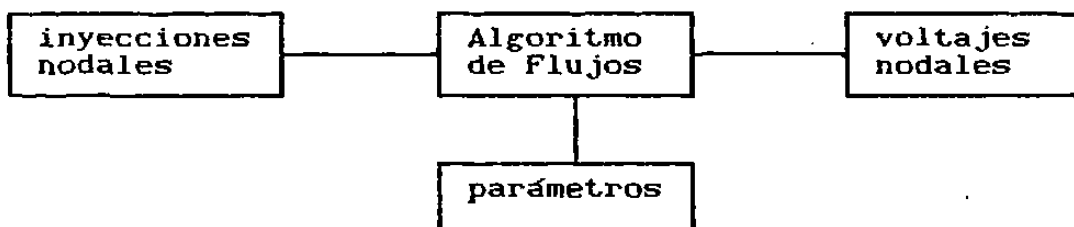
Las lecturas de variables del SEP dependerán de la calidad de la medición y de la contaminación en su transmisión al Centro de Control, sea por alteraciones en la topología de la red ó por ruido en el canal de comunicación. Así pues, se requiere que el método esté preparado para detectar, identificar y eliminar información anormal. La técnica que hace acopio de estas propiedades es la Estimación de Estado, su proceso de cálculo está basado en una formulación probabilística, las variables de estado se consideran aleatorias y los resultados se sujetan a pruebas de hipótesis para su validación.

En la tabla I.1 se muestran las principales características del estudio convencional de flujos y el proceso de estimación de estado, en cuanto a manejo de datos y tipo de solución.

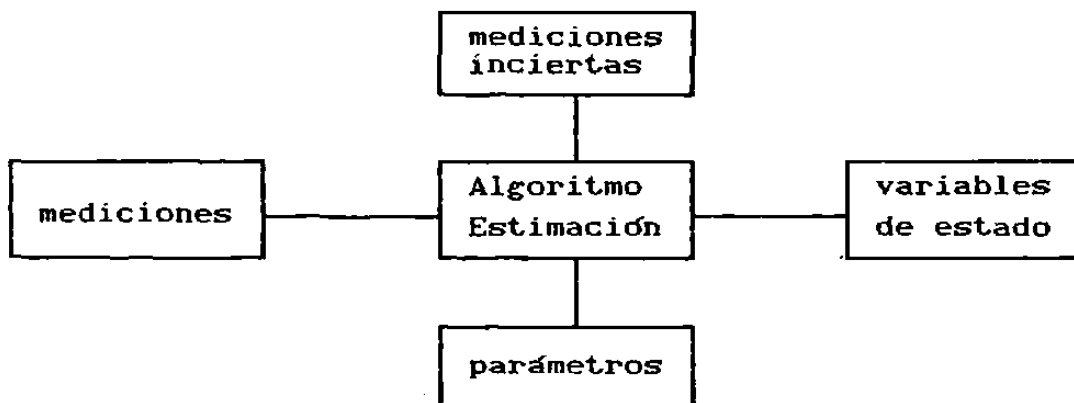
Tabla I.1
Estudio de Flujo Convencional vs.
Estimación de Estado.

Estudio Convencional	Estimación de Estado
Datos nodales. Solución exacta a los datos. Siempre observable. No es posible identificar errores.	Datos nodales y de rama. Solución no exacta a los datos. Observable por partes o totalmente. Posibilidad de detectar e identificar errores.

La figura I.1 muestra los flujogramas de ambas formulaciones.



a) Formulación convencional



b) Estimación de estado

Figura I.1 a) Formulación Convencional
b) Estimador de Estado

I.3 Estimación de Estado en Sistemas Eléctricos de Potencia

La mayoría de los Sistemas de Potencia son supervisados ya sea, en forma manual o automática. En el primer caso un operador es encargado de verificar, bajo un patrón de conducta establecido, el estado del sistema; mientras que en el segundo es un esquema de cómputo el que realiza la tarea de supervisar el sistema. En la operación de estos sistemas , continuamente se miden una serie de variables (flujos en líneas, magnitudes de voltaje, inyecciones de potencia activa y/o reactiva en los nodos), las cuales permiten establecer el estado eléctrico del sistema en operación. El esquema de supervisión deberá estar preparado para determinar el estado del sistema ante cambios del mismo, calculando posteriormente medidas correctivas convenientes.

Para desarrollar una supervisión adecuada del sistema se requiere contar con un gran número de mediciones en el Centro de Control. La medición lleva implícito un costo, no siendo práctico la medición de todas las variables, siendo más conveniente evaluar unas variables con base en la medición de otras.

El proceso de supervisión deberá estar preparado para determinar cuando una medición es anormal. El requisito básico de identificar la validez de las mediciones transmitidas al Centro de Control, viene a ser un tarea central del estimador de estado. Igualmente importante resulta el poder presentar al operador las condiciones del sistema sin la influencia de las mediciones anormales. El estimador de estado no solo debe detectar e identificar la medición anormal, sino que también proporcionar un estimado de estas mediciones . De esta manera en la mayoría de los casos la presencia de información con errores anormales será transparente al operador.

Se puede concluir que para una supervisión adecuada del Sistema de Potencia, se requiere:

- o Un sistema de medición de alta calidad.
- o Una computadora operando en tiempo real.
- o Una comunicación confiable entre la computadora del centro de control y las mediciones de campo.
- o Un Estimador de Estado eficiente.
- o Medios adecuados para el despliegue de resultados.

I.4 Formulación Del Problema

Enfoque General

El estimador de estado que se presenta es del tipo estático. Es decir, se limitará a estimar el estado del SEP bajo condiciones en estado estable ó variaciones lentas. El estimador de estado estático se puede definir como un algoritmo de procesamiento de datos que transforma las mediciones, en un punto en el tiempo, en un estimado del estado del sistema.

Las variables de estado para este problema son la magnitud del voltaje nodal (V) y su correspondiente ángulo de fase (θ). A partir del conocimiento de estas variables es posible evaluar cualquier variable del sistema.

Las variables de interés en este problema son:

- o Inyecciones nodales de potencia real y reactiva (P,Q).
- o Magnitudes de voltaje nodales.
- o Flujos de potencia real y reactiva en las líneas y ramas del SEP. (P_{ij} , Q_{ij}).

La figura I.2 esquematiza la operación de un estimador en el SEP. Se presenta como un sistema que recibe información, la procesa y genera resultados que validan la información empleada para el establecimiento del estado del SEP. Estas entradas y salidas se pueden enlistar como:

- Z .- Mediciones con "ruido" . El ruido se genera en el proceso de toma y transmisión de lecturas de campo hacia el Centro de Control.
- Z^* .- Mediciones sin ruido. Sería el resultado de un esquema de medición y transmisión perfectos.
- R .- Ruido de la medición.
- \hat{X} .- Vector de estado estimado, Incluye la magnitud voltaje y ángulos en cada nodo.
- \hat{Z} .- 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 .
- $Z - \hat{Z}$.- Residual o diferencia entre la medición de campo y su valor estimado. Se utiliza el residual

y su varianza como elementos de identificación de errores.

$J(\hat{X})$.- Índice de funcionamiento, se forma con la sumatoria residuales ponderados.

C .- Matriz de covarianzas de las cantidades estimadas.

S .- Matriz de covarianzas de residuales. El elemento diagonal s_{ij} es una medida de las varianzas del residual (cantidades medidas menos estimadas).

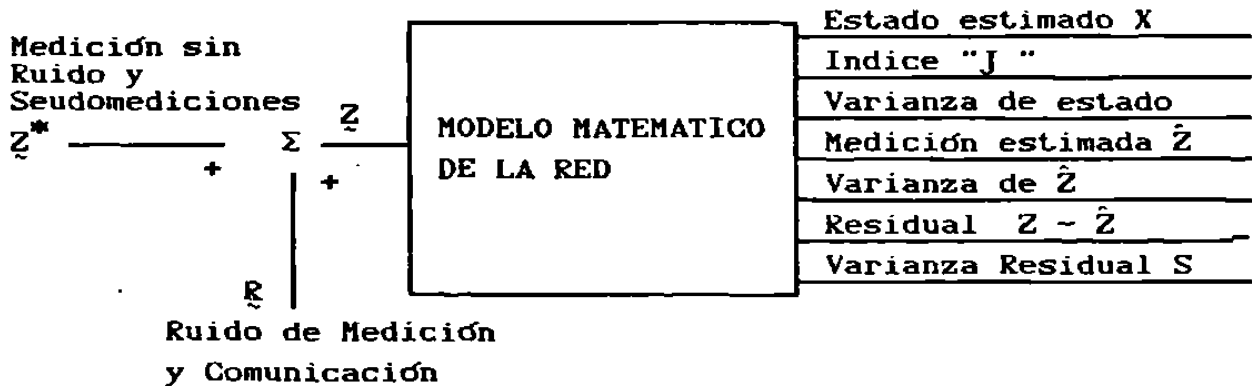


Fig.I.2 Estimador de Estado como un procesador de información de campo.

El estimador de estado proporciona una base de datos confiable para la operación del SEP. Esta base de datos es óptima en el sentido de que toda la información disponible ya fue procesada, para obtener una mejor estimación del estado real del sistema.

En un sistema de N nodos se tiene $2N-1$ variables de estado. Cuando son medidas solamente $2N-1$ variables, el estimador de estado se reduce a un estudio de flujo estocástico. La idea de medir más de $2N-1$ variables es la de aprovechar el efecto de filtrado de los errores de medición.

Los grados de libertad del esquema de mediciones y variables de estado se encuentra definido en la siguiente forma:

$$\text{Grados de Libertad} = (\text{No. Mediciones}) - (\text{No. Variables de Estado})$$

Modelo

El modelo estructural estático queda formado por una matriz de admitancia Y , la cual incluirá solo los elementos en los que se tienen mediciones. Las mediciones son modeladas como:

$$\underline{Z} = f(X^V) + \xi$$

siendo X^V el vector de variables de estado del modelo; quedando determinado $f(X^V)$ por las leyes de Kirchhoff y la matriz de admitancia Y . El término ξ es el error de medición, se modela como un vector de variables aleatorias con una distribución con media cero y varianza σ^2 , agrupandose estas en un arreglo w .

Para el proceso de estimación se asume que el modelo $(Y, f(X), w)$ es perfecto, contando el estimador con una sección en la que se tiene un algoritmo estructurador de la topología del SEP, en base al estado de los interruptores (configurador de la red).

Detección

Este problema considera que los parámetros de la red son correctos. Es decir, que la topología y parámetros de la red corresponden a los del sistema a modelar. Así pues, la detección de errores será resultado de una inconsistencia entre los datos y las varianzas asumidas para ellos. De ahí que los datos con errores anormales, se reflejen como un error en el modelado de σ . La forma de evaluar la detección de errores anormales es a través de una prueba de hipótesis sobre el índice J , en un intervalo de confianza del 99%. La prueba estadística se realiza al considerar que el índice J posee una distribución χ^2 (ji-cuadrada), ya que los errores de medición presentan una distribución normal. Así, valores de J fuera del intervalo de confianza manifiestan la presencia de datos anormales, motivando el rechazo de la información capturada.

Identificación

Esta etapa tiene por objeto el identificar la medición con error anormal, recurriendo para ello al análisis del valor

absoluto de los residuos de cantidades medidas menos cantidades estimadas normalizados por su desviación estándar . Estos tienen una distribución "T", permitiendo efectuar sobre ellos una prueba de hipótesis. Sin embargo , se tiene como alternativa de identificación la localización del residual normalizado de mayor valor, el cual corresponde a la medición con mayor probabilidad de error.

Lo anterior permite el empleo del siguiente algoritmo para la identificación de datos anormales:

- o Seleccionar la medición con el residual de mayor valor.
- o Remover la medición.
- o Llevar a cabo el proceso de estimación.
- o Realizar la prueba de detección de errores. Si los hubiera, reiniciar el ciclo.

La identificación de errores lleva implícita una reducción en la redundancia del esquema de medición, implicando ello el riesgo de que el sistema sea inobservable con el esquema de medición resultante.

Resumen de Etapas del Estimador

Las etapas sustanciales de un estimador de estado se pueden resumir como:

- . o Reconocimiento de la topología de la red por medio de un configurador.
- o Determinación de las variables de estado.
- o Detección de solución no aceptable (datos anormales).
- o Identificación de datos anormales.

La figura I.3 esquematiza la integración de las etapas fundamentales de un estimador de estado.

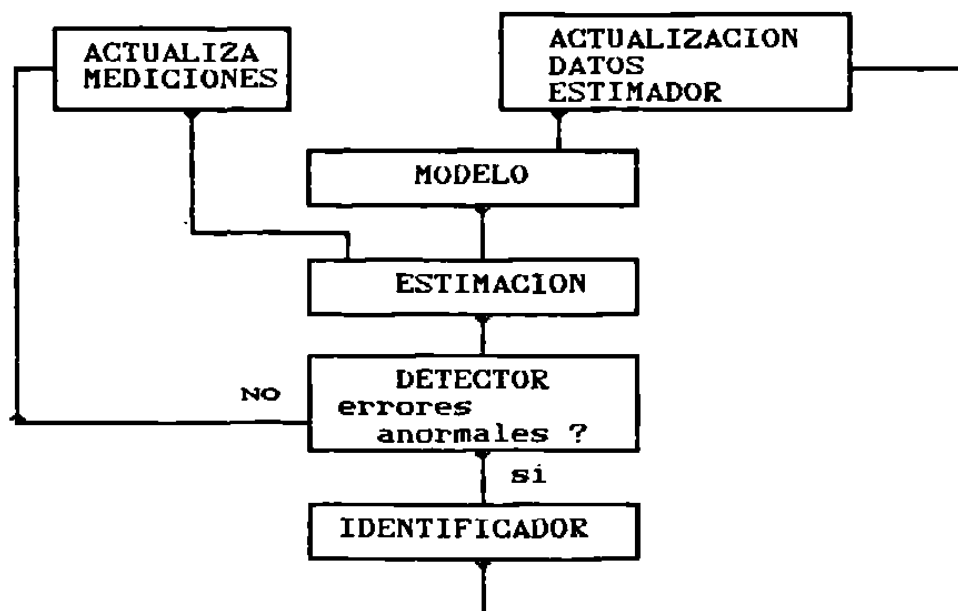


Fig. I.3 Etapas fundamentales del Estimador de Estado en Sistemas Eléctricos de Potencia

CAPITULO II

FORMULACIONES PARA ESTIMACION DE ESTADO EN SISTEMAS ELECTRICOS DE POTENCIA

Introducción

Se presentan dos formulaciones cuyas características han mostrado excelentes resultados dentro del contexto práctico de la estimación en Sistemas Eléctricos de Potencia:

- I Estimador por Método de Transformaciones (AEP).
- II Estimador de Estado por Jacobiano Desacoplado.

En la primera formulación la idea principal es la de transformar la medición o dato en una "medición nueva", siendo en general una combinación lineal de las variables de estado. La formulación II recurre a un jacobiano de los datos con respecto a las variables de estado, logrando de esa manera una linealización del modelo.

II.1 Método de Transformaciones

Estimador AEP

El proceso de este estimador se encuentra fundamentado en la estimación por el criterio de mínimos cuadrados. La no-linealidad de las ecuaciones se resuelve por medio de una transformación, resultando una formulación bastante atractiva desde el punto de vista computacional. El método utiliza solo mediciones de flujos de potencia en líneas. Las mediciones de magnitud de voltaje se modelan como valores verdaderos y sirven de referencia al modelo.

Planteamiento matemático

El problema se formula con base en la teoría de los mínimos cuadrados, se pretende minimizar:

$$J(\underline{X}) = (\underline{S}_m - \underline{S}_c)^t W (\underline{S}_m - \underline{S}_c)^* \quad (II.1.1)$$

donde:

\underline{S}_m es el vector de flujos de potencia compleja medidos.

\underline{S}_c es el vector de flujos de potencia compleja calculados.

W es la inversa de la matriz de covarianza de los errores de medición.

\underline{X} es el vector de variables de estado.

Se asume que los errores de medición N son variables aleatorias con distribución normal, centrados e independientes $E(N) = 0$, siendo W una matriz diagonal.

La ecuación de flujo de potencia compleja en la línea que conecta a los nodos p y q es :

$$S_{pq}^c = x_p (x_p - x_q)^* / z_{pq}^* + |x_p|^2 y_{pq}^* \quad (II.1.2)$$

donde:

S_{pq}^c es el flujo de potencia calculado del nodo p al nodo q

x_p es el voltaje complejo en el nodo p .

y_{pq} susceptancia de la línea en el nodo p .

z_{pq} impedancia serie de la línea $p-q$.

La diferencia de voltajes entre nodos queda expresada como:

$$v_{pq}^c = x_p - x_q \quad (II.1.3)$$

La expresión II.1.4 es el modelo matemático del flujo de potencia medido. Se forma añadiendo al flujo determinístico (tomado como valor verdadero) de la ecuación II.1.2 una variable que modele el error de medición (variable aleatoria)

$$S_{pq}^m = x_p \frac{(x_p - x_q)^*}{z_{pq}^*} + |x_p|^2 y_{pq}^* + n_{pq} \quad (II.1.4)$$

Si fuese posible tener sin error la medición de las diferencias de voltajes nodales, la ecuación II.1.4 adoptaría la siguiente forma:

$$S_{pq}^m = x_p \frac{(V_{pq}^v)^*}{z_{pq}^*} + |x_p|^2 y_{pq}^* + n_{pq} \quad (II.1.5)$$

donde

$$V_{pq}^v = (x_p^v - x_q^v)^* \quad (II.1.6)$$

Los términos de la ecuación II.1.5 quedan explicados de la siguiente forma:

S_{pq}^m medición del flujo de potencia complejo del nodo p al nodo q.

x_p^v voltaje complejo verdadero en el nodo p.

z_{pq} impedancia serie de la línea que conecta los nodos p y q del sistema.

y_{pq} susceptancia de la línea en el nodo p.

n_{pq} variable aleatoria representativa del error de medición con distribución normal centrada e independiente.

V_{pq}^v diferencia compleja de voltaje verdadera.

Al expresar las diferencias de voltaje entre nodos conectados, en función de los flujos de potencia medidos, se obtiene:

$$V_{pq}^v = \left(\frac{S_{pq}^m}{x_p^*} - x_p y_{pq} \right) z_{pq} - n_{pq} \quad (II.1.7)$$

donde,

$$n_{pq} = \frac{n_{pq}^* z_{pq}}{x_p^*} \quad (II.1.8)$$

De la ecuación II.1.7 se obtiene la expresión para las "mediciones" de diferencias de voltaje nodal en función de las lecturas de flujo de potencia en líneas.

$$V_{pq}^m = \left(\frac{S_{pq}^m}{x_p^*} - x_p y_{pq} \right) z_{pq}$$

siendo posible expresar la ecuación II.1.7 como:

$$v_{pq}^m = v_{pq}^v + n_{pq}'$$

$$o \quad v_{pq}^m = x_p^v - x_q^v + n_{pq}' \quad (II.1.9)$$

Se puede ver de la ecuación II.1.9 que el problema inicial de la ecuación II.1.4 se puede transformar en otro con características diferentes.

Las diferencias de voltaje calculadas se obtienen mediante:

$$v_{pq}^c = x_p - x_q \quad (II.1.10)$$

Las características estadísticas de n_{pq}' se pueden derivar de n_{pq} (ecuación II.1.8), pues z_{pq} es una constante conocida y x_p es el valor verdadero del voltaje complejo en el nodo p.

En base a lo anterior se puede concluir que n_{pq}' será insesgado, ya que:

$$E(n_{pq}') = E(n_{pq}^*) \frac{z_{pq}}{x_p^*} = 0$$

La varianza de n_{pq}' será:

$$\begin{aligned} \text{var}(n_{pq}') &= E(n_{pq}' n_{pq}'^*) \\ &= E(n_{pq}^* \frac{-z_{pq}}{x_p^*} n_{pq} \frac{-z_{pq}^*}{x_p}) \\ &= \frac{-|z_{pq}|^2}{|x_p|^2} E(n_{pq}^* n_{pq}) \end{aligned}$$

$$\text{var}(n_{pq}') = \frac{-|z_{pq}|^2}{|x_p|^2} \text{var}(n_{pq}) \quad (II.1.11)$$

De aquí se observa que n_{pq}' no se encuentra correlacionado, siendo su matriz de covarianza una matriz diagonal.

