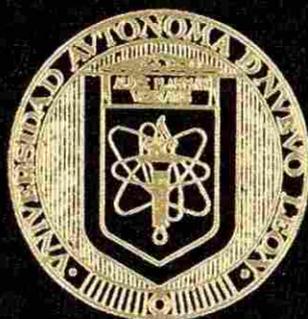


**UNIVERSIDAD AUTONOMA DE NUEVO LEON**  
**FACULTAD DE INGENIERIA MECANICA Y ELECTRICA**  
**DIVISION DE ESTUDIOS DE POSTGRADO**



**ESTIMACION DE ESTADO CON MEDICIONES  
FASORIALES SINCRONIZADAS**

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

**PRESENTA**  
**SERGIO ISIDRO PEREZ RUIZ**

**SAN NICOLAS DE LOS GARZA, N. L.**

**MARZO, 2003**

ESTIMACIONES ESTADOCOMEDICIONES

FASORRIALES SINCRONIZADAS

2003

RP

TM  
Z5853  
.M2  
FIME  
2003  
.P4



1020148560



# UANL

---

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN



DIRECCIÓN GENERAL DE BIBLIOTECAS

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN

FACULTAD DE INGENIERIA MECANICA Y ELECTRICA

DIVISION DE ESTUDIOS DE POSTGRADO



ESTIMACION DE ESTADO CON MEDICIONES  
FASORIALES SINCRONIZADAS

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN

TESIS

DIRECCIÓN GENERAL DE BIBLIOTECAS  
EN OPCION AL GRADO DE MAESTRO EN CIENCIAS

DE LA INGENIERIA ELECTRICA CON  
ESPECIALIDAD EN POTENCIA

PRESENTA

SERGIO ISIDRO PEREZ RUIZ

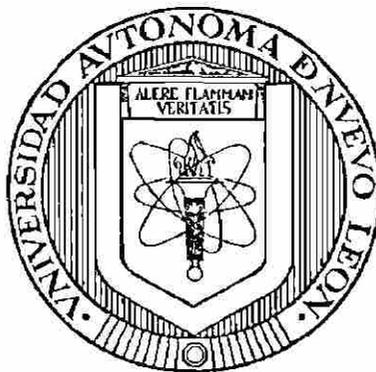
SAN NICOLAS DE LOS GARZA, N. L.

MARZO, 2003

**UNIVERSIDAD AUTONOMA DE NUEVO LEON**

**FACULTAD DE INGENIERIA MECANICA Y ELECTRICA**

**DIVISION DE ESTUDIOS DE POSTGRADO**



**ESTIMACION DE ESTADO CON MEDICIONES  
FASORIALES SINCRONIZADAS**

**TESIS**

**EN OPCION AL GRADO DE MAESTRO EN CIENCIAS**

**DE LA INGENIERIA ELECTRICA CON  
ESPECIALIDAD EN POTENCIA**

**PRESENTA**

**SERGIO ISIDRO PEREZ RUIZ**

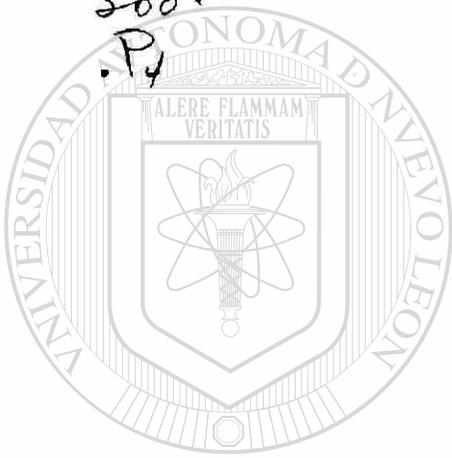
SAN NICOLAS DE LOS GARZA, N.L.

MARZO 2003



975860

TH  
Z5853  
.M2  
FM  
2002  
.P4



# UANL

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN



DIRECCIÓN GENERAL DE BIBLIOTECAS

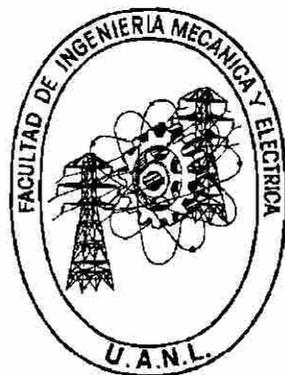


FONDO  
TESIS

**UNIVERSIDAD AUTONOMA DE NUEVO LEON**

**FACULTAD DE INGENIERIA MECANICA Y ELECTRICA**

**DIVISION DE ESTUDIOS DE POSTGRADO**



**ESTIMACION DE ESTADO CON MEDICIONES  
FASORIALES SINCRONIZADAS**

---

**TESIS**

**EN OPCION AL GRADO DE MAESTRO EN CIENCIAS**

**DIRECCIÓN DE LA INGENIERIA ELECTRICA CONECCAS**

**ESPECIALIDAD EN POTENCIA**

**PRESENTA**

**SERGIO ISIDRO PEREZ RUIZ**

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

Los miembros de comité de tesis recomendamos que la tesis **ESTIMACION DE ESTADO CON MEDICIONES FASORIALES SONCRONIZADAS**, realizada por el alumno Sergio Isidro Pérez Ruiz, matrícula 1069282, sea aceptada para su defensa como opción al grado de Maestro en Ciencias de la Ingeniería Eléctrica con especialidad en Potencia.

El comité de Tesis

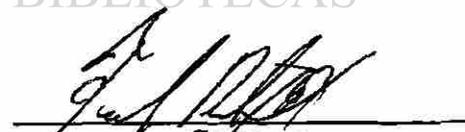


Asesor  
Dr. Florencio Aboytes García

DIRECCIÓN GENERAL DE BIBLIOTECAS



Coasesor  
Dr. José Antonio de la O Serna



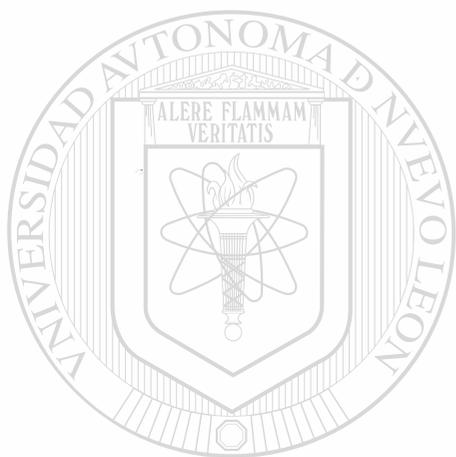
Coasesor  
Dr. Fernando Betancourt Ramírez



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

## DEDICATORIA

Dedico este trabajo a mis padres Alfonso Pérez Guzmán y María del Carmen Ruiz Pérez, por el apoyo constante e incondicional en mi formación personal y profesional. Dedico también este trabajo a mis hermanos María Edith, Felipe de Jesús, Guadalupe y Ramón Alfonso por su apoyo moral en todo momento. Dedico de manera especial este trabajo a mi tía Mónica (q.e.p.d.).



# UANL

---

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN



DIRECCIÓN GENERAL DE BIBLIOTECAS

## AGRADECIMIENTOS

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

Al Dr. José Antonio de la O Serna y al Dr. Fernando Betancourt Ramírez cuyos comentarios y sugerencias contribuyeron a mejorar este trabajo.

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

A mis amigos Fernando Méndez, Luis Arce, Arturo Fregozo, Francisco Castro, Oscar Villavicencio por su amistad incondicional brindada todos estos años.

A mis amigos y compañeros de la maestría con quienes conviví dos años de mi vida.

---

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

DIRECCIÓN GENERAL DE BIBLIOTECAS

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

# RESUMEN

Publicación No. \_\_\_\_\_

Sergio Isidro Pérez Ruiz, M.C. en Ingeniería Eléctrica

Universidad Autónoma de Nuevo León, 2003

**Profesor Asesor: Dr. Florencio Aboytes García**

El objetivo principal de la tesis es analizar el efecto de incluir mediciones fasoriales sincronizadas en el proceso de estimación de las variables de estado en un sistema eléctrico de potencia.

El proceso está definido por tres pasos principales: estimación de variables de estado, prueba de detección de errores anormales así como la identificación y eliminación de mediciones con errores anormales.

Una situación que se presenta en los algoritmos de estimación de estado es la posible combinación de mediciones convencionales con mediciones precisas (inyecciones cero y mediciones fasoriales). Esta condición podría producir problemas de convergencia en los algoritmos convencionales de estimación de estado.