La función objetivo del problema transformado será :

$$J(\underline{X}) = (\underline{V}^m - \underline{V}^c)^t D (\underline{V}^m - \underline{V}^c)^* \quad (\text{II.1.12})$$

en donde D es la inversa de la matriz de covarianza de \underline{v}

La ecuación II.1.10 se puede expresar en forma matricial como:

$$\underline{V}^c = A \underline{X} \quad (\text{II.1.13})$$

en donde A representa a una matriz de incidencia, en donde cada fila posee dos elementos diferentes de cero, siendo uno de ellos uno y el otro menos uno.

La sustitución de la ecuación II.1.13 en la II.1.12 dará:

$$J(\underline{X}) = (\underline{V}^m - A \underline{X})^t D (\underline{V}^m - A \underline{X})^* \quad (\text{II.1.14})$$

En el proceso de aplicación del criterio de los mínimos cuadrados se requerirá que la matriz formada por el producto $A^t D A$ sea no-singular. Para salvar esta limitante se define al menos un voltaje complejo, permaneciendo éste invariante a lo largo del proceso de estimación. Con base en lo anterior la ecuación (II.1.13) se puede escribir como:

$$\underline{V}^c = B \underline{X}_b + C \underline{X}_c \quad (\text{II.1.15})$$

donde:

\underline{X}_b vector de voltajes complejos desconocidos

\underline{X}_c vector de voltajes complejos conocidos

B matriz compuesta de las columnas de A pertenecientes a los nodos de voltaje desconocido.

C matriz compuesta de columnas de A pertenecientes a los nodos de voltaje conocido

Sustituyendo la ecuación (II.1.15) en (II.1.12) se tendrá:

$$J(\underline{X}) = [(\underline{V}^m - C \underline{X}_c) - B \underline{X}_b]^t D [(\underline{V}^m - C \underline{X}_c) - B \underline{X}_b]^* \quad (\text{II.1.16})$$

Como el vector $\underline{V}^m - C \underline{X}_c$ es conocido, la ecuación de la solución final es:

$$(B^t D B) \underline{X}_b = B^t D (\underline{V}^m - C \underline{X}_c) \quad (\text{II.1.17})$$

Características Especiales del Estimador

- 1.- La matriz $B^t D B$ es real, siendo posible que las soluciones para la parte imaginaria y real del voltaje complejo sean desacopladas.
- 2.- $(B^t D B)$ se puede considerar constante, pues depende de la magnitud al cuadrado de los voltajes, que tiene poca variación.
- 3.- $(B^t D B)$ es simétrica, por lo cual solo una matriz triangular debe determinarse.
- 4.- $(B^t D B)$ es dispersa y susceptible al empleo de técnicas de dispersidad.
- 5.- $(B^t D B)$ depende directamente de mediciones disponibles, por lo que los cambios en las líneas que no fueron medidas no afectan a esta matriz.

II.2 Algoritmo de Estimación de Estado Utilizando un Metodo Desacoplado

Modelo

La idea de esta formulación sigue siendo la estimación de las variables de estado bajo el criterio de minimización de la suma de los cuadrados de los residuos ponderados:

$$J(X) = (Z - f(X))^t W (Z - f(X)) \quad (II.2.1)$$

en donde:

$J(X)$ es el índice a minimizar.

W es una matriz diagonal de ponderaciones.

Z representa el vector de mediciones.

$f(X)$ son los valores calculados a través del modelo.

Esta formulación maneja una linealización de las ecuaciones no-lineales que relacionan los datos (flujos en líneas, inyecciones y voltajes nodales) con las variables de estado (voltajes y ángulos) del SEP, recurriendo a una expansión de serie de Taylor:

$$f(X) = f(X_0) + f'(X_0) (X - X_0) + \dots$$

donde:

$$H = f'(X) = \frac{\partial f}{\partial X}$$

$$H_0 = f'(X_0)$$

la última expresión es la derivada parcial evaluada en la condición inicial. Los incrementos de variables de estado y mediciones se expresan como:

$$\Delta X = X - X_0$$

$$\Delta Z = Z - f(X_0)$$

de esta forma la aproximación de la serie de Taylor a dos términos resulta en:

$$f(X) = f(X_0) + H_0 \Delta X \quad (II.2.2)$$

La siguiente expresión es el resultado de sustituir la ecuación (II.2.2) en (II.2.1) en un formato matricial:

$$J(X) = (AZ - H_0 AX)^t W (AZ - H_0 AX) \quad (II.2.3)$$

La minimización de (II.2.3) con respecto a las variables de estado X resulta en:

$$(H_0^t W H_0) AX = H_0^t W AZ \quad (II.2.4)$$

Debido a que el modelo es una aproximación lineal del problema, se llega a la minimización de II.2.3 a través de un proceso iterativo.

Estimador de Estado Desacoplado

El estimador parte del siguiente esquema de mediciones:

$$Z = [Z_p \quad Z_q] \quad (II.2.5)$$

indicando Z_p y Z_q el conjunto de mediciones activas y reactivas respectivamente.

Los vectores Z_p y Z_q integran en sí mismos los siguientes conjuntos de mediciones:

$$Z_p = \begin{bmatrix} P_{km} \\ \\ P_k \end{bmatrix} \quad y \quad Z_q = \begin{bmatrix} Q_{km} \\ Q_k \\ V_k \end{bmatrix} \quad (II.2.6)$$

en donde los vectores internos quedan formados por las siguientes mediciones:

- P_{km} Mediciones de flujo de potencia activa en la línea que enlaza los nodos k y m. La medición se encuentra en el nodo k.
- P_k Mediciones de inyección de potencia activa en el nodo k.
- Q_{km} Mediciones de flujo de potencia reactiva en la línea que enlaza los nodos k y m. Medición en el nodo k.
- Q_k Mediciones de inyección de potencia reactiva en el nodo k.
- V_k Mediciones de magnitudes de voltaje en el nodo k.

Se define el vector ΔZ , representando la diferencia de cantidades medidas menos estimadas.

$$\Delta Z = \begin{bmatrix} \Delta Z_p \\ \Delta Z_q \end{bmatrix} \quad (II.2.7)$$

La matriz Jacobiana H presentará la siguiente estructura:

$$H(\theta, v) = \begin{bmatrix} H_{p\theta} & H_{pv} \\ H_{q\theta} & H_{qv} \end{bmatrix} \quad (II.2.8)$$

en donde;

$H_{p\theta}$ Es la submatriz que agrupa las derivadas de cantidades activas (flujos de potencia activa en líneas e inyecciones nodales) con respecto al ángulo de fase nodal.

H_{pv} Representa a la submatriz cuyos elementos son las derivadas parciales de las cantidades activas con respecto a la magnitud del voltaje nodal.

$H_{q\theta}$ Submatriz con elementos iguales a las derivadas parciales de las cantidades reactivas con respecto al ángulo de fase nodal.

H_{qv} Submatriz cuyos elementos son las derivadas parciales de las cantidades reactivas con respecto a la magnitud del voltaje nodal.

Se utilizan como ponderaciones de los residuos el inverso de las varianzas de las mediciones. Lo cual implica utilizar una matriz de ponderaciones igual a la matriz inversa de las covarianzas de las mediciones. Si se asume que las variables medidas no se encuentran correlacionadas. La matriz de ponderación es:

$$W = \begin{bmatrix} W_p & \\ & W_q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \sigma_p^{2-1} & \\ & \sigma_q^{2-1} \end{bmatrix} \quad (II.2.9)$$

siendo σ_p^{2-1} y σ_q^{2-1} el inverso de las varianzas de las mediciones de cantidades activas y reactivas.

De la ecuación II.2.4, se define una matriz de ganancia :

$$G = H^t W H = \begin{bmatrix} G_1 & G_3 \\ G_3^t & G_2 \end{bmatrix} \quad (II.2.10)$$

donde:

$$G_1 = H_{P\theta}^t W_P H_{P\theta} + H_{Q\theta}^t W_Q H_{Q\theta} \quad (II.2.11)$$

$$G_2 = H_{QV}^t W_Q H_{QV} + H_{PV}^t W_P H_{PV} \quad (II.2.12)$$

$$G_3 = H_{P\theta}^t W_P H_{PV} + H_{Q\theta}^t W_Q H_{QV} \quad (II.2.13)$$

Se define un vector de términos independientes en la parte activa como en la reactiva (T_P y T_Q respectivamente).

$$T_P = H_{P\theta}^t W_P \Delta Z_P + H_{Q\theta}^t W_Q \Delta Z_Q \quad (II.2.14)$$

$$T_Q = H_{QV}^t W_Q \Delta Z_Q + H_{PV}^t W_P \Delta Z_P \quad (II.2.15)$$

Algoritmo de estimación

El objetivo básico del algoritmo es el de generar estimados que minimizan el índice escalar J .

$$J(\theta, v) = [Z - h(\theta, v)]^t W [Z - h(\theta, v)] \quad (II.2.16)$$

donde:

$J(\theta, v)$ Índice de minimización de residuos.

Z Vector de mediciones activas y reactivas.

$h(\theta, v)$ Vector de estimaciones de las cantidades medidas en función de ángulos (θ) y voltajes (v).

W Matriz de ponderaciones activas y reactivas.

Los ángulos y voltajes que minimizan la ecuación II.2.16 satisfacen la siguiente ecuación matricial.

$$\begin{bmatrix} G_{P\theta} & G_{Pv} \\ G_{PV} & G_{Qv} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta\theta \\ \Delta v \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} T_P \\ T_Q \end{bmatrix} \quad (II.2.17)$$

en donde el vector de diferencias de variables de estado es :

$$\begin{bmatrix} \Delta\theta \\ \Delta v \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \theta_{k+1} - \theta_k \\ v_{k+1} - v_k \end{bmatrix} \quad (II.2.18)$$

siendo θ_k y v_k los valores calculados de ángulo y voltaje nodal respectivamente en la k-esima iteración.

El algoritmo que utiliza la matriz de ganancia G en su forma completa presenta la desventaja de invertir gran parte del tiempo del proceso estimador en evaluar y factorizar G en cada iteración. De ahí, que resulte atractivo el recurrir a una formulación en la cual se haga uso del desacoplamiento activo/reactivo y una matriz de ganancia constante. Las siguientes consideraciones son tomadas en cuenta para agilizar el proceso de cálculo.

1).- Se recurre al empleo de un perfil plano ($v = 1.0$ p.u y $\theta = 0.0$) en la evaluación de la matriz de ganancia G .

2).- Se desprecia el cambio de las cantidades activas y reactivas con respecto a la magnitud de voltaje y ángulo eléctrico nodal respectivamente (H_{Pv} y $H_{Q\theta}$ iguales a cero). Lo anterior permitirá un desacoplamiento de la matriz jacobiana, llegando a una matriz constante:

$$H = \begin{bmatrix} H_{P\theta} & 0 \\ 0 & H_{Qv} \end{bmatrix}$$

de donde las ecuaciones II.2.11 y II.2.12 se reducen a:

$$G_{p\theta} = H_{p\theta}^t W_p H_{p\theta} \quad (II.2.19)$$

$$G_{qv} = H_{qv}^t W_q H_{qv} \quad (II.2.20)$$

siendo, por lo tanto, la matriz de ganancia G :

$$G = \begin{bmatrix} G_{p\theta} & 0 \\ 0 & G_{qv} \end{bmatrix} \quad (II.2.21)$$

3).- Se desprecia la resistencia serie en la formación de la matriz jacobiana activa $H_{p\theta}$.

4).- Los vectores de términos independientes T_p y T_q se evalúan tomando en cuenta el desacoplamiento de la matriz H.

$$T_p = H_{p\theta}^t W_p \Delta Z_p \quad (II.2.22)$$

$$T_q = H_{qv}^t W_q \Delta Z_q \quad (II.2.23)$$

5).- Se dividen las mediciones de potencia activa y reactiva entre la magnitud de voltaje nodal calculado en la iteración correspondiente.

$$\hat{Z}_p = \begin{bmatrix} P_{km}/V_k \\ P_k/V_k \end{bmatrix} \quad (II.2.24)$$

$$\hat{Z}_q = \begin{bmatrix} Q_{km}/V_k \\ Q_k/V_k \\ V_k \end{bmatrix} \quad (II.2.25)$$

Esta técnica permite que las cantidades calculadas (en especial la parte reactiva) se comporten con una mayor linealidad

y por lo tanto presenten menor sensibilidad a cambios de estado.

El algoritmo en cuestión sigue la siguiente secuencia iterativa.

Etapa I

Resolver para $\Delta\theta$.

$$G_{p\theta} \Delta\theta = T_p$$

A partir de esta etapa se actualiza el vector de ángulos θ en función de su incremento $\Delta\theta$, sustituyéndose en el vector de términos independientes rectivos T_q en la siguiente etapa.

Etapa II

Resolver para Δv .

$$G_{qv} \Delta v = T_q$$

El algoritmo iterará entre las etapas I y II, hasta cumplir en forma simultanea con el siguiente criterio de convergencia :

$$\max_i |\Delta v_i^k| \leq 0.0001 \quad \text{y} \quad \max_i |\Delta\theta_i^k| \leq 0.0001$$

Detección e Identificación de Datos Anormales

Estos importantes atributos del estimador de estado se encuentran sustentados en pruebas de hipótesis. El estimador realiza esta función recurriendo al análisis estadístico de los residuos normalizados.

La aceptación ó rechazo de los resultados se lleva a cabo en la etapa de detección de errores anormales. Lo anterior consiste en verificar la certeza probabilística de los datos a través de una prueba de hipótesis sobre el índice J. Este índice tiene una distribución Ji-cuadrada (χ^2).

La identificación de datos con errores anormales se lleva a

cabo recurriendo al análisis estadístico del valor absoluto de los residuales normalizados.

$$t = \frac{|Z^m - Z^e|}{s \sqrt{\Pi_{ii}}}$$

donde;

Z^m - es la medición de la variable.

Z^e - es el estimado de la variable de interés.

$$s = \sqrt{\hat{J} / N_{gl}}$$

\hat{J} - valor mínimo del índice J.

N_{gl} - número de grados de libertad.

Π_{ii} - elemento diagonal i de la matriz de covarianzas.

$$\Pi = W^{-1} - H (H^t W H)^{-1} H^t$$

la matriz anterior se utiliza en forma desacoplada:

$$\Pi_P = W_P^{-1} - H_{P\theta} (H_{P\theta}^t W_P H_{P\theta})^{-1} H_{P\theta}^t$$

$$\Pi_Q = W_Q^{-1} - H_{Qv} (H_{Qv}^t W_Q H_{Qv})^{-1} H_{Qv}^t$$

Por medio de una prueba de hipótesis sobre el índice t es factible determinar los datos probabilísticamente anormales. t tiene una distribución "T" (t student).

CAPITULO III

ESTUDIO TEORICO DEL ESTIMADOR EN LA ZONA COAHUILA

Introducción

El propósito de este capítulo es el de mostrar las características operativas del estimador de estado desacoplado en Sistemas de Potencia. Es decir, se pretende estudiar el impacto que sobre los resultados tienen los siguientes factores:

- o Modelado del error en el equipo de medición.
- o Influencia de errores anormales en las mediciones.
- o Efecto del modelado del error sobre el proceso de detección e identificación de mediciones anormales.

El estimador es probado con una parte de la red del Area de Control Noreste (ACNE) perteneciente a la Comisión Federal de Electricidad. Con el objeto de evaluar el impacto de las diversas características, se parte de un caso base, el cual evolucionará progresivamente para mejorar sus características a través de diversas modificaciones.

III.1 Caso Base

A Sistema

Se estudia en este caso la parte del ACNE correspondiente a la Zona Coahuila , cuyo esquema unifilar es mostrado por la figura III.1 Esta zona se encuentra interconectada a otras en las barras de 230 KV. de la subestación Río Escondido (REC-230), y en 400 KV. de la subestación Villa de García (VDG-400).

La Zona Coahuila comprende a la Central Carboeléctrica Río Escondido con cuatro unidades generadoras de 300 MW cada una. Dos de estas unidades se encuentran sincronizadas a la barra de 400 KV y dos en 230 KV.

La zona en estudio incluye el siguiente esquema de reactores:

Lineas	Cantidad	Valor Nominal (MVAR)
REC-FRO-400	2	75
FRO-VDG-400	2	62
VDG-FRO-400	2	62

B Mediciones

La base de datos representativa del esquema de medición se formó por medio de una corrida de flujos para demanda máxima de 1988.

Las mediciones son simuladas agregando al valor de la corrida de flujos (valor verdadero) una cantidad aleatoria con distribución uniforme. Esta última modelará el error del instrumento, en función del error máximo esperado del mismo.:

$$VM = VV + \xi * FA \quad (III.1)$$

donde:

VM - es el valor medido.

VV - es el valor verdadero.

ξ - error máximo esperado

FA - es un número aleatorio con distribución uniforme en el rango -1 y 1.

El error ξ se tomó inicialmente como el 4% del valor verdadero, tanto en flujos como en inyecciones de potencia. Por otra parte, el valor de ξ tomado para los voltajes fue de 0.03% del valor verdadero.

La distribución de mediciones para este caso inicial es la siguiente:

Datos activos	
No. de mediciones de flujos en líneas.....	26
No. de mediciones de inyecciones	4
Total mediciones activas	30
Datos reactivos	
No. de mediciones de flujos en líneas.....	26
No. de mediciones de inyecciones	4
No. de mediciones de voltaje	2
Total mediciones reactivas	32
Número total de datos	62

Se tiene medición del flujo de potencia activa y reactiva en ambos extremos de las líneas de transmisión, así como en transformadores. Se miden en diversos puntos generación y carga (inyección positiva y negativa respectivamente). En la figura III.1 se presenta el esquema de medición utilizado.

C Datos Estadísticos

Se parte de la siguiente expresión para calcular inicialmente la desviación estándar de flujos e inyecciones activas y reactivas.

$$\sigma = 0.0052 * FS \quad (III.2)$$

En donde el factor de escala FS es cuatro veces el valor verdadero de la cantidad a estimar.

El conjunto de datos anterior forma un esquema con 39 grados de libertad. La prueba estadística de hipótesis para los resultados se efectúa sobre un intervalo de confianza de 99% de probabilidad para el índice J. Los límites inferior y superior de confianza son respectivamente 20.7 y 66.8, para una distribución ji-cuadrada (χ^2).

D Resultados

La corrida del estimador converge en tres iteraciones, arrojando un índice J de 55. Esto indica congruencia estadística entre los datos y cantidades estimadas con una probabilidad del 99%. Esto es debido a la ausencia de datos anormales en el estimador.

- - Medición de Flujo de Potencia en líneas o transformadores.
- ⊗ - Medición de inyección de Potencia nodal.
- ⊙ - Medición de Voltaje.

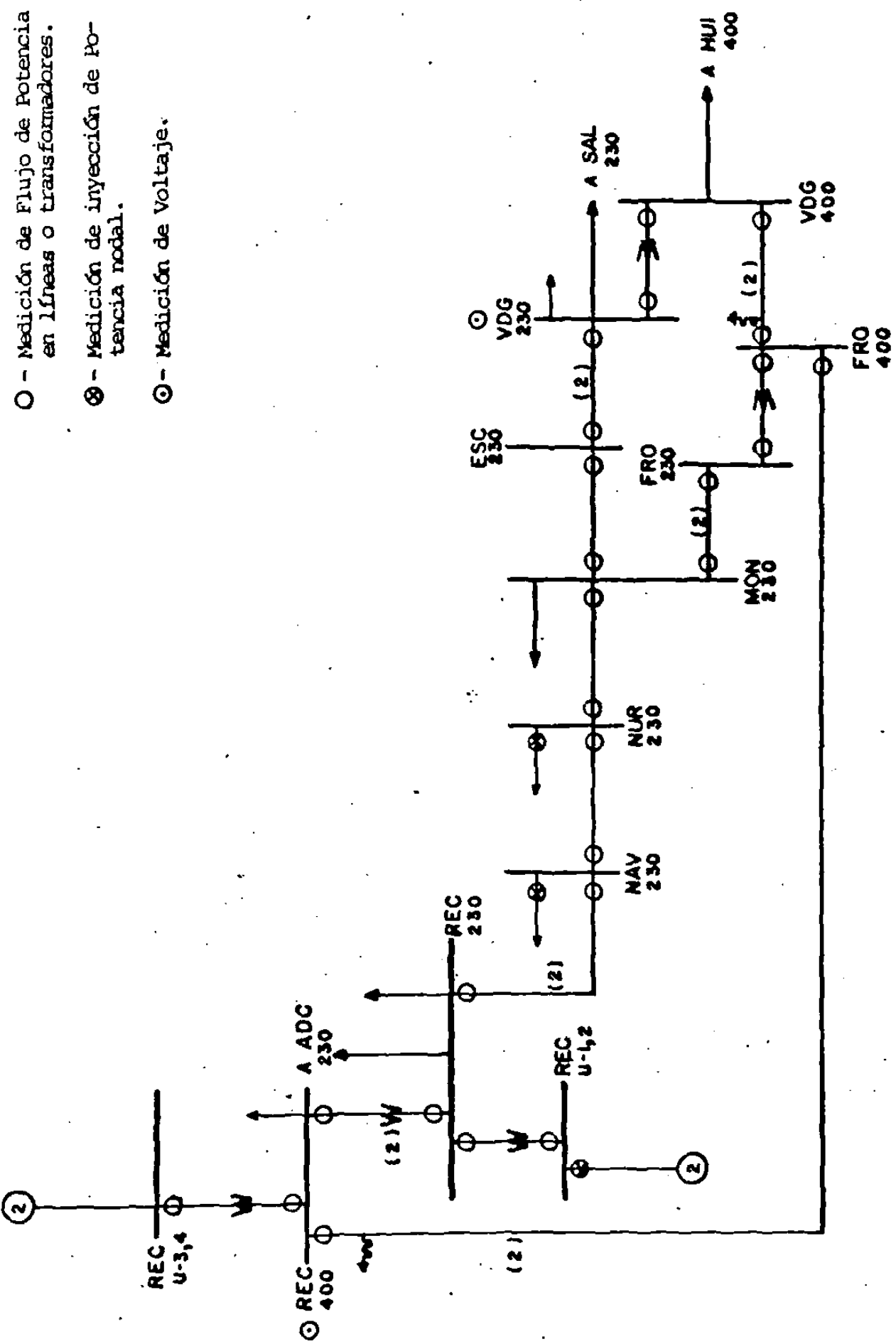


Figura III.1.1 Esquema de Medición en la Zona Coahuila
(Caso Teórico)

Se procede a continuación a evaluar el estado eléctrico de la red.

D.1 Flujos De Potencia

La tabla III.1.1 compara los valores verdaderos, medidos y estimados para flujos de potencia e inyecciones nodales en el sistema estudiado.

Las líneas de transmisión se indican en la tabla III.1.1 por el nombre de los dos nodos enlazados, y el nivel de voltaje. En el caso de un transformador, éste se indica por el nombre de la subestación seguido por los niveles de voltaje de los circuitos que enlaza. Para un transformador de generación se indica primero el nombre de la barra de alta tensión seguido por el generador involucrado.

D.2 Voltajes

En esta corrida se utilizan solamente los voltajes de los nodos VDG-230 y REC-400.

Los voltajes verdaderos, medidos y estimados son mostrados en la tabla III.1.2. La similitud entre valores verdaderos, medidos y estimados se debe al elevado peso dado a los voltajes medidos. Esto ayuda a lograr una convergencia adecuada (3 iteraciones), como a un buen condicionamiento de la matriz de ganancia desacoplada.

D.3 Varianzas De Flujos Y Voltajes

La tabla III.1.4 presenta una comparación de las varianzas de las cantidades medidas y estimadas. Una de las propiedades básicas de un buen estimador es presentar estimados con una menor varianza que los valores medidos. Es decir los estimados poseerán una mayor exactitud (probabilísticamente) que las cantidades medidas.

III.2 Medición Flujo Anormal REC-FRO-400 . (1)

Este caso prueba la capacidad del estimador para detectar mediciones anormales. Referido al caso base, se agregan errores de 20 y 17 desviaciones estándar en la medición activa y reactiva respectivamente para el flujo REC-FRO-400.

La red como los datos estadísticos del esquema de medición permanecen igual que en el caso base.

TABLA III.1.1
Flujos medidos y Estimados (caso base)

Flujo en línea	P*			Q*		
	verd	med	est	verd	med	est
REC-FRO-400	777.2	759.2	769.5	-127.4	-124.6	-130.1
FRO-REC-400	-766.0	-740.4	-758.7	-4.0	-4.1	-4.1
REC-NAV-230	173.0	176.6	172.2	25.6	25.0	25.6
NAV-REC-230	-172.4	-165.6	-171.8	-36.6	-31.5	-30.7
NAV-NUR-230	168.6	172.8	168.0	-4.0	-3.8	-3.9
NUR-NAV-230	-165.6	-170.2	-165.0	11.1	11.3	10.9
NUR-MON-230	118.6	118.1	119.4	-34.5	-33.8	-35.0
MON-NUR-230	-116.0	-118.8	-116.7	31.4	31.9	32.2
MON-ESC-230	110.4	110.2	110.7	-17.8	-17.2	-17.5
ESC-MON-230	-107.4	-108.4	-107.7	8.7	8.5	8.5
ESC-VDG-230	44.6	43.8	44.9	-47.1	-47.9	-47.2
VDG-ESC-230	-44.6	-45.9	-44.8	37.7	37.4	37.8
FRO-VDG-400	656.2	664.3	660.4	-111.0	-112.4	-109.0
VDG-FRO-400	-649.2	-648.7	-653.4	-42.6	-44.2	-43.7
FRO-MON-230	55.4	56.6	57.1	9.6	9.2	9.2
MON-FRO-230	-55.4	-57.4	-57.0	-14.6	-14.1	-14.1
REC 400/230	-217.2	-225.8	-225.7	39.4	38.6	39.8
REC 230/400	217.2	223.0	225.7	-26.0	-26.1	-25.3
REC 400/U34	-600.0	-611.8	-594.3	-3.0	-3.1	-3.1
REC U34/400	600.0	577.8	594.3	55.5	53.9	54.6
REC 230/U12	-600.0	-596.3	-595.8	2.0	2.0	2.0
REC U12/230	600.0	588.5	595.8	50.4	48.4	49.6
FRO 400/230	109.7	107.4	108.1	51.0	50.0	50.2
FRO 230/400	-109.7	-108.3	-108.1	-48.0	-46.6	-47.3
VDG 400/230	315.6	305.9	312.5	56.6	54.6	56.0
VDG 230/400	-315.6	-318.8	-312.5	-35.6	-35.8	-35.3
REC-U12 (+)	600.0	602.4	595.8	50.4	49.4	49.6
REC-U34 (+)	600.0	593.0	594.3	55.5	57.5	54.6
NAV-230 (+)	-3.8	-3.8	-3.8	-34.6	-34.8	-34.6
NUR-230 (+)	-47.0	-45.2	-45.6	-23.4	-23.8	-24.2

+ Valores de inyección positiva (generación)
ó negativa (carga).

TABLA III.1.2
Relación de voltajes procesados
(caso base)

Barra	Verdadero	Medido	estimado
REC-400 *	406.3	406.3	406.3
FRO-400	406.3	-	406.3
REC-230	231.5	-	231.5
NAV-230	230.2	-	230.2
NUR-230	227.3	-	227.3
MON-230	231.0	-	231.0
ESC-230	229.5	-	229.5
VDG-230 *	230.6	230.6	230.6
VDG-400	404.0	-	404.0
FRO-230	231.3	-	231.3
REC-U34	20.4	-	20.4
REC-U12	20.2	-	20.2

* Valores de voltaje en la base de datos del estimador.

TABLA III.1.3
Varianzas de mediciones vs. estimados
en flujos en líneas y voltajes nodales *
(caso base)

Flujo en línea	P		Q	
	medido	estimado	medido	estimado
REC-FRO-400	3.723 E-2	8.459 E-3	1.000 E-3	1.096 E-6
FRO-REC-400	3.617 E-2	8.459 E-3	9.863 E-7	9.760 E-7
REC-NAV-230	1.845 E-3	1.672 E-4	4.040 E-5	1.808 E-5
NAV-REC-230	1.832 E-3	1.672 E-4	5.772 E-5	1.807 E-5
NAV-NUR-230	1.752 E-3	1.667 E-4	9.863 E-7	8.157 E-7
NUR-NAV-230	1.690 E-3	1.667 E-4	7.595 E-6	8.115 E-7
NUR-MON-230	8.671 E-4	1.567 E-4	7.337 E-5	3.496 E-6
MON-NUR-230	8.295 E-4	1.567 E-4	6.078 E-5	3.505 E-6
MON-ESC-230	7.513 E-4	1.721 E-4	1.953 E-5	1.487 E-6
ESC-MON-230	7.110 E-4	1.721 E-4	4.666 E-6	1.509 E-6
ESC-VDG-230	1.226 E-4	6.127 E-5	1.367 E-4	5.003 E-5
VDG-ESC-230	1.226 E-4	6.127 E-5	8.761 E-5	5.009 E-5
FRO-VDG-400	2.654 E-2	8.185 E-3	7.595 E-4	5.097 E-5
VDG-FRO-400	2.598 E-2	8.185 E-3	1.119 E-4	4.970 E-5
FRO-MON-230	1.892 E-4	9.456 E-5	5.681 E-6	3.961 E+6
MON-FRO-230	1.892 E-4	9.456 E-5	1.314 E-5	3.960 E-6
REC 400/230	2.908 E-3	1.366 E-3	9.569 E-5	2.660 E-5
REC 230/400	2.908 E-3	1.366 E-3	4.167 E-5	2.660 E-5
REC 400/U34	2.219 E-2	7.397 E-3	5.548 E-7	5.516 E-7
REC U34/400	2.219 E-2	7.397 E-3	1.900 E-4	5.516 E-7
REC 230/U12	2.219 E-2	7.397 E-3	2.466 E-7	2.458 E-7
REC U12/230	2.219 E-2	7.397 E-3	1.566 E-4	2.458 E-7
FRO 400/230	7.418 E-4	3.641 E-4	1.603 E-4	5.344 E-5
FRO 230/400	7.418 E-4	3.641 E-4	1.420 E-4	5.344 E-5
VDG 400/230	6.140 E-3	2.813 E-3	1.975 E-4	4.173 E-5
VDG 230/400	6.140 E-3	2.813 E-3	7.812 E-5	4.173 E-5
REC-U12	2.220 E-2	7.397 E-3	1.566 E-4	2.458 E-7
REC-U34	2.220 E-2	7.397 E-3	1.899 E-4	5.516 E-7
NAV-230	8.90 E-7	8.895 E-7	7.380 E-5	1.778 E-5
NUR-230	1.36 E-4	1.176 E-4	3.375 E-5	4.680 E-6
REC-400			5.724 E-5	1.135 E-8
VDG-230			5.577 E-5	1.161 E-8

* Valores con una precisión de tres cifras significativas.

A Resultados

Se analiza a través de los resultados el impacto que conlleva la presencia de un error anormal en los datos.

El algoritmo desacoplado converge en tres iteraciones con un índice J igual a 1728.7, quedando integrado éste en un 80.5% por residuos de cantidades reactivas. Se detecta en consecuencia la anomalía en los datos, ya que el índice J presenta un valor mucho mayor al límite superior de confianza.

A.1 Flujos

La tabla III.2.1 muestra los resultados para flujos e inyecciones. Es notable el hecho de que el valor anormal introducido en los flujos no desquicie la operación del estimador. Es decir, no se presentan problemas de convergencia o valores estimados disparados.

A.2 Voltajes

El efecto de la medición anormal no impacta, en general, sobre los voltajes estimados, como se muestra por la tabla III.2.2. Esto último es consecuencia del elevado valor del peso dado a los voltajes, así como el haber tomado como valores medidos a los voltajes verdaderos.

A.3 Residuales Normalizados

El análisis de los residuales normalizados se realiza a partir de los resultados mostrados por la tabla III.2.3. El criterio de identificación parte de atribuir a la lectura de mayor residual la causa de la anomalía en datos. Bajo estas condiciones la medición identificada es el flujo reactivo FRO-REC-400.

La razón de que la identificación de la medición anormal haya sido incorrecta, es debido a que los pesos asignados dependan directamente del valor medido, implicando ello que los valores pequeños posean pesos considerablemente más grandes que los valores relativamente mayores. La tabla III.2.4 manifiesta lo anterior:

TABLA III.2.1
Flujos medidos y estimados
(caso lectura flujo REC-FRO-400 anormal)

Flujo en linea	P			Q		
	verd	med	est	verd	med	est
REC-FRO-400	777.2	1100.0	847.6	-127.4	-172.4	-100.3
FRO-REC-400	-766.0	-740.4	-834.4	-4.0	-4.1	-3.8
REC-NAV-230	173.0	176.6	180.6	25.6	25.0	26.1
NAV-REC-230	-172.4	-165.6	-180.1	-30.6	-31.4	-30.9
NAV-NUR-230	168.6	172.8	176.3	-4.0	-3.8	-3.5
NUR-NAV-230	-165.6	-170.2	-173.0	11.1	11.3	12.3
NUR-MON-230	118.6	118.1	127.8	-34.5	-33.8	-32.5
MON-NUR-230	-116.0	-118.8	-124.8	31.4	31.9	31.9
MON-ESC-230	110.4	110.2	110.8	-17.8	-17.2	-18.5
ESC-MON-230	-107.4	-108.4	-107.8	8.7	8.5	9.7
ESC-VDG-230	044.6	43.8	44.9	-47.1	-47.9	-48.7
VDG-ESC-230	-044.6	-45.9	-44.8	37.7	37.4	39.3
FRO-VDG-400	656.2	664.3	659.9	-111.0	-112.4	-117.1
VDG-FRO-400	-649.2	-648.7	-652.8	-42.6	-44.2	-33.6
FRO-MON-230	55.4	56.6	56.9	9.6	9.2	9.2
MON-FRO-230	-55.4	-57.4	-56.9	-14.6	-14.1	-14.0
REC 400/230	-217.2	-225.8	-217.2	39.4	38.6	40.2
REC 230/400	217.2	223.0	217.2	-26.0	-26.1	-26.7
REC 400/U34	-600.0	-611.8	-594.3	-3.0	-3.1	-3.1
REC U34/400	600.0	577.8	594.3	55.5	53.9	54.5
REC 230/U12	-600.0	-596.3	-595.8	2.0	2.0	2.0
REC U12/230	600.0	588.5	595.8	50.4	48.4	49.6
FRO 400/230	109.7	107.4	106.5	51.0	50.0	44.5
FRO 230/400	-109.7	-108.3	-106.5	-48.0	-46.6	-41.8
VDG 400/230	315.6	305.9	312.3	56.6	54.6	50.6
VDG 230/400	-315.6	-318.8	-312.3	-35.6	-35.8	-30.0
REC-U12 (+)	600.0	602.4	595.8	50.4	49.4	49.6
REC-U34 (+)	600.0	593.0	594.3	55.5	57.5	54.5
NAV-230 (+)	-3.8	-3.8	-3.8	-34.6	-34.8	-34.4
NUR-230 (+)	-47.0	-45.2	-45.2	-23.4	-23.8	-20.2

+ Valores de inyección positiva (generación)
ó negativa (carga).

TABLA III.2.2
 Relación de voltajes procesados
 (caso flujo REC-FRO-400 anormal)

Barra	Verdadero	Medido	estimado
REC-400 *	406.3	406.3	406.6
FRO-400	406.3	-	404.9
REC-230	231.5	-	231.6
NAV-230	230.2	-	230.4
NUR-230	227.3	-	227.3
MON-230	231.0	-	230.4
ESC-230	229.5	-	229.3
VDG-230 *	230.6	230.6	230.4
VDG-400	404.9	-	404.1
FRO-230	231.3	-	230.7
REC-U34	20.4	-	20.4
REC-U12	20.4	-	20.2

* Valores de voltaje en la base de datos del estimador.

Tabla III.2.3
Residuales Normalizados En La Desviacion Estándar
Del Residual. (caso flujo REC-FRO-400 anormal)
acne4

Medición	Residual	
	P	Q
REC-FRO-400	2.673	4.088
FRO-REC-400	1.013	4.665
REC-NAV-230	1.757 E-1	4.071 E-1
NAV-REC-230	6.36 E-1	1.658 E-1
NAV-NUR-230	1.590 E-1	1.354
NUR-NAV-230	1.296 E-1	7.335 E-1
NUR-MON-230	6.515 E-1	2.716 E-1
MON-NUR-230	4.113 E-1	1.234 E-2
MON-ESC-230	4.265 E-2	5.269 E-1
ESC-MON-230	4.119 E-2	1.234
ESC-VDG-230	2.541 E-1	1.545 E-1
VDG-ESC-230	2.593 E-1	5.666 E-1
FRO-VDG-400	5.817 E-2	3.172 E-1
VDG-FRO-400	5.513 E-2	2.404
FRO-MON-230	6.082 E-2	1.050 E-1
MON-FRO-230	9.919 E-2	5.610 E-2
REC 400/230	3.915 E-1	3.353 E-1
REC 230/400	2.667 E-1	2.811 E-1
REC 400/U34	2.591 E-1	2.531 E-1
REC U34/400	2.427 E-1	7.747 E-2
REC 230/U12	8.034 E-3	7.214 E-2
REC U12/230	1.069 E-1	1.602 E-1
FRO 400/230	8.366 E-2	9.589 E-1
FRO 230/400	1.648 E-1	9.214 E-1
VDG 400/230	1.995 E-1	5.725 E-1
VDG 230/400	1.994 E-1	1.738
REC-U12 (+)	9.814 E-2	2.991 E-2
REC-U34 (+)	1.820 E-2	3.880 E-1
NAV-230 (+)	5.628 E-1	9.758 E-2
NUR-230 (+)	2.743 E-2	1.215
REC-400 (*)		3.428
VDG-230 (*)		3.284

* Valores de inyección de potencia.

+ Valores de voltaje en la base de datos del estimador.

Tabla III.2.4 . Influencia de la medición en σ

Medición	σ		w	
	P	Q	P	Q
REC-FRO-400	16.2	2.6	38.3	1424.1
FRO-REC-400	15.9	8.3 E-4	39.4	1.4 E+6

σ - es la desviación estándar modelada en la medición.

w - es el peso dado a la medición en base al inverso de la varianza modelada .

P,Q - son mediciones activas y reactivas respectivamente.

III.3 Desviación Estándar de Mediciones en Función del Factor de Escala.

Con referencia al caso base se modifican las desviaciones estándar de los flujos e inyecciones, calculandose con la siguiente expresión:

$$\sigma = 0.0151 * FS \quad (III.3)$$

en donde:

σ - es la desviación estándar de la medición.

FS - es el factor de escala de la medición.

La asignación del factor de escala se da en función del valor nominal de la potencia del circuito medido. Por ejemplo, en el caso de un circuito de 400 kv se toma un factor de escala correspondiente a un flujo de 1000 mva, que se convierte en FS igual a 10 para una base en 100 mva.

La modificación anterior del cálculo de σ pretende mejorar la operación de las etapas de detección e identificación en el estimador.

A Resultados

Se prepara este caso con referencia al caso base, sin afectar medición alguna por error anormal. El resultado de la prueba con los nuevos σ 's es un índice J ligeramente menor al límite inferior de confianza, indicando una exactitud "sospechosa" entre datos y resultados . Con objeto de modelar correctamente el error máximo

de la medición, se incrementa éste de 4% a 6%, forzando así a que el índice J tome un valor mayor al límite inferior de confianza.

A.1 Flujos

La tabla III.3.1 muestra los resultados para flujos e inyecciones (verdaderos, medidos y estimados). Se puede observar que para el caso del flujo REC-FRO-400 y FRO-REC-400 existe una diferencia sensible entre el valor verdadero y medido. Sin embargo, el estimador no detecta como un error esta situación, ya que la diferencia entre medidos y estimados es estadísticamente congruente.

Lo anterior pone de manifiesto claramente que el estimador procesará información independientemente de su exactitud. Es decir, si el esquema de medición no tiene exactitud, el estimador entregará resultados poco precisos, sin detectar este problema.

A.2 Voltajes

Como se puede observar, los voltajes no sufren un cambio relevante entre el caso base y el presente. Lo anterior es consecuencia de que el peso y el error máximo de voltajes es el mismo en ambos casos.

A.3 Varianzas de Flujos y Voltajes

Estas varianzas se encuentran indicadas en la tabla III.3.3. De la observación de esta última, se confirma nuevamente la característica del estimador de obtener estimados con menores varianzas que las mediciones.

Es interesante notar que la diferencia entre las varianzas de medidos y estimados es menor a medida que se tiene una mayor redundancia. Esto se puede concluir al observar que el cambio-porcentaje del valor medido - de las varianzas medidas y estimadas es de 81.2% para el flujo reactivo FRO-REC-400 y de 56.9% para la carga reactiva NUR-230. Lo anterior se debe a la presencia de una medición de voltaje en el nodo REC-400.