Los algoritmos de estimación de estado evaluados se basaron en la técnica de mínimos cuadrados ponderados (WLS) empleando el método de Newton-Raphson y el método Desacoplado Rápido.

Para evitar problemas de convergencia cuando se incluyen mediciones precisas (inyecciones cero y mediciones fasoriales) se aplicó una técnica de descomposición ortogonal en el proceso de estimación de variables de estado.

Se demuestra mediante casos de estudio que el algoritmo de estimación de estado con descomposición ortogonal presenta mejores características de convergencia que el algoritmo de estimación de estado convencional para condiciones especiales que se presentan en un sistema eléctrico de potencia.

En el desarrollo del trabajo se ilustra la aplicación de la prueba de detección e identificación de errores anormales para el caso general con mediciones convencionales y mediciones precisas.

De las pruebas realizadas se concluye que cuando se incluyen mediciones fasoriales sincronizadas en el proceso de estimación siempre se mejora la estimación de las variables de estado. En la tesis se presenta un nuevo criterio para la aceptación o rechazo del estimado. Este nuevo criterio cambia lo establecido en las pruebas de hipótesis tradicionales.

---

Se presenta la formulación de un algoritmo de estimación de estado lineal para el caso donde se dispone de mediciones fasoriales en todos los nodos de la red, el algoritmo es simple y rápido en su ejecución.

Se incluyen conclusiones y recomendaciones para trabajos de investigación futuras.

# INDICE

<b>Dedicatoria</b>	iv
<b>Agradecimientos</b>	v
<b>Resumen</b>	vi

## 1 INTRODUCCIÓN

1.1 Motivación	1
1.2 Antecedentes	3
1.3 Estructura de la tesis	4

## 2 ESTIMACION DE ESTADO CONVENCIONAL

2.1 Introducción	6
2.2 Estimación de estado lineal	7
2.2.1 Estimador lineal	7
2.2.2 Formulación matricial	8
2.2.3 Análisis y resultados	10
2.3 Estimación de estado no lineal	12
2.3.1 Estimador de estado no lineal por método Newton-Raphson	12
2.3.2 Estimador de estado no lineal por método Desacoplado Rápido	14
2.3.2.1 Formulación desacoplada	15
2.3.3 Análisis y resultados	18
2.3.3.1 Método Newton-Raphson	18
2.3.3.2 Método Desacoplado Rápido	21
2.4 Estimación de estado con error anormal en parámetros de líneas de transmisión y transformadores de potencia	22
2.4.1 Método Newton-Raphson	23
2.4.2 Método Desacoplado Rápido	25

## INDICE (continuación)

<b>3</b>	<b>APLICACIÓN DE LA DESCOMPOSICION ORTOGONAL EN LA ESTIMACION DE ESTADO</b>	
3.1	Introducción	28
3.2	Estimación de estado por descomposición ortogonal	29
3.2.1	Estimador lineal por descomposición ortogonal	31
3.2.2	Descomposición ortogonal	34
3.2.3	Estimador lineal con restricciones de igualdad	35
3.2.4	Análisis y resultados	39
3.3	Estimación de estado no lineal por descomposición ortogonal	41
3.3.1	Estimador CA por método Newton-Raphson	41
3.3.2	Estimador CA por método Desacoplado Rápido	42
3.4	Análisis y resultados	44
3.4.1	Método Newton-Raphson	44
3.4.2	Método Desacoplado Rápido	47
3.5	Estimación de estado convencional en sistemas con inyección cero	49

---

## **4 ESTIMACION DE ESTADO CON MEDICIONES**

### **FASORIALES SINCRONIZADAS**

4.1	Introducción	52
4.2	Mediciones fasoriales sincronizadas (MFS)	53
4.3	Resultados estimación de estado con MFS	57
4.3.1	Estimación de estado convencional con MFS	57
4.3.1.1	Resultados del método Newton-Raphson	58
4.3.1.2	Resultados del método Desacoplado Rápido	60
4.3.2	Estimación de estado por descomposición ortogonal con MFS	62
4.3.2.1	Resultados del método Newton-Raphson	63
4.3.2.2	Resultados del método Desacoplado Rápido	67
4.4	Sistema de potencia con MFS en todos los nodos	71

## INDICE (continuación)

4.4.1	Formulación lineal con MFS en todos los nodos	72
<b>5</b>	<b>DETECCION E IDENTIFICACION DE ERRORES</b>	
5.1	Introducción	75
5.2	Detección de errores	76
5.2.1	Distribución chi-cuadrada ( $\chi_r^2$ )	78
5.2.2	Porcentaje de residuales ponderados fuera del rango $\pm 1.2\sigma$	79
5.3	Detección de errores en sistemas con medición fasorial	80
5.4	Identificación de errores	85
5.4.1	Residuales	86
5.4.2	Residuales ponderados	88
5.4.3	Residuales normalizados	89
5.4.4	Análisis de la prueba de detección e identificación de errores y el porcentaje fuera del rango $\pm 1.2\sigma$	90
5.5	Estimación de estado con MFS erróneas	92
5.5.1	Resultados del método Newton-Raphson	93
5.5.2	Resultados del método Desacoplado Rápido	96
5.6	Estimación de estado por descomposición ortogonal con error de parámetros en líneas de transmisión y transformadores de potencia	100
5.6.1	Método Newton-Raphson	100
5.6.2	Método Desacoplado Rápido	102
<b>6</b>	<b>CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES</b>	
6.1	Introducción	106
6.2	Conclusiones	106
6.2.1	Estimación de estado convencional	107
6.2.2	Estimación de estado por descomposición ortogonal	107
6.2.3	Mediciones fasoriales	108

## INDICE (continuación)

6.2.4	Detección e identificación de errores	109
6.3	Recomendaciones para trabajos futuros	110
6.4	Aportaciones del trabajo	110
<b>REFERENCIAS</b>		112
<b>INDICE DE TABLAS</b>		115
<b>INDICE DE FIGURAS</b>		118
<b>APENDICE A</b>	Modelado de ecuaciones	119
<b>APENDICE B</b>	Método de rotación de Givens	124
<b>APENDICE C</b>	Datos de sistema de prueba	129

---

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN<sup>®</sup>  
DIRECCIÓN GENERAL DE BIBLIOTECAS

# CAPITULO I

## INTRODUCCION

### 1.1 Motivación

En la operación de un sistema eléctrico de potencia se realizan diversos estudios para evaluar las condiciones de operación del sistema y el impacto de contingencias, así como el despacho económico de la generación. La estimación de estado es una técnica que se utiliza para validar la información del sistema [1], esta herramienta es usada desde hace 20-25 años en los centros de control de los sistemas eléctricos de potencia para presentar a los operadores de las redes eléctricas condiciones operativas validadas.

La técnica de estimación de estado emplea las mediciones presentes en un sistema eléctrico de potencia para determinar las variables de estado utilizando un procesamiento donde se modela la incertidumbre de la medición. En el estudio las variables de estado utilizadas son las magnitudes del voltaje y los ángulos de fase de los voltajes nodales del sistema  $(|V|, \theta)$ . El problema fundamental de la estimación de estado es estimar los valores de los voltajes nodales complejos  $(|V|, \theta)$  que describen la condición operativa real del sistema eléctrico, utilizando las mediciones de potencia activa y potencia reactiva de los flujos en líneas y transformadores, las inyecciones de potencia activa y reactiva de generación y carga y las magnitudes de voltaje en diversos puntos del

sistema, en todos los casos se incluyen errores en las mediciones que deben ser modelados en el proceso de estimación de estado.

Tradicionalmente la estimación de estado se ha aplicado utilizando diversos tipos de mediciones, en todos los casos los dispositivos de medición incluyen un error aleatorio que es modelado en el proceso de estimación. Las mediciones se ponderan en el proceso de estimación considerando la precisión del equipo de medición.

En algunos casos la combinación de mediciones con alta y baja precisión produce problemas de convergencia o resultados anormales en los algoritmos de estimación de estado. Un caso típico de medición con alta precisión, son las mediciones en nodos con inyección cero, a las cuales se les otorga una ponderación alta debido a su exactitud. En este trabajo se analiza este problema y se presentan técnicas para evitarlos.