III.4 Medición de Flujo Anormal REC-FRO-400. (2)

El presente caso tiene por objeto el observar el impacto que tiene, en la identificación de datos anormales, la desviación

TABLA III.3.1

Flujos medidos y Estimados

(caso base con las desviaciones estándar modificadas)

Flujo en línea	P*			Q*		
	verd	med	est.	verd	med	est.
REC-FRO-400	777.2	750.3	756.4	-127.4	-123.2	-129.3
FRO-REC-400	-766.0	-727.6	-745.9	-4.0	-4.1	-9.4
REC-NAV-230	173.0	178.4	171.4	25.6	24.8	25.8
NAV-REC-230	-172.4	-162.2	-171.0	-36.6	-31.9	-30.9
NAV-NUR-230	168.6	174.9	167.3	-4.0	-3.8	-4.1
NUR-NAV-230	-165.6	-172.5	-164.3	11.1	11.4	10.9
NUR-MON-230	118.6	117.9	119.0	-34.5	-33.4	-34.6
MON-NUR-230	-116.0	-120.3	-116.4	31.4	32.1	31.6
MON-ESC-230	110.4	110.2	110.6	-17.8	-16.9	-17.6
ESC-MON-230	-107.4	-108.9	-107.6	8.7	8.4	8.6
ESC-VDG-230	44.6	43.4	44.9	-47.1	-48.2	-47.5
VDG-ESC-230	-44.6	-46.6	-44.8	37.7	37.2	38.1
FRO-VDG-400	656.2	668.3	662.5	-111.0	-113.1	-110.1
VDG-FRO-400	-649.2	-648.4	-655.4	-42.6	-45.0	-41.8
FRO-MON-230	55.4	57.2	58.2	9.6	9.1	9.0
MON-FRO-230	-55.4	-58.5	-58.1	-14.6	-13.9	-13.9
REC 400/230	-217.2	-230.1	-231.6	39.4	38.2	39.7
REC 230/400	217.2	226.0	231.6	-26.0	-26.2	-24.5
REC 400/U34	-600.0	-618.8	-590.6	-3.0	-3.1	-4.3
REC U34/400	600.0	566.7	590.6	55.5	53.1	55.2
REC 230/U12	-600.0	-594.5	-596.3	2.0	2.0	3.1
REC U12/230	600.0	582.8	596.3	50.4	47.5	48.7
FRO 400/230	109.7	106.3	109.4	51.0	49.5	49.1
FRO 230/400	-109.7	-107.6	-109.4	-48.0	-45.9	-46.2
VDG 400/230	315.6	301.1	310.9	56.6	53.5	54.9
VDG 230/400	-315.6	-320.3	-310.9	-35.6	-35.9	-34.5
REC-U12 (+)	600.0	603.7	596.3	50.4	48.8	48.7
REC-U34 (+)	600.0	589.6	590.6	55.5	58.5	55.2
NAV-230 (+)	-3.8	-3.8	-3.6	-34.6	-35.0	-35.0
NUR-230 (+)	-47.0	-44.4	-45.3	-23.4	-24.0	-23.7

+ Valores de inyección positiva (generación)
ó negativa (carga).

TABLA III.3.2
Relación de voltajes procesados
(caso base con las desviaciones estándar modificadas)

Barra	Verdadero	Medido	estimado
REC-400 *	406.3	406.3	406.2
FRO-400	406.3	-	406.3
REC-230	231.5	-	231.5
NAV-230	230.2	-	230.2
NUR-230	227.3	-	227.3
MON-230	231.0	-	231.0
ESC-230	229.5	-	229.5
VDG-230 *	230.6	230.6	230.6
VDG-400	404.0	-	404.8
FRO-230	231.3	-	231.3
REC-U34	20.4	-	20.4
REC-U12	20.2	-	20.2

* Valores de voltaje en la base de datos del estimador.

TABLA III.3.3

Varianzas de mediciones vs. estimados
en flujos en líneas y voltajes nodales *

(caso base con las desviaciones estándar modificadas)

Flujo en línea	P		Q	
	medido	estimado	medido	estimado
REC-FRO-400	1.621 E-2	5.806 E-3	1.621 E-2	3.243 E-3
FRO-REC-400	1.621 E-2	5.806 E-3	1.621 E-2	3.043 E-3
REC-NAV-230	1.458 E-3	2.259 E-4	1.458 E-3	5.141 E-4
NAV-REC-230	1.458 E-3	2.259 E-4	1.458 E-3	5.140 E-4
NAV-NUR-230	1.458 E-3	1.487 E-4	1.458 E-3	3.032 E-4
NUR-NAV-230	1.458 E-3	1.487 E-4	1.458 E-3	3.018 E-4
NUR-MON-230	1.458 E-3	1.520 E-4	1.458 E-3	2.251 E-4
MON-NUR-230	1.458 E-3	1.520 E-4	1.458 E-3	2.251 E-4
MON-ESC-230	1.458 E-3	1.813 E-4	1.458 E-3	9.759 E-5
ESC-MON-230	1.458 E-3	1.813 E-4	1.458 E-3	1.014 E-4
ESC-VDG-230	1.458 E-3	7.251 E-4	1.458 E-3	7.241 E-4
VDG-ESC-230	1.458 E-3	7.251 E-4	1.458 E-3	7.251 E-4
FRO-VDG-400	1.621 E-2	6.763 E-3	1.621 E-2	4.035 E-3
VDG-FRO-400	1.621 E-2	6.763 E-3	1.621 E-2	4.150 E-3
FRO-MON-230	1.458 E-3	7.271 E-4	1.458 E-3	7.273 E-4
MON-FRO-230	1.458 E-3	7.271 E-4	1.458 E-3	7.272 E-4
REC 400/230	4.051 E-3	1.822 E-3	4.051 E-3	1.813 E-3
REC 230/400	4.051 E-3	1.822 E-3	4.051 E-3	1.813 E-3
REC 400/U34	1.621 E-2	4.010 E-3	1.621 E-2	5.402 E-3
REC U34/400	1.621 E-2	4.010 E-3	1.621 E-2	5.402 E-3
REC 230/U12	1.621 E-2	4.010 E-3	1.621 E-2	5.402 E-3
REC U12/230	1.621 E-2	4.010 E-3	1.621 E-2	5.402 E-3
FRO 400/230	4.051 E-3	1.845 E-3	4.051 E-3	1.856 E-3
FRO 230/400	4.051 E-3	1.845 E-3	4.051 E-3	1.856 E-3
VDG 400/230	4.051 E-3	1.946 E-3	4.051 E-3	1.794 E-3
VDG 230/400	4.051 E-3	1.946 E-3	4.051 E-3	1.794 E-3
REC-U12	7.941 E-3	4.010 E-3	1.621 E-2	5.402 E-3
REC-U34	7.941 E-3	4.010 E-3	1.621 E-2	5.402 E-3
NAV-230	1.621 E-4	1.388 E-4	1.458 E-3	6.206 E-4
NUR-230	1.621 E-4	1.393 E-4	1.458 E-3	6.285 E-4
REC-400			7.107 E-9	7.100 E-9
VDG-230			7.107 E-9	7.100 E-9

* Valores con una precisión de tres cifras significativas.

estándar no dependiente del valor medido. La red y datos empleados son los contenidos en el caso III.3.

En este caso son simulados errores anormales de 20 y 17 desviaciones estándar respectivamente en la parte activa y reactiva de la medición REC-FRO-400.

A Resultados

La convergencia de este caso se logra en tres iteraciones. El índice J resultante es igual a 1149.8, siendo la aportación de los residuos de mediciones reactivas de un 73.2%. La base de datos se rechaza por la detección de errores anormales, ya que el índice J resulta mucho mayor al límite superior de confianza.

A.1 Flujos

La tabla III.4.1 muestra el resultado en flujos verdaderos, medidos y estimados. Es de interés observar que solamente determinadas cantidades se ven fuertemente alteradas con respecto a su valor medido. En este caso se tiene que las cantidades reactivas presentan mayor sensibilidad al error introducido.

A.2 Voltajes

La tabla III.4.2 muestra los voltajes resultantes. Como en casos anteriores, los voltajes permanecen con valores prácticamente iguales a los valores medidos, debiéndose al valor del peso asignado.

A.3 Residuales Normalizados

El cociente del valor absoluto del residuo a su desviación estándar se muestran en la tabla III.4.3. La comparación de esta tabla con la III.2.3 permite constatar la ventaja de calcular la desviación estándar de las mediciones en función de un factor de escala, ya que en este caso el error fue identificado correctamente. Sin embargo, como se puede observar de la tabla III.4.3, la medición con el mayor residuo normalizado corresponde al flujo reactivo REC-FRO-400 y no a la parte activa del mismo que posee un error mayor.

El problema de identificación indicado en el párrafo anterior obedece en gran parte a la mayor sensibilidad de la parte reactiva a la perturbación generada, como se puede ver de la tabla III.4.1. Esto se hace patente al verificar que el porcentaje de cambio - de medido a estimado -, con respecto al primero - es mayor en la parte

TABLA III.4.1

Flujos medidos y Estimados

(caso en donde se modifican las σ del esquema de medición y se tiene error grande en REC-FRO-400 de 20 y 17 σ en activo y reactivo respectivamente)

Flujo en línea	P*			Q*		
	verd	med	est	verd	med	est
REC-FRO-400	777.2	1078.7	873.7	-127.4	-383.7	-8.4
FRO-REC-400	-766.0	-727.6	-859.4	-4.0	-4.1	-75.5
REC-NAV-230	173.0	178.4	180.8	25.6	24.8	29.9
NAV-REC-230	-172.4	-162.2	-180.3	-36.6	-31.9	-34.5
NAV-NUR-230	168.6	174.9	178.4	-4.0	-3.8	5.1
NUR-NAV-230	-165.6	-172.5	-175.0	11.1	11.4	4.6
NUR-MON-230	118.6	117.9	131.4	-34.5	-33.4	-22.7
MON-NUR-230	-116.0	-120.3	-128.2	31.4	32.1	23.7
MON-ESC-230	110.4	110.2	110.4	-17.8	-16.9	-31.0
ESC-MON-230	-107.4	-108.9	-107.2	8.7	8.4	23.8
ESC-VDG-230	44.6	43.4	45.0	-47.1	-48.2	-48.7
VDG-ESC-230	-44.6	-46.6	-44.9	37.7	37.2	39.4
FRO-VDG-400	656.2	668.3	663.3	-111.0	-113.1	-196.3
VDG-FRO-400	-649.2	-648.4	-655.7	-42.6	-45.0	-57.8
FRO-MON-230	55.4	57.2	57.0	9.6	9.1	7.8
MON-FRO-230	-55.4	-58.5	-57.0	-14.6	-13.9	-12.5
REC 400/230	-217.2	-230.1	-217.7	39.4	38.2	48.2
REC 230/400	217.2	226.0	217.7	-26.0	-26.2	-34.5
REC 400/U34	-600.0	-617.8	-590.9	-3.0	-3.1	-4.3
REC U34/400	600.0	566.7	590.9	55.5	53.1	55.2
REC 230/U12	-600.0	-594.5	-596.2	2.0	2.0	3.2
REC U12/230	600.0	582.8	596.2	50.4	47.5	48.8
FRO 400/230	109.7	106.3	99.2	51.0	49.5	36.8
FRO 230/400	-109.7	-107.6	-99.2	-48.0	-45.9	-34.4
VDG 400/230	315.6	301.1	311.0	56.6	53.5	32.4
VDG 230/400	-315.6	-320.3	-311.0	-35.6	-35.9	-12.2
REC-U12 (+)	600.0	603.7	596.2	50.4	48.8	48.8
REC-U34 (+)	600.0	589.6	590.9	55.5	58.5	55.2
NAV-230 (+)	-3.8	-3.8	-1.8	-34.6	-35.0	-29.4
NUR-230 (+)	-47.0	-44.4	-43.6	-23.4	-24.0	-18.1

+ Valores de inyección positiva (generación)
ó negativa (carga).

TABLA III.4.2

Relación de voltajes procesados

(caso en donde se modifican las σ del esquema de medición y se tiene error grande en REC-FRO-400 de 20 y 17 σ en activo y reactivo respectivamente)

REC-400 *	406.3	406.3	406.3
FRO-400	406.3	-	396.2
REC-230	231.5	-	230.9
NAV-230	230.2	-	229.5
NUR-230	227.3	-	225.1
MON-230	231.0	-	225.8
ESC-230	229.5	-	229.5
VDG-230 *	230.6	230.6	230.6
VDG-400	404.0	-	402.9
FRO-230	231.3	-	226.1
REC-U34	20.4	-	20.4
REC-U12	20.2	-	20.1

* Valores de voltaje en la base de datos del estimador.

TABLA III.4.3

Residuales normalizados en la desviación estándar del residual.

(caso en donde se modifican las σ del esquema de medición y se tiene error grande en REC-FRO-400 de 20 y 17 σ en activo y reactivo respectivamente)

Medición	Residual	
	P	Q
REC-FRO-400	3.121	5.347
FRO-REC-400	2.006	9.658 E-1
REC-NAV-230	1.059 E-1	2.578 E-1
NAV-REC-230	7.974 E-1	1.327 E-1
NAV-NUR-230	1.536 E-1	4.055 E-1
NUR-NAV-230	1.091 E-1	3.090 E-1
NUR-MON-230	5.784 E-1	4.751 E-1
MON-NUR-230	3.399 E-1	3.717 E-1
MON-ESC-230	8.198 E-3	5.896 E-1
ESC-MON-230	7.173 E-2	6.488 E-1
ESC-VDG-230	9.143 E-2	2.627 E-2
VDG-ESC-230	9.913 E-2	1.207 E-1
FRO-VDG-400	7.933 E-2	1.171
VDG-FRO-400	1.171 E-1	1.454
FRO-MON-230	1.097 E-2	7.069 E-2
MON-FRO-230	8.487 E-2	8.054 E-2
REC 400/230	4.078 E-1	3.263 E-1
REC 230/400	2.730 E-1	2.715 E-1
REC 400/U34	3.776 E-1	1.710 E-2
REC U34/400	3.403 E-1	3.143 E-2
REC 230/U12	2.441 E-2	1.797 E-2
REC U12/230	1.888 E-1	1.920 E-2
FRO 400/230	2.333 E-1	4.227 E-1
FRO 230/400	2.769 E-1	3.817 E-1
VDG 400/230	3.359 E-1	6.907 E-1
VDG 230/400	3.155 E-1	7.765 E-1
REC-U12 (+)	1.841 E-1	1.167 E-3
REC-U34 (+)	3.372 E-2	4.861 E-2
NAV-230 (+)	6.358 E-1	2.961 E-1
NUR-230 (+)	2.366 E-1	3.212 E-1
REC-400 (*)	-	2.602
VDG-230 (*)	-	2.743

* Valores de inyección de potencia.

+ Valores de voltaje en la base de datos del estimador.

reactiva (97.8%) que en la parte activa (19.0%).

III.5. Desviación Estándar en Mediciones de Voltaje

Con referencia al caso III.3 , donde la modelación de la desviación estándar de flujos e inyecciones fue modificada en base al FS , se probó la respuesta del estimador ante un error de 40σ en la lectura de voltaje del nodo REC-400. El resultado es un índice J de 28, no detectando en consecuencia la anomalía en la base de datos. El error fue detectado solamente cuando se modeló un error de 200σ en el voltaje en cuestión.

Para corregir el resultado anterior se modela la desviación estándar de los voltajes en la siguiente forma:

$$\sigma = (\alpha * BRDN + \beta * FS) / 3 \quad (III.4)$$

en donde:

- σ - es la desviación estándar de la medición de voltaje.
- α - es el porcentaje de error máximo del medidor. Igual a 0.005.
- BRDN - cantidad representativa de la medición. Igual a la unidad.
- β - es el porcentaje de error máximo del transductor y convertidor analógico digital. Igual a 0.0026.
- FS - cantidad representativa de la escala completa del instrumento. Igual a 1.5 p.u.

Lo anterior proporciona una desviación estándar de 0.003 p.u., y un peso para los voltajes de $1.1 E+5$.

El siguiente caso prueba la aplicación de las desviaciones estándar de acuerdo a la ecuación III.4, y partiendo de la red y mediciones del caso III.3.

A Resultados

El estimador converge en dos iteraciones, siendo su índice J igual a 27.7. La contribución de los residuos de medición reactiva es en este caso de 3.2%.

A.1 Flujos

La tabla III.5.1 muestra los flujos e inyecciones verdaderos, medidos y estimados para el presente caso. Puede observarse que la diferencia entre los estimados de este caso y sus homólogos en el caso III.3 es prácticamente nula.

A.2 Voltajes

Se observa en la tabla III.5.2 que el estimador genera aún estimados de voltajes muy similares a los medidos. Lo anterior es producto del relativamente elevado valor del peso de voltajes.

A.3 Varianzas de flujos y voltajes

Estos resultados se muestran en la tabla III.5.3. Al comparar esta tabla con su correspondiente del caso III.3 se encuentra que la diferencia entre ellas es prácticamente nula en la gran mayoría de las cantidades, a excepción de los voltajes. Estos últimos presentan el siguiente comportamiento:

Caso	Medición	σ -medida *	σ -estimada *
III.3	REC-400	7.107 E-9	7.100 E-9
III.5	REC-400	6.255 E-6	4.271 E-6

* valores en p.u.

III.6 Medición de Voltaje Anormal en REC-400

Este caso tiene por objeto observar la forma en que se ven afectados los resultados del estimador, debido a un error grueso en una medición de voltaje. La siguiente tabulación muestra la forma en que la magnitud de dicho error impacta en los índices básicos del estimador.

Error	J	Iteración de Convergencia
6 σ	31.0	3
8 σ	49.5	3
10 σ	61.7	3
12 σ	74.0	3

De esta tabulación se puede observar que el estimador detectará el error anormal de voltaje para errores de 12 desviaciones estándar ó más. Se analizan a continuación los

TABLA III.5.1
Flujos medidos y Estimados

(caso base con las σ modificadas para flujos y voltajes)

Flujo en línea	P*			Q*		
	verd	med	est	verd	med	est
REC-FRO-400	777.2	750.3	756.5	-127.4	-123.2	-128.9
FRO-REC-400	-766.0	-727.6	-746.0	-4.0	-4.1	-9.8
REC-NAV-230	173.0	178.4	171.5	25.6	24.8	25.8
NAV-REC-230	-172.4	-162.2	-171.0	-36.6	-31.9	-30.9
NAV-NUR-230	168.6	174.9	167.3	-4.0	-3.8	-4.1
NUR-NAV-230	-165.6	-172.5	-164.4	11.1	11.4	10.8
NUR-MON-230	118.6	117.9	119.1	-34.5	-33.4	-34.5
MON-NUR-230	-116.0	-120.3	-116.4	31.4	32.1	31.6
MON-ESC-230	110.4	110.2	110.6	-17.8	-16.9	-17.5
ESC-MON-230	-107.4	-108.9	-107.6	8.7	8.4	8.5
ESC-VDG-230	44.6	43.4	44.9	-47.1	-48.2	-47.5
VDG-ESC-230	-44.6	-46.6	-44.8	37.7	37.2	38.1
FRO-VDG-400	656.2	668.3	662.5	-111.0	-113.1	-109.8
VDG-FRO-400	-649.2	-648.4	-655.4	-42.6	-45.0	-42.1
FRO-MON-230	55.4	57.2	58.2	9.6	9.1	9.0
MON-FRO-230	-55.4	-58.5	-58.1	-14.6	-13.9	-13.9
REC 400/230	-217.2	-230.1	-231.7	39.4	38.2	39.8
REC 230/400	217.2	226.0	231.7	-26.0	-26.2	-24.5
REC 400/U34	-600.0	-618.8	-590.8	-3.0	-3.1	-4.3
REC U34/400	600.0	566.7	590.8	55.5	53.1	55.2
REC 230/U12	-600.0	-594.5	-596.4	2.0	2.0	3.1
REC U12/230	600.0	582.8	596.4	50.4	47.5	48.7
FRO 400/230	109.7	106.3	109.4	51.0	49.5	49.1
FRO 230/400	-109.7	-107.6	-109.4	-48.0	-45.9	-46.2
VDG 400/230	315.6	301.1	310.8	56.6	53.5	55.0
VDG 230/400	-315.6	-320.3	-310.8	-35.6	-35.9	-34.6
REC-U12 (+)	600.0	603.7	596.4	50.4	48.8	48.7
REC-U34 (+)	600.0	589.6	590.8	55.5	58.5	55.2
NAV-230 (+)	-3.8	-3.8	-3.6	-34.6	-35.0	-35.0
NUR-230 (+)	-47.0	-44.4	-45.3	-23.4	-24.0	-23.7

+ Valores de inyección positiva (generación)
ó negativa (carga).