Con el desarrollo de tecnología y el diseño de equipos de medición fasorial (PMU “Phasor Measuring Unit”) es posible obtener fasores (medición de magnitud de voltaje y ángulo de fase) muy precisos en diferentes puntos de la red y se vuelve atractivo incluirlos en el proceso de estimación de estado, para tener mayor redundancia y una mejor estimación.

Con la aplicación de mediciones fasoriales se tiene nuevamente la combinación de mediciones convencionales y de mediciones con alta precisión, lo que hace necesario disponer de técnicas para evitar problemas de convergencia. En el problema general se debe considerar la posibilidad que la medición precisa sea errónea, esto afecta el resultado de la estimación por la alta ponderación que se les da a estas mediciones, por lo que se deben emplear técnicas alternas para lograr detectar e identificar los errores en estas condiciones.

El incluir mediciones fasoriales sincronizadas en el algoritmo de estimación de estado viene a cambiar el tratamiento e importancia que tiene el índice de funcionamiento  $J(x)$  al momento de decidir si un estimado se acepta o se rechaza,

dando un enfoque diferente al procedimiento normal utilizado a través de los años, por lo que se requiere investigar al respecto.

## 1.2 Antecedentes

La estimación de estado se ha consolidado a través del tiempo y es actualmente la técnica principal para validar la información que llega a los centros de control. Un gran número de trabajos de análisis y revisión de las diferentes técnicas aplicadas para dar solución a este problema se han presentado [5].

La estimación de estado convencional contempla solamente equipos de medición tradicionales [1,2,6] y obtiene la solución sin considerar características importantes del sistema de medición, como son las inyecciones cero, y mediciones con alta precisión que dan redundancia al estimador.

La aparición de problemas de convergencia debido a la combinación de mediciones con alta y baja precisión, ha motivado al desarrollo de técnicas que evitan los problemas de convergencia.

En este trabajo se analiza la técnica por descomposición ortogonal y la técnica con restricciones de igualdad [7,8,9,10], cada una con sus características particulares, sobre todo en la manera de ponderar a la medición con alta precisión en el proceso de estimación.

El método más utilizado en sistemas de potencia para resolver sistemas de ecuaciones no lineales es el Método Newton-Raphson [1,2,3,7,8]. Al ser un método que requiere grandes recursos de computo y tiempo de convergencia se han planteado métodos alternos más eficientes y rápidos desde el punto de vista computacional. El Método Desacoplado Rápido [2,6] se ha convertido en un método muy utilizado, el cual realiza

En el capítulo 2 se presenta un modelo lineal, el cual incluye simplificaciones que facilitan entender el procedimiento de solución para el caso no lineal. Se desarrolla el modelo no lineal para la estimación de estado convencional utilizando dos métodos de solución: Método Newton-Raphson y Método Desacoplado Rápido. Se presentan resultados para ambos modelos y se aplica en el caso no lineal la técnica de detección e identificación de errores.

En el capítulo 3 se describe el problema de combinar mediciones con alta y baja precisión en el modelo de estimación de estado convencional. Se presentan dos técnicas en problemas lineales: Descomposición Ortogonal y Restricciones de Igualdad. Posteriormente se aplica la técnica de descomposición ortogonal en el desarrollo del modelo no lineal, y la utilización de la técnica de detección e identificación de errores. De igual manera se presentan resultados de estimación empleando el Método Newton-Raphson y el Método Desacoplado Rápido.

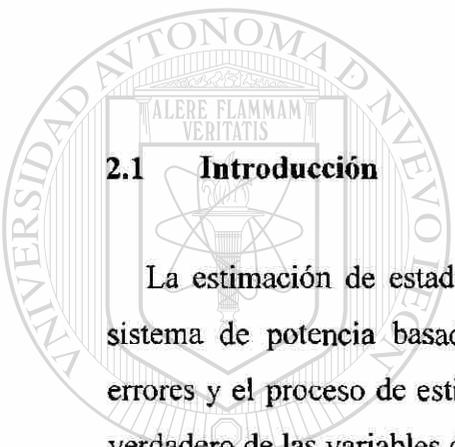
En el capítulo 4 se presenta el modelo no lineal de estimación de estado por descomposición ortogonal para incluir mediciones fasoriales sincronizadas. Se analizan las ventajas y desventajas de incluir las mediciones en el proceso de estimación y se presenta un nuevo criterio para decidir si la estimación se acepta o se rechaza. Se presentan resultados en casos de prueba empleando el Método Newton-Raphson y el Método Desacoplado Rápido, la técnica de detección e identificación de errores así como el nuevo criterio de aceptación.