TABLA III.5.2
Relación de voltajes procesados
(caso base con las σ modificadas para flujos y voltajes)

Barra	Verdadero	Medido	estimado
REC-400 *	406.3	406.3	406.3
FRO-400	406.3	-	406.3
REC-230	231.5	-	231.5
NAV-230	230.2	-	230.2
NUR-230	227.3	-	227.3
MON-230	231.0	-	231.0
ESC-230	229.5	-	229.5
VDG-230 *	230.6	230.6	230.6
VDG-400	404.0	-	404.8
FRO-230	231.3	-	231.3
REC-U34	20.4	-	20.4
REC-U12	20.2	-	20.2

* Valores de voltaje en la base de datos del estimador.

TABLA III.5.3
Varianzas de mediciones vs. estimados
en flujos en líneas y voltajes nodales *
(caso base con las σ modificadas para flujos y voltajes)

Flujo en línea	P		Q	
	medido	estimado	medido	estimado
REC-FRO-400	1.621 E-2	5.806 E-3	1.620 E-2	4.995 E-3
FRO-REC-400	1.621 E-2	5.806 E-3	1.620 E-2	4.919 E-3
REC-NAV-230	1.458 E-3	2.259 E-4	1.458 E-3	5.165 E-4
NAV-REC-230	1.458 E-3	2.259 E-4	1.458 E-3	5.166 E-4
NAV-NUR-230	1.458 E-3	1.487 E-4	1.458 E-3	3.168 E-4
NUR-NAV-230	1.458 E-3	1.487 E-4	1.458 E-3	3.161 E-4
NUR-MON-230	1.458 E-3	1.520 E-4	1.458 E-3	2.562 E-4
MON-NUR-230	1.458 E-3	1.520 E-4	1.458 E-3	2.570 E-4
MON-ESC-230	1.458 E-3	1.813 E-4	1.458 E-3	1.501 E-4
ESC-MON-230	1.458 E-3	1.813 E-4	1.458 E-3	1.519 E-4
ESC-VDG-230	1.458 E-3	7.251 E-4	1.458 E-3	7.245 E-4
VDG-ESC-230	1.458 E-3	7.251 E-4	1.458 E-3	7.253 E-4
FRO-VDG-400	1.621 E-2	6.762 E-3	1.620 E-2	5.765 E-3
VDG-FRO-400	1.621 E-2	6.762 E-3	1.620 E-2	5.799 E-3
FRO-MON-230	1.458 E-3	7.271 E-4	1.458 E-3	7.273 E-4
MON-FRO-230	1.458 E-3	7.271 E-4	1.458 E-3	7.271 E-4
REC 400/230	4.051 E-3	1.822 E-3	4.051 E-3	1.834 E-3
REC 230/400	4.051 E-3	1.822 E-3	4.051 E-3	1.834 E-3
REC 400/U34	1.621 E-2	4.010 E-3	1.620 E-2	5.402 E-3
REC U34/400	1.621 E-2	4.010 E-3	1.620 E-2	5.402 E-3
REC 230/U12	1.621 E-2	4.010 E-3	1.620 E-2	5.402 E-3
REC U12/230	1.621 E-2	4.010 E-3	1.620 E-2	5.402 E-3
FRO 400/230	4.051 E-3	1.845 E-3	4.051 E-3	1.857 E-3
FRO 230/400	4.051 E-3	1.845 E-3	4.051 E-3	1.857 E-3
VDG 400/230	4.051 E-3	1.946 E-3	4.051 E-3	1.891 E-3
VDG 230/400	4.051 E-3	1.946 E-3	4.051 E-3	1.891 E-3
REC-U12	7.941 E-3	4.010 E-3	1.620 E-2	5.402 E-3
REC-U34	7.941 E-3	4.010 E-3	1.620 E-2	5.402 E-3
NAV-230	1.621 E-4	1.388 E-4	1.458 E-3	6.247 E-4
NUR-230	1.621 E-4	1.393 E-4	1.458 E-3	6.316 E-4
REC-400			6.255 E-6	4.271 E-6
VDG-230			6.255 E-6	4.267 E-6

* Valores con una precisión de tres cifras significativas.

resultados del estimador para un caso en el que el error de voltaje sea elevado.

A Resultados

Se simula para este caso un error de 20σ en la lectura de voltaje REC-400. El estimador converge en tres iteraciones con un índice J igual a 160.1, en el cual participan los residuos reactivos con un 83.8%.

A.1 Flujos

La tabla III.6.1 muestra los flujos e inyecciones verdaderos, medidos y estimados para este caso. Se puede observar que la perturbación provocada por el voltaje anormal se propaga con mayor fuerza hacia los flujos de potencia reactiva.

A.2 Voltajes

La tabla III.6.2 muestra el severo impacto que este error tiene sobre los voltajes estimados. La perturbación se propaga a todos los voltajes. Sin embargo, a medida que el número de mediciones de voltajes correctos sea mayor en la base de datos (mayor redundancia), la influencia del voltaje erróneo se verá atenuada.

A.3 Residuales Normalizados

El proceso de identificación se realiza mediante la inspección de los residuos de la tabla III.6.3. Se puede ver que el estimador identificará correctamente a la medición de voltaje REC-400, ya que ésta posee el residuo de mayor valor.

III.7 Asignación de Peso Reducido a Medición Anormal

Este caso prueba la alternativa de cancelación de una medición errónea, empleando una ponderación de valor reducido. Con referencia al caso III.6 se asigna a la medición REC-400 un peso igual a 0.1. La medición anormal de REC-400 es conservada dentro de la base de datos.

Dentro del proceso de identificación y eliminación de errores se tiene también la alternativa de retirar de la base de datos la medición anormal.

TABLA III.6.1
Flujos medidos y Estimados
 (referido al caso 5 se tiene error en REC-400 de 20σ)

Flujo en línea	P*			Q*		
	verd	med	est	verd	med	est
REC-FRO-400	777.2	750.3	754.6	-127.4	-123.2	-97.5
FRO-REC-400	-766.0	-727.6	-744.9	-4.0	-4.1	-70.3
REC-NAV-230	173.0	178.4	171.4	25.6	24.8	26.4
NAV-REC-230	-172.4	-162.2	-171.0	-36.6	-31.9	-32.4
NAV-NUR-230	168.6	174.9	167.5	-4.0	-3.8	-1.6
NUR-NAV-230	-165.6	-172.5	-164.7	11.1	11.4	6.1
NUR-MON-230	118.6	117.9	119.5	-34.5	-33.4	-29.5
MON-NUR-230	-116.0	-120.3	-117.1	31.4	32.1	23.8
MON-ESC-230	110.4	110.2	111.5	-17.8	-16.9	-11.3
ESC-MON-230	-107.4	-108.9	-108.6	8.7	8.4	0.1
ESC-VDG-230	44.6	43.4	45.1	-47.1	-48.2	-47.0
VDG-ESC-230	-44.6	-46.6	-45.0	37.7	37.2	37.3
FRO-VDG-400	656.2	668.3	660.9	-111.0	-113.1	-75.1
VDG-FRO-400	-649.2	-648.4	-654.1	-42.6	-45.0	-94.0
FRO-MON-230	55.4	57.2	58.1	9.6	9.1	8.8
MON-FRO-230	-55.4	-58.5	-58.1	-14.6	-13.9	-14.0
REC 400/230	-217.2	-230.1	-231.3	39.4	38.2	44.0
REC 230/400	217.2	226.0	231.3	-26.0	-26.2	-29.8
REC 400/U34	-600.0	-618.8	-591.1	-3.0	-3.1	-6.8
REC U34/400	600.0	566.7	591.1	55.5	53.1	53.9
REC 230/U12	-600.0	-594.5	-596.3	2.0	2.0	0.5
REC U12/230	600.0	582.8	596.3	50.4	47.5	47.4
FRO 400/230	109.7	106.3	109.5	51.0	49.5	48.4
FRO 230/400	-109.7	-107.6	-109.5	-48.0	-45.9	-45.6
VDG 400/230	315.6	301.1	310.6	56.6	53.5	65.0
VDG 230/400	-315.6	-320.3	-310.6	-35.6	-35.9	-45.1
REC-U12 (+)	600.0	603.7	596.3	50.4	48.8	47.4
REC-U34 (+)	600.0	589.6	591.1	55.5	58.5	53.9
NAV-230 (+)	-3.8	-3.8	-3.5	-34.6	-35.0	-34.0
NUR-230 (+)	-47.0	-44.4	-45.2	-23.4	-24.0	-23.4

+ Valores de inyección positiva (generación)
 ó negativa (carga).

TABLA III.6.2
 Relación de voltajes procesados
 (referido al caso 5 se tiene error en REC-400 de 20σ)

Barra	Verdadero	Medido	estimado
REC-400 *	406.3	430.0	422.5
FRO-400	406.3	-	418.2
REC-230	231.5	-	240.6
NAV-230	230.2	-	239.4
NUR-230	227.3	-	236.0
MON-230	231.0	-	238.0
ESC-230	229.5	-	233.8
VDG-230 *	230.6	230.6	234.9
VDG-400	404.0	-	413.0
FRO-230	231.3	-	238.2
REC-U34	20.4	-	21.2
REC-U12	20.2	-	21.0

* Valores de voltaje en la base de datos del estimador.

TABLA III.6.3

Residuales normalizados en la desviación estándar del residual.

(referido al caso 5 se tiene error en REC-400 de 20σ)

Medición	Residual	
	P	Q
REC-FRO-400	1.785 E-1	1.009
FRO-REC-400	7.067 E-1	2.592
REC-NAV-230	8.258 E-1	2.257 E-1
NAV-REC-230	1.038	6.528 E-2
NAV-NUR-230	8.508 E-1	2.674 E-1
NUR-NAV-230	8.950 E-1	6.502 E-1
NUR-MON-230	1.854 E-1	4.721 E-1
MON-NUR-230	3.669 E-1	1.001
MON-ESC-230	1.492 E-1	6.535 E-1
ESC-MON-230	2.676 E-2	9.622 E-1
ESC-VDG-230	2.610 E-1	1.869 E-1
VDG-ESC-230	2.487 E-1	2.522 E-3
FRO-VDG-400	3.184 E-1	1.544
VDG-FRO-400	2.456 E-1	1.998
FRO-MON-230	1.419 E-1	4.129 E-2
MON-FRO-230	5.580 E-2	1.742 E-2
REC 400/230	1.062 E-1	5.073 E-1
REC 230/400	4.674 E-1	3.222 E-1
REC 400/U34	1.004	1.476 E-1
REC U34/400	9.200 E-1	3.280 E-2
REC 230/U12	6.973 E-2	6.130 E-2
REC U12/230	5.102 E-1	3.600 E-3
FRO 400/230	2.858 E-1	1.028 E-1
FRO 230/400	1.690 E-1	2.452 E-2
VDG 400/230	8.596 E-1	1.023
VDG 230/400	8.857 E-1	8.246 E-1
REC-U12 (+)	4.857 E-1	5.817 E-2
REC-U34 (+)	1.046 E-1	1.817 E-1
NAV-230 (+)	2.290 E-1	1.383 E-1
NUR-230 (+)	6.965 E-1	9.196 E-2
REC-400 (*)	-	5.566
VDG-230 (*)	-	5.478

* Valores de inyección de potencia.

+ Valores de voltaje en la base de datos del estimador.

A Resultados

El estimador converge en tres iteraciones, resultando un índice J de 27.695. La participación de residuos reactivos dentro de J es de 3.3%.

A.1 Flujos

Se puede observar de la tabla III.7.1 que en relación a los resultados del caso III.6, los flujos reactivos corrigen notablemente su valor. Es decir, estos últimos toman valores más cercanos a los medidos. Los flujos activos se ven también influidos positivamente por la modificación del peso, pero no en la misma proporción que los reactivos.

A.2 Voltajes

La tabla III.7.2 muestra el impacto sobre los voltajes estimados. Es notable el efecto correctivo de esta alternativa, ya que aún el voltaje con error anormal arroja un estimado aceptable. El peso elevado dado a la medición correcta colabora también en la excelencia de los resultados.

A.3 Varianzas de Flujos y Voltajes

Estos resultados son mostrados por la tabla III.7.3. Las varianzas de cantidades estimadas es menor a la de cantidades medidas. En la inspección de esta tabla se puede ver el elevado valor tomado por la varianza medida del voltaje REC-400.

III.8 Error en parámetro de línea REC-FRO en 400 Kv.

En este caso se modifica el valor de la reactancia serie en la línea que conecta las barras REC-400 y FRO-400. El parámetro modificado fue la reactancia de la línea, de un valor de $j 0.02393$ p.u. a $j 0.2393$.

A Resultados

El estimador converge en 3 iteraciones. El índice J al cual se llega es de $3.81 E+3$, quedando integrado en un 1.8% por los residuos reactivos.

A.1 Flujos

De la tabla III.8.1 se puede observar que el estimado que se ve sometido a una mayor influencia del error es el flujo de la línea correspondiente al parámetro erróneo. Se debe notar, sin

TABLA III.7.1

Flujos medidos y Estimados

(referido al caso ó se tiene peso en REC-400 igual a 0.1)

Flujo en línea	P*			Q*		
	verd	med	est	verd	med	est
REC-FRO-400	777.2	750.3	756.5	-127.4	-123.2	-128.8
FRO-REC-400	-766.0	-727.6	-746.9	-4.0	-4.1	-10.0
REC-NAV-230	173.0	178.4	171.3	25.6	24.8	25.8
NAV-REC-230	-172.4	-162.2	-170.8	-36.6	-31.9	-30.9
NAV-NUR-230	168.6	174.9	167.3	-4.0	-3.8	-4.1
NUR-NAV-230	-165.6	-172.5	-164.3	11.1	11.4	10.8
NUR-MON-230	118.6	117.9	119.1	-34.5	-33.4	-34.5
MON-NUR-230	-116.0	-120.3	-116.4	31.4	32.1	31.5
MON-ESC-230	110.4	110.2	110.6	-17.8	-16.9	-17.5
ESC-MON-230	-107.4	-108.9	-107.6	8.7	8.4	8.5
ESC-VDG-230	44.6	43.4	45.0	-47.1	-48.2	-47.5
VDG-ESC-230	-44.6	-46.6	-44.9	37.7	37.2	38.1
FRO-VDG-400	656.2	668.3	662.6	-111.0	-113.1	-109.6
VDG-FRO-400	-649.2	-648.4	-655.5	-42.6	-45.0	-42.3
FRO-MON-230	55.4	57.2	58.1	9.6	9.1	9.0
MON-FRO-230	-55.4	-58.5	-58.1	-14.6	-13.9	-13.9
REC 400/230	-217.2	-230.1	-231.6	39.4	38.2	39.8
REC 230/400	217.2	226.0	231.6	-26.0	-26.2	-24.5
REC 400/U34	-600.0	-618.8	-590.9	-3.0	-3.1	-4.3
REC U34/400	600.0	566.7	590.9	55.5	53.1	55.2
REC 230/U12	-600.0	-594.5	-596.2	2.0	2.0	3.1
REC U12/230	600.0	582.8	596.2	50.4	47.5	48.7
FRO 400/230	109.7	106.3	109.5	51.0	49.5	49.1
FRO 230/400	-109.7	-107.6	-109.5	-48.0	-45.9	-46.2
VDG 400/230	315.6	301.1	310.9	56.6	53.5	55.1
VDG 230/400	-315.6	-320.3	-310.9	-35.6	-35.9	-34.6
REC-U12 (+)	600.0	603.7	596.2	50.4	48.8	48.7
REC-U34 (+)	600.0	589.6	590.9	55.5	58.5	55.2
NAV-230 (+)	-3.8	-3.8	-3.5	-34.6	-35.0	-35.0
NUR-230 (+)	-47.0	-44.4	-45.2	-23.4	-24.0	-23.7

+ Valores de inyección positiva (generación)
ó negativa (carga).

TABLA III.7.2
 Relación de voltajes procesados
 (referido a 6 se tiene peso en REC-400 igual 0.1)

Barra	Verdadero	Medido	estimado
REC-400 *	406.3	430.0	406.3
FRO-400	406.3	-	406.3
REC-230	231.5	-	231.6
NAV-230	230.2	-	230.3
NUR-230	227.3	-	227.4
MON-230	231.0	-	231.0
ESC-230	229.5	-	229.5
VDG-230 *	230.6	230.6	230.6
VDG-400	404.0	-	404.8
FRO-230	231.3	-	231.3
REC-U34	20.4	-	20.4
REC-U12	20.2	-	20.2

* Valores de voltaje en la base de datos del estimador.

TABLA III.7.3

Varianzas de mediciones vs. estimados
en flujos en líneas y voltajes nodales *

(Referido a 6 se tiene peso en REC-400 igual a 0.1)

Flujo en línea	P		Q	
	medido	estimado	medido	estimado
REC-FRO-400	1.619 E-2	5.801 E-3	1.619 E-2	5.832 E-3
FRO-REC-400	1.619 E-2	5.801 E-3	1.619 E-2	6.207 E-3
REC-NAV-230	1.457 E-3	2.257 E-4	1.457 E-3	5.170 E-4
NAV-REC-230	1.457 E-3	2.257 E-4	1.457 E-3	5.177 E-4
NAV-NUR-230	1.457 E-3	1.486 E-4	1.457 E-3	3.234 E-4
NUR-NAV-230	1.457 E-3	1.486 E-4	1.457 E-3	3.246 E-4
NUR-MON-230	1.457 E-3	1.519 E-4	1.457 E-3	2.727 E-4
MON-NUR-230	1.457 E-3	1.519 E-4	1.457 E-3	2.778 E-4
MON-ESC-230	1.457 E-3	1.811 E-4	1.457 E-3	1.770 E-4
ESC-MON-230	1.457 E-3	1.811 E-4	1.457 E-3	1.843 E-4
ESC-VDG-230	1.457 E-3	7.245 E-4	1.457 E-3	7.241 E-4
VDG-ESC-230	1.457 E-3	7.245 E-4	1.457 E-3	7.250 E-4
FRO-VDG-400	1.619 E-2	6.757 E-3	1.619 E-2	6.600 E-3
VDG-FRO-400	1.619 E-2	6.757 E-3	1.619 E-2	6.913 E-3
FRO-MON-230	1.457 E-3	7.265 E-4	1.457 E-3	7.267 E-4
MON-FRO-230	1.457 E-3	7.265 E-4	1.457 E-3	7.266 E-4
REC 400/230	4.048 E-3	1.821 E-3	4.048 E-3	1.844 E-3
REC 230/400	4.048 E-3	1.821 E-3	4.048 E-3	1.844 E-3
REC 400/U34	1.619 E-2	4.007 E-3	1.619 E-2	5.397 E-3
REC U34/400	1.619 E-2	4.007 E-3	1.619 E-2	5.397 E-3
REC 230/U12	1.619 E-2	4.007 E-3	1.619 E-2	5.397 E-3
REC U12/230	1.619 E-2	4.007 E-3	1.619 E-2	5.397 E-3
FRO 400/230	4.048 E-3	1.843 E-3	4.048 E-3	1.856 E-3
FRO 230/400	4.048 E-3	1.843 E-3	4.048 E-3	1.856 E-3
VDG 400/230	4.048 E-3	1.945 E-3	4.048 E-3	1.946 E-3
VDG 230/400	4.048 E-3	1.945 E-3	4.048 E-3	1.946 E-3
REC-U12	7.934 E-3	4.007 E-3	1.619 E-2	5.397 E-3
REC-U34	7.934 E-3	4.007 E-3	1.619 E-2	5.397 E-3
NAV-230	1.619 E-4	1.386 E-4	1.457 E-3	6.261 E-4
NUR-230	1.619 E-4	1.392 E-4	1.457 E-3	6.322 E-4
REC-400			7.101	1.345 E-5
VDG-230			6.250 E-6	6.232 E-6

* Valores con una precisión de tres cifras significativas.

TABLA III.8.1.

Flujos medidos y Estimados

(caso base al caso III.5, se tiene error en parámetro de de inductancia serie de la línea REC-FRO en 400 Kv.)

Flujo en línea	P*			Q*		
	verd	med	est	verd	med	est
REC-FRO-400	777.2	750.3	95.4	-127.4	-123.2	-125.6
FRO-REC-400	-766.0	-727.6	-95.2	-4.0	-4.1	-124.4
REC-NAV-230	173.0	178.4	186.8	25.6	24.8	26.4
NAV-REC-230	-172.4	-162.2	-186.2	-36.6	-31.9	-31.0
NAV-NUR-230	168.6	174.9	185.5	-4.0	-3.8	-2.7
NUR-NAV-230	-165.6	-172.5	-181.9	11.1	11.4	13.8
NUR-MON-230	118.6	117.9	139.2	-34.5	-33.4	-35.0
MON-NUR-230	-116.0	-120.3	-135.6	31.4	32.1	38.1
MON-ESC-230	110.4	110.2	112.3	-17.8	-16.9	-17.7
ESC-MON-230	-107.4	-108.9	-109.2	8.7	8.4	9.3
ESC-VDG-230	44.6	43.4	45.2	-47.1	-48.2	-47.5
VDG-ESC-230	-44.6	-46.6	-45.1	37.7	37.2	38.1
FRO-VDG-400	656.2	668.3	660.0	-111.0	-113.1	-110.4
VDG-FRO-400	-649.2	-648.4	-652.9	-42.6	-45.0	-41.8
FRO-MON-230	55.4	57.2	56.4	9.6	9.1	9.1
MON-FRO-230	-55.4	-58.5	-56.4	-14.6	-13.9	-14.0
REC 400/230	-217.2	-230.1	-208.9	39.4	38.2	36.7
REC 230/400	217.2	226.0	208.9	-26.0	-26.2	-24.2
REC 400/U34	-600.0	-618.8	-590.9	-3.0	-3.1	-4.3
REC U34/400	600.0	566.7	590.9	55.5	53.1	55.2
REC 230/U12	-600.0	-594.5	-596.2	2.0	2.0	3.0
REC U12/230	600.0	582.8	596.2	50.4	47.5	48.7
FRO 400/230	109.7	106.3	93.4	51.0	49.5	49.8
FRO 230/400	-109.7	-107.6	-93.4	-48.0	-45.9	-47.5
VDG 400/230	315.6	301.1	310.3	56.6	53.5	54.9
VDG 230/400	-315.6	-320.3	-310.3	-35.6	-35.9	-34.5
REC-U12 (+)	600.0	603.7	596.2	50.4	48.8	48.7
REC-U34 (+)	600.0	589.6	590.9	55.5	58.5	55.2
NAV-230 (+)	-3.8	-3.8	-0.7	-34.6	-35.0	-33.7
NUR-230 (+)	-47.0	-44.4	-42.6	-23.4	-24.0	-21.2

+ Valores de inyección positiva (generación)
ó negativa (carga).

embargo, que otros estimados no sufren una variación apreciable, con relación a su homólogo del caso III.5 (caso sin error).

A.2 Voltajes

Como se puede notar de la tabla III.8.2, el conjunto de voltajes estimados permanece inalterable , a pesar del error introducido en el parámetro de la línea. Esto último se debe al elevado peso dado a los voltajes.

A.3 Residuales Normalizados

El proceso de identificación se lleva a cabo a través de la inspección de los residuales normalizados de la tabla III.8.3. En ella es posible observar que la medición con mayor valor de residual , y por lo tanto la de mayor probabilidad de anormalidad, es el flujo activo REC-FRO-400.

TABLA III.8.2.

Relación de voltajes procesados

(caso base al caso III.5, se tiene error en parámetro de de inductancia serie de la línea REC-FR0 en 400 Kv.)

Barra	Verdadero	Medido	estimado
REC-400 *	406.3	406.3	406.2
FR0-400	406.3	-	406.0
REC-230	231.5	-	231.6
NAV-230	230.2	-	230.3
NUR-230	227.3	-	227.0
MON-230	231.0	-	230.8
ESC-230	229.5	-	229.4
VDG-230 *	230.6	230.6	230.5
VDG-400	404.0	-	404.6
FR0-230	231.3	-	231.1
REC-U34	20.4	-	20.4
REC-U12	20.2	-	20.2

* Valores de voltaje en la base de datos del estimador.

TABLA III.8.3

Residuales normalizados en la desviación estándar del residual.

(caso base al caso III.5, se tiene error en parámetro de de inductancia serie de la línea REC-FRO en 400 Kv.)

Medición	Residual	
	P	Q
REC-FRO-400	4.414	1.594 E-2
FRO-REC-400	4.262	8.075 E-1
REC-NAV-230	2.120 E-1	4.712 E-2
NAV-REC-230	6.055 E-1	2.555 E-2
NAV-NUR-230	2.636 E-1	2.721 E-2
NUR-NAV-230	2.320 E-1	6.225 E-2
NUR-MON-230	5.363 E-1	4.170 E-2
MON-NUR-230	3.861 E-1	1.538 E-1
MON-ESC-230	4.976 E-2	1.836 E-2
ESC-MON-230	8.404 E-3	2.117 E-2
ESC-VDG-230	5.546 E-2	2.353 E-2
VDG-ESC-230	4.912 E-2	2.821 E-2
FRO-VDG-400	7.337 E-2	2.252 E-2
VDG-FRO-400	3.925 E-2	2.711 E-2
FRO-MON-230	2.617 E-2	2.257 E-3
MON-FRO-230	6.672 E-2	4.214 E-3
REC 400/230	3.998 E-1	2.921 E-2
REC 230/400	3.223 E-1	3.603 E-2
REC 400/U34	2.073 E-1	9.374 E-3
REC U34/400	1.869 E-1	1.727 E-2
REC 230/U12	1.346 E-2	8.147 E-3
REC U12/230	1.037 E-1	9.680 E-3
FRO 400/230	2.398 E-1	4.893 E-3
FRO 230/400	2.643 E-1	2.984 E-2
VDG 400/230	1.710 E-1	2.462 E-2
VDG 230/400	1.867 E-1	2.640 E-2
REC-U12 (+)	1.010 E-1	1.503 E-3
REC-U34 (+)	1.855 E-2	2.668 E-2
NAV-230 (+)	5.766 E-1	3.690 E-2
NUR-230 (+)	3.267 E-1	8.311 E-2
REC-400 (*)	-	9.220 E-4
VDG-230 (*)	-	3.963 E-2

* Valores de inyección de potencia.

+ Valores de voltaje en la base de datos del estimador

CAPITULO IV

ESTUDIO PRACTICO DEL ESTIMADOR EN LA ZONA COAHUILA

Introducción

En este estudio se recurre directamente a las mediciones de campo, que son enviadas al Centro de Control del ACNE a través de las diversas terminales remotas del Sistema de Información y Control en Tiempo Real (SICTRE). El equipo de medición se tiene ubicado en las subestaciones y plantas del Area de Control Noreste de CFE. De esta forma, se ilustra la respuesta del estimador ante una base de datos de mediciones de campo, y se compara con los resultados teóricos del Capítulo III.

Los casos siguientes son analizados con base al comportamiento de valores medidos y estimados en: flujos de potencia en líneas, voltajes nodales, residuos normalizados y varianzas.

La red utilizada en este estudio posee la topología y componentes modelados en el estudio del Capítulo III.

IV.1 Caso Base

Las características estadísticas del esquema de medición empleadas, son las que se definen en el caso 5 del capítulo anterior. Como se mencionó anteriormente, la base de datos corresponde al estado del Sistema Eléctrico para un instante determinado.

El esquema de medición se resume en la siguiente forma:

Datos Activos

Mediciones de Flujos de Potencia en Líneas	: 15
Mediciones de Inyecciones Nodales	: 0
Total Activo	: 15

Datos Reactivos

Mediciones de Flujos de Potencia en líneas	: 14
Mediciones de Inyecciones Nodales	: 0
Mediciones de Voltaje	: 2
Total Reactivo	: 16
Total de Mediciones	: 31

Las variables de estado quedan integradas por la magnitud y ángulo de las barras del sistema en estudio, cuyo diagrama unifilar y esquema de medición se muestran por la figura IV.1. El ángulo de referencia - 0° - es asignado al voltaje de la barra REC-400. El esquema de medición tiene ocho grados de libertad, el intervalo de confianza - para una distribución Ji-cuadrada (χ^2) y con probabilidad de 99% - presenta límites (superior e inferior) de 22 y 1.34 respectivamente. La prueba estadística de hipótesis para el índice J permitirá detectar la presencia de errores anormales en las mediciones.

A. Resultados

El algoritmo del estimador converge en tres iteraciones, al término de las cuales el índice J toma un valor de 7.92. La participación de los residuos reactivos en este índice es de 78.7%.

A.1 Flujos

La tabla IV.1.1 muestra los valores de flujo medido y estimado. Es interesante el observar que los flujos medidos y estimados en los transformadores de generación (REC U34/400 y REC U12/230) son iguales. Esto es como resultado de la falta de redundancia local, creando posteriormente dificultades en el proceso de identificación.

A.2 Voltajes

La tabla IV.1.2 muestra los voltajes medidos y estimados. Se puede observar que gran parte de los voltajes estimados poseen valores superiores al nominal (número a la derecha de las siglas de la barra). Lo anterior es una consecuencia de que los voltajes medidos tienen valores elevados.

A.3 Varianzas

Como se puede observar de la tabla IV.1.3, la varianza de cantidades estimadas es menor a la de medidas. Es notable el hecho de que la diferencia entre varianzas es mayor a medida que se tiene una mayor redundancia local.

- - Medición de Flujo de Potencia en líneas o transformadores.
- ⊗ - Medición de inyección de Potencia nodal.
- ⊙ - Medición de Voltaje.

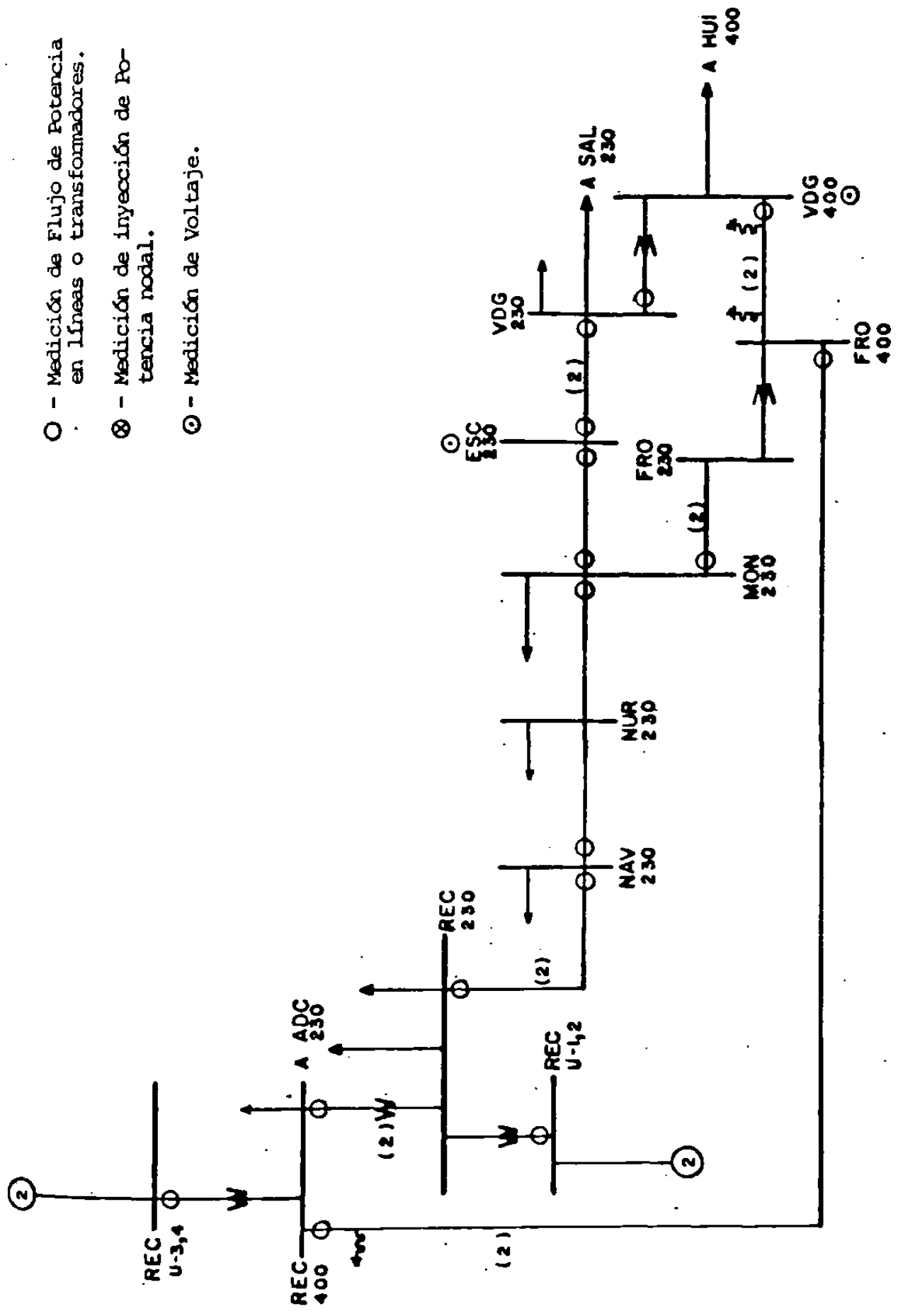


Figura IV.1 Esquema de Medición en La Zona Coahuila
(Caso Práctico)

TABLA IV.1.1
Flujos medidos y Estimados *
(Caso Base)

Flujo en línea	P		Q	
	medido	estimado	medido	estimado
REC-FRO-400	689	695.7	-	-114.1
FRO-REC-400	-	-687.8	-	-55.7
REC-NAV-230	187	186.1	16	15.9
NAV-REC-230	-185	-185.6	-21	-21.1
NAV-NUR-230	139	137.3	3	3.0
NUR-NAV-230	-	-135.4	-	-3.5
NUR-MON-230	-	106.2	-	-13.9
MON-NUR-230	-107	-104.3	6	6.0
MON-ESC-230	93	90.1	-32	-31.2
ESC-MON-230	-89	-88.1	15	15.8
ESC-VDG-230	-18	-19.6	-36	-39.9
VDG-ESC-230	21	19.7	35	29.8
FRO-VDG-400	-	607.9	-	30.3
VDG-FRO-400	-596	-602.0	57	57.0
FRO-MON-230	-	54.0	-	16.1
MON-FRO-230	-54	-54.0	-21	-21.0
REC 400/230	-134	-136.0	3	3.0
REC 230/400	-	136.0	-	1.9
REC 400/U34	-	-611.0	-	9.7
REC U34/400	611	611.0	43	43.0
REC 230/U12	-	-519.0	-	-9.6
REC U12/230	519	519.0	47	47.0
FRO 400/230	-	119.8	-	103.0
FRO 230/400	-	-119.8	-	-98.0
VDG 400/230	-	199.5	-	-15.4
VDG 230/400	-198	-199.5	18	23.5

* Valores expresados en Mw. y Mvar.

TABLA IV.1.2
Voltajes Medidos y Estimados +
(Caso Base)

Barra	Medido	estimado
REC-400	390	412.9
FRO-400	-	410.4
REC-230	228	237.4
NAV-230	229	236.3
NUR-230	228	232.5
MON-230	224	230.8
ESC-230 *	235	234.1
VDG-230	224	235.3
VDG-400 *	406	407.6
FRO-230	-	231.2
REC-U34	-	20.7
REC-U12	-	20.7

* Valores que entraron en el estimador como medición. La información de voltaje del resto de las barras fue transparente para el estimador.

+ Valores expresados en Kv.

TABLA IV.1.3
Varianzas de mediciones vs. estimados
en flujos en líneas y voltajes nodales *
(Caso Base)

Flujo en línea	P		Q	
	medido	estimado	medido	estimado
REC-FRO-400	1.709 E-2	1.446 E-2	-	-
REC-NAV-230	1.538 E-3	7.682 E-4	1.538 E-3	7.689 E-4
NAV-REC-230	1.538 E-3	7.682 E-4	1.538 E-3	7.696 E-4
NAV-NUR-230	1.538 E-3	1.373 E-3	1.538 E-3	1.538 E-4
MON-NUR-230	1.538 E-3	1.083 E-3	1.538 E-3	1.538 E-4
MON-ESC-230	1.538 E-3	5.507 E-4	1.538 E-3	7.529 E-4
ESC-MON-230	1.538 E-3	5.507 E-4	1.538 E-3	7.857 E-4
ESC-VDG-230	1.538 E-3	7.675 E-4	1.538 E-3	7.657 E-4
VDG-ESC-230	1.538 E-3	7.675 E-4	1.538 E-3	7.657 E-4
VDG-FRO-400	1.709 E-2	1.496 E-2	1.709 E-2	1.709 E-2
MON-FRO-230	1.538 E-3	1.538 E-3	1.538 E-3	1.538 E-3
REC 400/230	1.538 E-3	1.508 E-3	1.538 E-3	1.538 E-3
REC U34/400	1.709 E-2	1.709 E-2	1.538 E-3	1.538 E-3
REC U12/230	1.709 E-2	1.709 E-2	1.538 E-3	1.538 E-3
VDG 230/400	1.538 E-3	1.522 E-3	1.538 E-3	1.504 E-3
ESC-230			1.480 E-5	7.595 E-6
VDG-400			1.480 E-5	7.595 E-6

* Valores con una precisión de tres cifras significativas.

IV.2 Medición Flujo Anormal en REC-FRO-400

En este caso se modifica intencionalmente la lectura del flujo de potencia activa REC-FRO-400 agregando a la medición original un error de quince desviaciones estándar. La red y datos son los utilizados en el caso IV.1.

A. Resultados

Se presenta el impacto que conlleva un valor anormal dentro de la base de datos del estimador.

A.1 Flujos

La tabla IV.2.1 muestra la estimación de flujos en las líneas y transformadores. Es notable la sensible diferencia entre valores medidos y estimados en la mayoría de los elementos. Se debe notar el hecho de que elementos que carecen de redundancia local presenten valores estimados y medidos iguales.

A.2 Voltajes

La tabla IV.2.2 muestra la influencia de la perturbación introducida en los voltajes del Sistema.

A.3 Detección e Identificación de Errores

El estimador converge en tres iteraciones, mostrando al final un índice J de $2.7 E+1$, el cual está formado en un 76.6% por residuales de potencia activa.

El estimador detecta la presencia de un dato anormal, ya que el valor del índice J es una cantidad mayor al límite superior de confianza (21.95).

El proceso de identificación del dato anormal se lleva a cabo recurriendo al análisis de los residuales normalizados. Las tablas IV.2.3 condensan lo anterior. En estas se muestran el estimado de la varianza del residual y la normalización del mismo con su desviación estándar.

El criterio de identificación es el utilizado en el capítulo anterior: el residual de mayor valor.

Los resultados en las tablas IV.2.3 son los generados por la corrida del estimador desacoplado. En esta etapa se presentan los

TABLA IV.2.1
Flujos medidos y Estimados *
(Lectura flujo REC-FRO-400 anormal)

Flujo en línea	P		Q	
	medido	estimado	medido	estimado
REC-FRO-400	915	888.8	-	-61.9
FRO-REC-400	-	-874.8	-	-41.7
REC-NAV-230	187	186.8	16	15.8
NAV-REC-230	-185	-186.2	-21	-21.7
NAV-NUR-230	139	145.7	3	3.0
NUR-NAV-230	-	-143.6	-	-2.3
NUR-MON-230	-	120.2	-	-10.9
MON-NUR-230	-107	-117.8	6	6.0
MON-ESC-230	93	99.7	-32	-3.0
ESC-MON-230	-89	-97.3	15	17.1
ESC-VDG-230	-18	-18.8	-36	-39.9
VDG-ESC-230	21	18.8	35	29.8
FRO-VDG-400	-	577.7	-	23.0
VDG-FRO-400	-596	-572.4	57	57.0
FRO-MON-230	-	54.0	-	16.1
MON-FRO-230	-54	-54.0	-21	-21.0
REC 400/230	-134	-126.0	3	3.0
REC 230/400	-	126.0	-	1.2
REC 400/U34	-	-611.0	-	9.0
REC U34/400	611	611.0	43	43.0
REC 230/U12	-	-519.0	-	-10.2
REC U12/230	519	519.0	47	47.0
FRO 400/230	--	14.6	-	83.6
FRO 230/400	-	-14.6	-	-82.1
VDG 400/230	-	192.2	-	-16.0
VDG 230/400	-198	-192.2	18	23.5

* Valores expresados en Mw. y Mvar.

TABLA IV.2.2
 Voltajes Medidos y Estimados *
 (Lectura flujo REC-FRO-400 anormal)

Barra	Medido	estimado
REC-400	390	415.6
FRO-400	-	409.9
REC-230	228	238.9
NAV-230	229	237.9
NUR-230	228	234.0
MON-230	224	231.3
ESC-230 *	235	234.2
VDG-230	224	235.3
VDG-400 *	406	407.6
FRO-230	-	231.7
REC-U34	-	20.8
REC-U12	-	20.8

* Valores que entraron en el estimador como medición. La información de voltaje del resto de las barras fue transparente para el estimador.

siguientes casos:

- 1.- Varianza del residual de un valor pequeño y negativo, dando por resultado residuos complejos.
- 2.- Varianza de residual igual a cero, produciendo cocientes indeterminados.
- 3.- Varianza de residual positiva y de valor reducido, arrojando en consecuencia residuales normalizados de valor muy elevado.
- 4.- Resultados cuya relación residual-desviación estándar produce un valor relativamente normal, aún cuando la varianza residual toma un valor pequeño.

Los casos anteriores se indican por su número respectivo en cada uno de los residuales de las tablas IV.2.3. Es así, que resulta de importancia que la lógica del estimador esté preparada para discriminar residuales de esta naturaleza, para lograr una identificación eficiente. La figura IV.2 muestra un algoritmo generalizado para la etapa de identificación.

Se tiene que al descartar las mediciones enumeradas, quedan como datos de mayor probabilidad de error las mediciones de flujo activo REC-FRO-400 y NAV-NUR-230, ya que estas tienen los residuales de mayor valor. La incertidumbre en la definición de la medición errónea es consecuencia de una falta de redundancia en el esquema de medición.

IV.3 Medición Anormal en el Flujo MON-FRO-230 (Sin Redundancia)

En este caso se agrega a la medición de flujo MON-FRO-230 un error de 15σ , tanto en la parte activa como reactiva. El resto de las mediciones y la topología de la red permanece en condiciones similares a las del caso base.

A Resultados

Este caso logra su convergencia en tres iteraciones, generando al final un índice J de 7.9, en cuya formación los

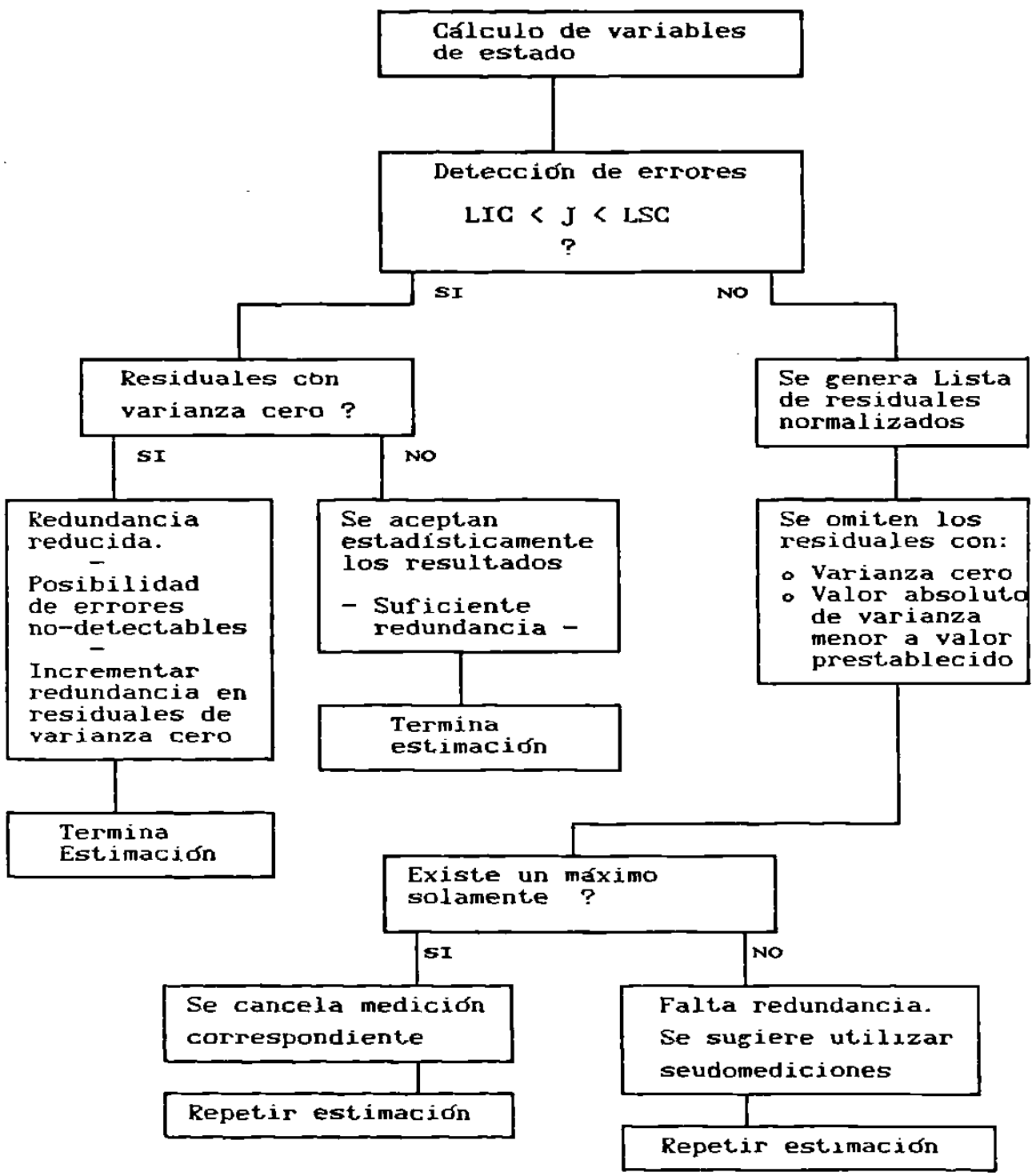
TABLA IV.2.3.A
Residuales Normalizados
(Lectura REC-FRO-400 anormal)

Medición Activa	Varianza Residual Estimada	Residual Normalizado	Caso
REC-FRO-400	3.33 E-3	2.50	
REC-NAV-230	1.03 E-3	3.74 E-2	
NAV-REC-230	1.03 E-3	2.13 E-1	
NAV-NUR-230	2.10 E-4	2.50	
MON-NUR-230	5.76 E-4	2.42	
MON-ESC-230	1.30 E-3	1.00	
ESC-MON-230	1.30 E-3	1.24	
ESC-VDG-230	1.03 E-3	1.38 E-1	
VDG-ESC-230	1.03 E-3	3.61 E-1	
VDG-FRO-400	2.70 E-3	2.45	
MON-FRO-230	-1.60 E-17	0 + j 7.48 E+1	1
REC 400/230	2.95 E-4	2.49	
REC U34/400	0.0	*	2
REC U12/230	3.47 E-18	2.13 E+5	3
VDG 230/400	1.60 E-4	2.46	

TABLA IV.2.3.B
Residuales Normalizados
(Lectura REC-FRO-400 anormal)

Medición Reactiva	Varianza Residual Estimada	Residual Normalizado	Caso
REC-NAV-230	1.026 E-3	2.796 E-2	
NAV-REC-230	1.025 E-3	2.820 E-2	
NAV-NUR-230	2.979 E-8	2.774 E-2	
MON-NUR-230	8.182 E-8	3.251 E-2	
MON-ESC-230	1.048 E-3	3.540 E-1	
ESC-MON-230	1.004 E-3	3.586 E-1	
ESC-VDG-230	1.035 E-3	6.535 E-1	
VDG-ESC-230	1.035 E-3	8.674 E-1	
VDG-FRO-400	0.0	*	2
MON-FRO-230	-1.56 E-17	0 + j 2.18 E+2	1
REC 400/230	-1.21 E-17	0 + j 6.98 E+2	1
REC U34/400	-5.55 E-17	0 + j 5.30 E+3	1
REC U12/230	5.20 E-17	4.61 E+3	3
VDG 230/400	7.060 E-4	1.11	
ESC-230	3.816 E-6	1.09	4
VDG-400	3.816 E-6	1.09	4

* Valor indeterminado



LSC - Límite superior de confianza
LIC - Límite inferior de confianza

Figura IV.2 Esquema General de Identificación

residuos reactivos participan con un 78.7%. Es importante observar que a pesar de que la medición MON-FRO-230 tiene un error grande, el índice J no cae fuera del intervalo de confianza. Es decir, el error es transparente al proceso de detección del estimador. El origen del comportamiento anterior es producto de la falta de redundancia local en la línea MON-FRO-230.

A.1 Flujos

La tabla IV.3.1 muestra los flujos de potencia medidos y estimados en este caso. Debe notarse que el estimador ajusta exactamente el valor del flujo medido y estimado en el caso MON-FRO-230. Esto se debe a la falta de una medición adicional en esa línea, como puede ser la medición de flujo en dirección opuesta. Se puede observar de la tabla IV.3.1 que el estimador también ajusta exactamente los valores calculados y medidos para los flujos de REC U34/400 y REC U12/230. Esto implica que el estimador se encuentre inhabilitado para detectar errores de medición en estos elementos. Se puede concluir de lo anterior, que el estimador de estado no será capaz de detectar errores anormales en zonas sin redundancia.

A.2 Voltajes

Los voltajes estimados para este caso son mostrados por la tabla IV.3.2. Puede observarse que los valores estimados son muy similares a los correspondientes del caso base.

IV.4 Medición Anormal en el Flujo REC-NAV-230

(Con Redundancia)

En este caso se muestra la operación de identificación de errores para el caso en el que si existe una redundancia local. Referido al caso base, se afecta la medición de flujo REC-NAV-230 agregando 15 desviaciones estándar al valor original (caso base) activo y reactivo.

A Resultados

El estimador converge en 3 iteraciones, concluyendo con un índice J igual a 132.2. El porcentaje de participación reactiva es de 9.7%.

TABLA IV.3.1
Flujos medidos y Estimados *
(Lectura MON-FRO-230 anormal)

Flujo en línea	P		Q	
	medido	estimado	medido	estimado
REC-FRO-400	689	695.7	-	-114.1
FRO-REC-400	-	-687.1	-	-55.7
REC-NAV-230	187	186.1	16	15.9
NAV-REC-230	-185	-185.6	-21	-21.1
NAV-NUR-230	139	137.3	3	3.0
NUR-NAV-230	-	-135.4	-	-3.5
NUR-MON-230	-	106.2	-	-13.9
MON-NUR-230	-107	-104.3	6	6.0
MON-ESC-230	93	90.1	-32	-31.2
ESC-MON-230	-89	-88.1	15	15.8
ESC-VDG-230	-18	-19.6	-36	-39.9
VDG-ESC-230	21	19.7	35	29.8
FRO-VDG-400	-	607.9	-	30.2
VDG-FRO-400	-596	-602.0	57	57.0
FRO-MON-230	-	-13.9	-	51.8
MON-FRO-230	14	14.0	47	47.0
REC 400/230	-134	-136.0	3	3.0
REC 230/400	-	136.0	-	1.9
REC 400/U34	-	-611.0	-	9.7
REC U34/400	611	611.0	43	43.0
REC 230/U12	-	-519.0	-	-9.7
REC U12/230	519	519.0	47	47.0
FRO 400/230	-	137.0	-	127.7
FRO 230/400	-	-137.0	-	-120.7
VDG 400/230	-	199.5	-	-15.4
VDG 230/400	-198	-199.5	18	23.5

* Valores expresados en Mw. y Mvar.

TABLA IV.3.2
 Voltajes Medidos y Estimados *
 (Lectura MON-FRO-230 anormal)

Barra	Medido	estimado
REC-400	390	412.9
FRO-400	-	410.4
REC-230	228	237.4
NAV-230	229	236.3
NUR-230	228	232.5
MON-230	224	230.8
ESC-230 *	235	234.1
VDG-230	224	235.3
VDG-400 *	406	407.6
FRO-230	-	230.1
REC-U34	-	20.7
REC-U12	-	20.7

* Estos son valores que si entraron en el estimador como medición. La información de voltaje del resto de las barras fue transparente para el estimador.

+ Voltajes expresados en Kv.

A.1 Residuales Normalizados

Las tablas IV.4.1.A y IV.4.1.B muestran la varianza estimada del residual y la normalización correspondiente. Después de ignorar los residuales incongruentes explicados en el caso IV.3, el algoritmo identifica a la medición activa REC-NAV-230 como la errónea. Es interesante observar que el residual de mayor valor después del anterior no pertenece a la parte reactiva de la medición REC-NAV-230.

IV.5 Medición Anormal en el Flujo REC-NAV-230

(Con Ponderación Reducida)

Este caso se encuentra referido al caso IV.4. Una vez detectado e identificado el error, se procede a cancelar su intervención la otorgando a la misma un peso muy pequeño para hacer irrelevante su influencia en los resultados del estimador.

A Resultados

El estimador converge en tres iteraciones, utilizando a un peso de 0.01 en la medición errónea. El índice J obtenido es 10.71, cuya participación reactiva es de 48.4%.

A.1 Flujos

La tabla IV.5.1 muestra los resultados obtenidos para flujos de potencia. Es notable la forma en que el efecto perturbador de la medición anormal es prácticamente eliminado en los resultados.

A.2 Voltajes

De la tabla IV.5.2 se puede ver que los voltajes permanecen iguales a los del caso base, a excepción del voltaje de la barra FRO-230.

A.3 Varianzas

Estos resultados se muestran en la tabla IV.5.3. Como se puede ver, las varianzas de los estimados continúan siendo inferiores a las de cantidades medidas.

TABLA IV.4.1.A
Residuales Normalizados
(Lectura REC-NAV-230 anormal)

Medición Activa	Varianza Residual Estimada	Residual Normalizado	Caso
REC-FRO-400	3.33 E-3	1.16 E-1	
REC-NAV-230	1.03 E-3	2.86	
NAV-REC-230	1.03 E-3	2.79	
NAV-NUR-230	2.10 E-4	2.13 E-1	
MON-NUR-230	5.75 E-4	1.11 E-1	
MON-ESC-230	1.30 E-3	5.56 E-2	
ESC-MON-230	1.30 E-3	4.80 E-2	
ESC-VDG-230	1.03 E-3	1.01 E-2	
VDG-ESC-230	1.03 E-3	1.11 E-4	
VDG-FRO-400	2.70 E-3	1.14 E-1	
MON-FRO-230	-1.60 E-17	0 + j 1.94 E+2	1
REC 400/230	2.95 E-4	1.16 E-1	
REC U34/400	0.0	*	2
REC U12/230	3.45 E-18	7.74 E+3	3
VDG 230/400	1.60 E-4	1.14 E-1	

TABLA IV.4.1.B
Residuales Normalizados
(Lectura REC-NAV-230 anormal)

Medición Reactiva	Varianza Residual Estimada	Residual Normalizado	Caso
REC-NAV-230	1.03 E-3	8.13 E-2	
NAV-REC-230	1.02 E-3	7.94 E-2	
NAV-NUR-230	2.98 E-8	7.93 E-2	
MON-NUR-230	8.18 E-8	7.80 E-2	
MON-ESC-230	1.05 E-3	3.74 E-3	
ESC-MON-230	1.00 E-3	2.83 E-3	
ESC-VDG-230	1.03 E-3	1.31 E-2	
VDG-ESC-230	1.03 E-3	1.74 E-2	
VDG-FRO-400	0.0	*	2
MON-FRO-230	-1.56 E-17	0 + j 2.03 E+1	1
REC 400/230	-1.21 E-17	0 + j 3.33 E+1	1
REC U34/400	-5.55 E-17	0 + j 1.65 E+2	1
REC U12/230	5.20 E-17	1.35 E+2	3
VDG 230/400	7.06 E-4	2.26 E-2	
ESC-230	3.82 E-6	2.27 E-2	
VDG-400	3.82 E-6	2.21 E-2	

* Valor indeterminado

TABLA IV.5.1

Flujos medidos y Estimados *

(Lectura flujo REC-NAV-230 Anormal con Pesos Reducidos)

Flujo en línea	P		Q	
	medido	estimado	medido	estimado
REC-FRO-400	689	695.7	-	-114.1
FRO-REC-400	-	-687.1	-	-55.7
REC-NAV-230	255	185.3	84	15.8
NAV-REC-230	-185	-184.8	-21	-21.0
NAV-NUR-230	139	137.3	3	3.0
NUR-NAV-230	-	-135.4	-	3.5
NUR-MON-230	-	106.2	-	-13.9
MON-NUR-230	-107	-104.3	6	6.0
MON-ESC-230	93	90.1	-32	-31.2
ESC-MON-230	-89	-88.1	15	15.8
FSC-VDG-230	-18	-19.6	-36	-39.9
VDG-ESC-230	21	19.7	35	29.8
FRO-VDG-400	-	607.8	-	30.2
VDG-FRO-400	-596	-602.0	57	57.0
FRO-MON-230	-	54.0	-	16.1
MON-FRO-230	-54	-54.0	-21	-21.0
REC 400/230	-134	-136.0	3	3.0
REC 230/400	-	136.0	-	1.9
REC 400/U34	-	-611.0	-	9.7
REC U34/400	611	611.0	43	43.0
REC 230/U12	-	-519.0	-	-9.7
REC U12/230	519	519.0	47	47.0
FRO 400/230	-	119.6	-	102.9
FRO 230/400	-	-119.6	-	-97.9
VDG 400/230	-	199.5	-	-15.4
VDG 230/400	-198	-199.5	18	23.5

* Valores expresados en Mw. y Mvar.

TABLA IV.5.2
 Voltajes Medidos y Estimados *
 (Lectura flujo REC-NAV-230 Anormal con Pesos Reducidos)

Barra	Medido	estimado
REC-400	390	412.8
FRO-400	-	410.4
REC-230	228	237.4
NAV-230	229	236.3
NUR-230	228	232.5
MON-230	224	230.8
ESC-230 *	235	234.1
VDG-230	224	235.3
VDG-400 *	406	407.6
FRO-230	-	233.9
REC-U34	-	20.7
REC-U12	-	20.7

* Valores que entraron en el estimador como medición. La información de voltaje del resto de las barras fue transparente para el estimador.

+ Voltajes expresados en Kv.

TABLA IV.5.3

Varianzas de mediciones vs. estimados
en flujos en líneas y voltajes nodales *

(Lectura flujo REC-NAV-230 Anormal con Pesos Reducidos)

Flujo en línea	P		Q	
	medido	estimado	medido	estimado
REC-FRO-400	3.053 E-2	2.607 E-2	-	-
REC-NAV-230	2.748 E-3	2.741 E-3	2.748 E-3	2.746 E-3
NAV-REC-230	2.748 E-3	2.741 E-3	2.748 E-3	2.748 E-3
NAV-NUR-230	2.748 E-3	2.467 E-3	2.748 E-3	2.748 E-3
MON-NUR-230	2.748 E-3	1.978 E-3	2.748 E-3	2.748 E-3
MON-ESC-230	2.748 E-3	1.004 E-3	2.748 E-3	1.345 E-3
ESC-MON-230	2.748 E-3	1.004 E-3	2.748 E-3	1.403 E-3
ESC-VDG-230	2.748 E-3	1.371 E-3	2.748 E-3	1.362 E-3
VDG-ESC-230	2.748 E-3	1.371 E-3	2.748 E-3	1.361 E-3
VDG-FRO-400	3.053 E-2	2.691 E-2	3.053 E-2	3.053 E-2
MON-FRO-230	2.748 E-3	2.748 E-3	2.748 E-3	2.748 E-3
REC 400/230	7.632 E-3	7.237 E-3	7.632 E-3	7.632 E-3
REC U34/400	3.053 E-2	3.053 E-2	3.053 E-2	3.053 E-2
REC U12/230	3.053 E-2	3.053 E-2	3.053 E-2	3.053 E-2
VDG 230/400	7.632 E-3	7.418 E-3	7.632 E-3	6.687 E-3
ESC-230			1.178 E-5	6.674 E-6
VDG-400			1.178 E-5	6.674 E-6

* Valores con una precisión de tres cifras significativas.

IV.6 Medición de Inyección Cero

En este caso se prueba la introducción de una medición de inyección de potencia activa igual a cero en la barra FRO-400. Esto tiene por objeto el proporcionar redundancia local en la medición del flujo en la línea REC-FRO-400. La prueba se realiza en base al caso IV.2, en el cual se introdujo una medición anormal para el flujo REC-FRO-400. En ese caso, el error era detectado, sin embargo, después de discriminar los residuales no significativos, existía incertidumbre en la identificación entre la medición alterada y una correcta, ya que ambas presentaban un residual con el mismo valor. Esto era resultado de una falta de redundancia local en el esquema de medición. La utilización de la medición de inyección cero tiene por objeto satisfacer ese requerimiento. Además, la inyección cero es una medición exacta que no requiere ser medida y que trata de lograr el balance nodal.

A Resultados

El converge en tres iteraciones con un índice J de 27.0, siendo su aportación reactiva de 76%.

A.1 Residuos Normalizados

Las tablas IV.6.1 muestran las varianzas estimadas de residuales, así como la normalización de estos últimos. Se debe notar que la medición con mayor residual, descartando los residuales numerados, sea el de la medición anormal REC-FRO-400 (tabla IV.6.1.A). Lo anterior hace evidente el efecto positivo de la medición de inyección cero en la etapa de identificación.

TABLA IV.6.1.A
Residuales Normalizados
(Lectura REC-FRO-400 anormal con medición de
inyección activa cero en barra FRO-400)

Medición Activa	Varianza Residual Estimada	Residual Normalizado	Caso
REC-FRO-400	8.06 E-3	3.33	
REC-NAV-230	1.03 E-3	0.10	
NAV-REC-230	1.03 E-3	0.11	
NAV-NUR-230	2.39 E-4	2.93	
MON-NUR-230	6.57 E-4	2.30	
MON-ESC-230	1.39 E-3	0.29	
ESC-MON-230	1.39 E-3	0.28	
ESC-VDG-230	1.03 E-3	2.31 E-2	
VDG-ESC-230	1.03 E-3	3.43 E-2	
VDG-FRO-400	8.43 E-3	6.40 E-1	
MON-FRO-230	1.64 E-6	1.96	
REC 400/230	3.37 E-4	2.94	
REC U34/400	0.0	*	2
REC U12/230	3.47 E-18	3.29 E+3	3
VDG 230/400	2.09 E-4	5.58 E-1	
FRO-400 (*)	3.54 E-2	2.01	

* Medición de inyección de potencia activa cero.

TABLA IV.6.1.B
Residuales Normalizados
 (Lectura REC-FRO-400 anormal con medición de
 inyección activa cero en barra FRO-400)

Medición Reactiva	Varianza Residual Estimada	Residual Normalizado	Caso
REC-NAV-230	1.03 E-3	1.14 E-2	
NAV-REC-230	1.03 E-3	1.13 E-2	
NAV-NUR-230	2.98 E-8	1.02 E-2	
MON-NUR-230	8.18 E-8	9.01 E-3	
MON-ESC-230	1.05 E-3	6.92 E-2	
ESC-MON-230	1.00 E-3	6.88 E-2	
ESC-VDG-230	1.03 E-3	1.48 E-2	
VDG-ESC-230	1.03 E-3	1.94 E-2	
VDG-FRO-400	0.0	*	3
MON-FRO-230	-1.56 E-17	0 + j 1.32 E+1	1
REC 400/230	-1.21 E-17	0 + j 8.30	1
REC U34/400	-5.55 E-17	0 + j 4.25 E+1	1
REC U12/230	5.20 E-17	2.90 E+1	4
VDG 230/400	7.06 E-4	2.40 E-2	
ESC-230	3.82 E-6	2.23 E-2	
VDG-400	3.82 E-6	2.34 E-2	

* Valor indeterminado

CAPITULO V

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

V.1 Conclusiones

Estimador de Estado en SEP's

El Estimador de Estado desarrolla la función de procesar la información de campo recibida en el Centro de Control, efectuando una labor de filtrado o ajuste estadístico de los datos, para entregar al operador un esquema de mediciones confiables. El estimador de estado colabora en forma importante con el operador para llevar a cabo una operación segura y eficiente.

Proceso de Estimación

La operación del estimador de estado sigue las siguientes etapas básicas:

- o Configuración de la topología de la red según estado de los interruptores.
- o Determinación de las variables de estado.
- o Detección de datos anormales.
- o Identificación de dato(s) anormal(es).

Requerimiento Práctico

La adecuada supervisión de un Centro de Control moderno requiere requiere del siguiente esquema:

- o Un sistema de medición de alta calidad.
- o Una computadora operando en tiempo real.
- o Una comunicación de alta velocidad entre la computadora del Centro de Control y el esquema de medición de campo.
- o Un estimador de estado eficiente.
- o Medios adecuados para el despliegue de resultados.

Modelado de errores

El modelado de la desviación estándar en el esquema de medición influye notablemente en el desarrollo de las etapas de

92

detección e identificación de errores. Debe existir congruencia entre el modelado estadístico del esquema de medición y la precisión del equipo de medición. Es necesario sintonizar las desviaciones estándar del estimador, en diversas pruebas, supervisando el desarrollo de los procesos de convergencia, detección e identificación de errores.

Convergencia

La formulación desacoplada del estimador tiene excelentes características de convergencia. Se logra por lo general en tres o cuatro iteraciones.

La convergencia del estimador se ve fuertemente influida por el valor asignado a la desviación estándar de los voltajes. Se tiene, por ejemplo, que el estimador no converge para el caso en el cual la desviación estándar de los voltajes es menor a la del resto de las mediciones. Así mismo, la matriz de ganancia reactiva será singular para el caso en donde no exista medición de voltaje.

El criterio de convergencia influye, naturalmente, en el número de iteraciones requeridas para el ajuste de los valores medidos y calculados. Se presentan casos en los que la ubicación del índice J dentro del intervalo de confianza depende de la tolerancia en el criterio de convergencia.

Redundancia

El estimador de estado requiere de redundancia local en las mediciones para detectar e identificar errores anormales. El estimador ajustará exactamente los valores medidos y estimados de las cantidades sin redundancia local. Lo anterior imposibilita al estimador para detectar errores en esas mediciones, ya que su residual es igual a cero para cualquier condición del sistema.

Observabilidad

Para lograr la estimación del sistema, el esquema estimador debe contar con el suficiente número de mediciones y distribución adecuada de las mismas. Se dice que la red es observable si se cumple lo anterior. Una indicación de que el sistema es inobservable es la presencia de una matriz de ganancia - activa o reactiva - singular.

Detección e Identificación de Errores

El estimador de estado detecta los errores anormales del esquema de medición, recurriendo a una prueba estadística de hipótesis en el índice J - suma de los residuos al cuadrado ponderados por el inverso de su varianza - sobre una distribución Ji-cuadrada. Los datos son aceptados, cuando J se encuentra dentro de los límites de un intervalo de confianza con probabilidad de 99%.

Ante la presencia de un dato anormal, el estimador lo identifica recurriendo al valor absoluto de los residuales normalizados por su desviación estándar.

La operación adecuada de las etapas de detección e identificación de errores dependerá notablemente de la redundancia del esquema de medición. Así pues, se tienen casos en que errores anormales en mediciones sin redundancia local no son detectados por el Estimador. Por otra parte, se presentan casos en los que la identificación del error no se logra en forma segura por la presencia de residuales correspondientes a mediciones sin redundancia

Eliminación de Mediciones

La cancelación de mediciones erróneas se puede llevar a cabo utilizando una ponderación relativamente insignificante para esta medición. Las pruebas desarrolladas muestran que esta es una forma eficiente de nulificar la influencia de la medición anormal sobre el resto de la base de datos.

V.2 Recomendaciones

Identificación de Errores Anormales

El proceso de identificación mostrado por la figura IV.2 puede ser utilizado para mejorar sustancialmente el algoritmo de identificación. Este algoritmo evitará que el identificador se vea confundido por los residuales de mediciones sin redundancia. Estos residuales presentan las siguientes características:

- o Varianza de residual negativa.

- o Varianza de residual igual a cero.
- o Varianza de residual inferior a un valor minimo preestablecido

El proceso identificador mejorará sus características conforme se agreguen a la base de datos pseudomediciones.

Se sugiere desarrollar pruebas con el estimador ante la presencia de errores anormales múltiples en la base de datos medida.

Aspectos Prácticos

A continuación se mencionan algunos aspectos prácticos extraídos de las pruebas desarrolladas con el estimador:

El empleo de una ponderación pequeña en mediciones anormales agiliza el proceso de cancelación de la medición anormal. Se sugiere efectuar pruebas para seleccionar el peso que presente buenos resultados tanto en la convergencia del estimador como en la identificación de errores anormales.

Como una alternativa al incremento de redundancia se deben utilizar las inyecciones nodales de potencia cero , lo que contribuirá notablemente a mejorar el proceso de identificación. Sin embargo, es recomendable efectuar pruebas para determinar la desviación estándar adecuada para estas mediciones.

Dentro de los parámetros del modelo que pueden variar con mayor frecuencia, se encuentra el "tap" de transformadores. Es conveniente tener como medición la posición del "tap", esto permitirá mejorar la identificación de errores en parámetros.

En un sistema longitudinal, los problemas de falta de redundancia pueden ser comunes. Para lograr una explotación eficiente de las propiedades del estimador, se requiere contar con la medición de flujo activo y reactivo en ambos extremos de líneas y transformadores, así como la medición de voltaje en la mayoría de las barras. La medición de inyecciones de potencia cero deberá ser explotada lo más posible, ya que es una medición exacta y de costo nulo.

Error de Parámetros

El error en un parámetro del modelo se manifiesta comunmente en la medición asociada al mismo. Es importante realizar un mantenimiento continuo en la base de datos de los parámetros de la red, para detectar este tipo de error.

Error de Modelado

Se recomienda efectuar un estudio detallado para generar técnicas de detección e identificación de errores de modelado. Un caso importante es el diseño del estimador con la inteligencia para detectar la presencia de un error en la topología de la red. En este caso la aplicación de sistemas expertos puede ser una alternativa.

Perspectivas en México y en el ACNE

Las perspectivas del desarrollo y aplicación de un Estimador de Estado en la C.F.E. son positivas, ya que se cuenta con la infra-estructura humana y material básica para su implantación. En la actualidad se tiene una gran parte de las terminales remotas instaladas en plantas y subestaciones del Sistema Eléctrico Nacional. El personal que tiene a su cargo la operación, montaje y explotación del "software" y "hardware" relativo al SICTRE tiene una capacitación adecuada para asegurar una operación segura del estimador. El operador del Sistema de Potencia se encuentra en la actualidad familiarizado con el sistema de adquisición de datos y control supervisorio, por lo que la información validada se podría presentar en pantallas similares a las que utiliza actualmente.

Conclusión Final

El Estimador de Estado de Sistemas de Potencia es una valiosa herramienta para el análisis y supervisión de un Sistema Eléctrico de Potencia. El estimador presenta información validada, así como un estimado del estado de toda la red. Sin embargo, la bondad de los resultados dependerá de la sintonización de sus características estadísticas, así como que exista la suficiente redundancia en el esquema de medición.

APENDICE

ESTIMADOR POR EL CRITERIO DE LOS MINIMOS CUADRADOS

Este método posee características estadísticas bien definidas, el modelo lineal del cual parte es el siguiente.

$$\underline{Y} = B \underline{X} + \underline{\xi} \quad (A.1)$$

donde:

\underline{Y} - es un vector que agrupa el conjunto de observaciones.

\underline{X} - es el vector de las variables de estado.

$\underline{\xi}$ - vector formado por los errores de las observaciones.

El estimador de mínimos cuadrados utiliza en su desarrollo las siguientes hipótesis:

- 1).- Se modela al vector de errores $\underline{\xi}$ como variables aleatorias independientes con media cero y varianza constante.

$$E(\underline{\xi}) = 0 \quad (A.2)$$

- 2).- La varianza de cada error ξ_i es σ_1^2 , siendo la correlación entre errores igual a cero:

covarianza ($\xi_i \xi_j$) = covarianza ($\xi_j \xi_i$) = 0
para $i \neq j$.

Lo anterior permite que las varianzas de los errores presenten el siguiente formato matricial:

$$E(\underline{\xi} \underline{\xi}^t) = \sigma^2 I \quad (A.3)$$

en donde I representa a una matriz identidad.

El estimador $\hat{\underline{X}}$ de X es definido como el valor de \underline{X} que minimiza la suma de cuadrados de las diferencias entre los valores observados y los valores calculados de \underline{Y} .

$$J(\underline{X}) = (\underline{Y} - B \underline{X})^t (\underline{Y} - B \underline{X}) \quad (A.4)$$

minimizando $J(\underline{X})$ con respecto a \underline{X} el resultado es:

$$\underline{X} = (B^t B)^{-1} B^t \underline{Y} \quad (A.5)$$

Las propiedades del estimador \hat{X} pueden enlistarse de la siguiente manera:

i.- \hat{X} es un estimador insesgado de X .

$$\begin{aligned} E(\hat{X}) &= E[(B^t B)^{-1} B^t \underline{Y}] \\ &= (B^t B)^{-1} B^t E(\underline{Y}) \\ &= (B^t B)^{-1} B^t B X \\ &= X \end{aligned}$$

ii.- \hat{X} es un estimador lineal insesgado de X de varianza mínima.

iii.- Debido a la linealidad del modelo, la característica de normalidad de los errores aleatorios se mantiene en los estimadores \hat{X} .

Resulta de interés comparar los valores observados con los calculados o sea su diferencia, que da como resultado el vector de residuales.

$$\text{Es decir, } \hat{\underline{Y}} = B \hat{\underline{X}} \quad (A.6)$$

siendo el vector de residuales

$$\underline{R} = \underline{Y} - \hat{\underline{Y}} \quad (A.7)$$

sustituyendo (A.5) y (A.6) en (A.7)

$$\begin{aligned} \underline{R} &= (B \underline{X} + \underline{\xi}) - B (B^t B)^{-1} B^t (B \underline{X} + \underline{\xi}) \\ &= [I - B (B^t B)^{-1} B^t] [B \underline{X} + \underline{\xi}] \end{aligned}$$

De lo anterior se tiene que el índice $J(X)$ se puede evaluar como:

$$J(X) = \underline{R}^t \underline{R} \quad (A.8)$$

El valor esperado de los dos miembros de (A.8) es:

$$\begin{aligned}
 E[J(\hat{X})] &= J(\hat{X}) = E(R^t R) \\
 J(\hat{X}) &= E [\xi^t [I - B (B^t B)^{-1} B^t] \xi] \\
 &= E(\xi^t \xi) - E [\xi^t B (B^t B)^{-1} B^t \xi] \\
 &= \sigma^2 m - \sigma^2 \text{traza}[B (B^t B)^{-1} B^t] \\
 &= \sigma^2 (m - q) \qquad (A.9)
 \end{aligned}$$

por lo tanto

$$\hat{\sigma}^2 = \frac{J(\hat{X})}{m - q} \qquad (A.10)$$

donde

m - es el número de valores observados.

q - es el número de variables de estado o cantidades a estimar.

$\hat{\sigma}^2$ - es el estimador insesgado de la varianza de las cantidades observadas.

La diferencia ($m - q$) representa los grados de libertad del esquema datos-variables a estimar.

Estimación por mínimos cuadrados ponderados.

Si se considera

$$E(\xi \xi^t) = \sigma^2 V \qquad (A.11)$$

donde V es una matriz definida-positiva conocida.

sea

$$V = V^{1/2} V^{1/2} \qquad (A.12)$$

y se define un nuevo vector como

$$\underline{Z} = V^{-1/2} Y \qquad (A.13)$$

entonces,

$$E(\underline{Z}) = V^{-1/2} B \underline{X} \qquad (A.14)$$

$$\begin{aligned}
E(\underline{\xi}_z \underline{\xi}_z^t) &= E(V^{-1/2} \underline{\xi}_y \underline{\xi}_y^t V^{-1/2}) \\
&= V^{-1/2} E(\underline{\xi}_y \underline{\xi}_y^t) V^{-1/2} \\
&= V^{-1/2} \sigma^2 V V^{-1/2} \\
&= \sigma^2 I \qquad \qquad \qquad (A.15)
\end{aligned}$$

La nueva variable \underline{Z} cumple con las hipótesis hechas para la formulación original y los siguientes resultados son válidos.

$$\begin{aligned}
\hat{\underline{X}} &= \sqrt{ [(V^{-1/2} B)^t (V^{-1/2} B)]^{-1} (V^{-1/2} B)^t } \underline{Z} \\
&= (B^t V^{-1} B)^{-1} B^t V^{-1} \underline{Y} \qquad \qquad \qquad (A.16)
\end{aligned}$$

La matriz de covarianzas de los residuos.

$$\begin{aligned}
E[(\underline{Y} - \hat{\underline{Y}}) (\underline{Y} - \hat{\underline{Y}})^t] &= E[(B(\underline{X} - \hat{\underline{X}}) - \underline{\varepsilon}) (B(\underline{X} - \hat{\underline{X}}) - \underline{\varepsilon})^t] \\
E[(\underline{Y} - \hat{\underline{Y}}) (\underline{Y} - \hat{\underline{Y}})^t] &= \sigma^2 [V - B(B^t V^{-1} B)^{-1} B^t] \qquad (A.17)
\end{aligned}$$

El hecho de suponer que $E(\underline{\varepsilon}) = 0$ no restringe el uso de este estimador, ya que es posible incluir el sesgo de $(\underline{\varepsilon})$ como una nueva variable de estado.

$J(\hat{\underline{X}})$, $\hat{\underline{X}}$ y $\hat{\underline{Y}}$ son variables aleatorias y por lo tanto son susceptibles de toda clase de pruebas estadísticas.

BIBLIOGRAFIA

- 1.- J.J. Allemong, L. Radu y A.M. Sasson, "A Fast Reliable State Estimation Algorithm for AEP'S New Control Center", IEEE PAS-101, No.4 Abril 1982.
- 2.- J. F. Dopazo, S. T. Klitin, A.M. Sasson y L. S. Van Slyck, "Implementation of the AEP Real-Time Monitoring System", IEEE PAS-95, No.5 Septiembre/Octubre 1976.
- 3.- F. C. Schweppe, J. Wildes y D.P. Rom, "Power System Static - State Stimulation", Partes I-III, IEEE PAS-89, No.1, Enero 1970.
- 4.- F. Aboytes, D. Romero, "Metodo Generalizado de Estimación de Estado Mediante Transformaciones en Sistemas Eléctricos de Potencia", Comisión Federal de Electricidad, ESIME-IPN.
- 5.- F. Aboytes, "Computer Methods for State Estimation and Security Assessment in Electrical Power Systems", Tesis de Doctorado, Imperial College of Science and Technology. Londres, Inglaterra, 1974.
- 6.- F. Aboytes, S. A. Molina, "An Efficient State Estimation Method Through Transformations", PICA-79, Conf. Proceedings, Mayo 15-18, 1979.
- 7.- J. F. Dopazo, S. T. Hermann, A. M. Sasson y L. S. Van Slyck, "Tema V. Metodología de Estimación de Estado Para Sistemas Eléctricos de Potencia", UNAM, Enero 1979.
- 8.- E. Handschin, F.C. Schweppe, J. Kohlas y A. Fiechter, "Bad Data Analysis for Power System State Estimation", Artículo T 74 309-1 presentado en IEEE PES Summer Meeting & Energy Resources Conf., Anaheim, Cal., Julio 14-19, 1974.
- 9.- L.S. VanSlyck, J. J. Allemong, "Operating Experience with the AEP State Estimator", Artículo 87 WM 098-7, IEEE/PES 1987 Winter Meeting, New Orleans, Louisiana, Febrero 1-6 de 1987.
- 10.- J. F. Dopazo, O. A. Klitin y L. S. VanSlyck, "State Calculation of Power Systems from Line Flow Measurements", Artículo No.71 C 26-PWR-X-A presentado en la Conferencia IEEE/PICA, Boston, Mass., del 24-26 de Mayo, 1971.
- 11.- H. P. Horisberger, J. C. Richard y C. Rossier, "A Fast Decoupled Static State-Estimator for Electric Power Systems", IEEE Vol. PAS-95, No. 1. Enero/Febrero 1976.

- 12.- J. F. Dopazo, S. T. Ehrmann, O. A. Klitin, A.M. Sasson, "Justification of the AEP Real Time Load Flow Project, Artículo T 73 108-8 en IEEE PES Winter Meeting, New York, N.Y, Enero 28 - Febrero 2 , 1973.
- 13.- Thomas A. Stuart, Charles J. Herget, "A Sensitivity Analysis of Weighted Least Squares State Estimation for Power Systems", Artículo T 73 035-8, presentado en IEEE PES Winter Meeting, New York, N. Y, Enero 28 - Febrero 2, 1973.
- 14.- B. Porretta, R.S. Dhillon, "Performance Evaluation of State Estimation from Line Flow Measurements on Ontario Hydro Power System", Artículo T 73 086-6, presentado en IEEE PES Winter Meeting, New York, N. Y, Enero 28 - Febrero 2, 1973.
- 15.- F. Aschmoneit, D. Denzel, R. Graf y G. Schellstede, "Development of an Optimal State Estimator and Implementation in a Real-Time Computer System", Artículo CIGRE, 1976.