En el capítulo 5 se detallan los conceptos para la detección de errores, se hace énfasis en la detección de errores anormales de mediciones precisas. Se detalla el nuevo criterio llamado porcentaje fuera del rango  $\pm 1.2\sigma$  de los residuales, y se realiza un análisis comparativo de 3 técnicas para identificar mediciones erróneas.

Finalmente, en el capítulo 6 se resumen las conclusiones y recomendaciones para desarrollar trabajos futuros y la aportación de la tesis.

# CAPITULO II

## ESTIMACION DE ESTADO CONVENCIONAL



### 2.1 Introducción

La estimación de estado es el proceso para determinar las variables de estado del sistema de potencia basado en mediciones. Generalmente las mediciones contienen errores y el proceso de estimación se basa en un criterio estadístico que estima el valor verdadero de las variables de estado buscando reducir los errores de medición.

---

En el desarrollo del capítulo se analiza la estimación de estado lineal, modelo simplificado con solución rápida y eficiente, donde se considera como variables de estado a los ángulos de fase de los voltajes nodales ( $\theta$ ), es una alternativa para analizar problemas complejos presentes en un modelo no lineal. Posteriormente se plantea la estimación de estado no lineal, con un modelo que tiene una representación completa de las variables de estado del sistema eléctrico de potencia, empleando magnitudes de voltaje y ángulos de fase como variables de estado ( $|\mathcal{V}|, \theta$ ).

En el modelo no lineal de estimación de estado se presentan las bases conceptuales, restricciones, así como las técnicas de detección e identificación de errores y los métodos de solución más aplicados.

## 2.2 Estimación de estado lineal

En un modelo lineal generalmente se representa el sistema con simplificaciones, lo que facilita la solución del problema, la solución directa sin iteraciones permite analizar características complejas de los modelos no lineales.

El problema específico para el caso lineal considera un soporte de reactivos adecuado para mantener perfil de voltajes en el sistema eléctrico, dejando sólo como incógnitas los ángulos de fase de los voltajes nodales ( $\theta$ ).

### 2.2.1 Estimador lineal

El estimador lineal de un sistema eléctrico de potencia despreja la resistencia y el efecto capacitivo de la línea de transmisión, y emplea las mediciones de flujos de potencia activa en líneas de transmisión y transformadores, y la medición de inyecciones de potencia activa en los nodos de la red (generación y carga).

El estimador se basa en relaciones matemáticas entre variables de estado y mediciones presentes en el sistema. Sea  $z$  el conjunto de mediciones,  $x$  el vector de variables de estado (ángulos de fase),  $h$  la relación funcional que relaciona las mediciones con las variables de estado y  $v$  el vector de error de las mediciones, la Ec. (2.1) describe esta relación:

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

Los errores en las mediciones se modelan como variables aleatorias y aplicando el método de mínimos cuadrados ponderados se busca minimizar la suma de los cuadrados de la diferencia ponderada entre valores medidos y valores estimados, el factor de ponderación es la variancia del error del equipo de medición.

$$\min J(x) = \sum_{i=1}^{N_m} \frac{[z_i^m - h_i(x)]^2}{\sigma_i^2} \quad (2.2)$$

donde:

$h_i$  valor estimado de la medición

$\sigma_i^2$  covariancia de la medición  $i$

$J(x)$  índice de funcionamiento

$N_m$  número de mediciones

$z_i^m$  cantidad medida  $i$ .

### 2.2.2 Formulación matricial

Si las funciones  $h_i(x_1, x_2, x_3, \dots, x_{N_s})$  son lineales, se pueden expresar en la forma siguiente:

$$h_i(x_1, x_2, x_3, \dots, x_{N_s}) = h_{i1}x_1 + h_{i2}x_2 + h_{i3}x_3 + \dots + h_{iN_s}x_{N_s} \quad (2.3)$$

y en forma matricial:

$$h(x) = [h_1(x) \quad h_2(x) \quad \dots \quad h_{N_m}(x)]^T = [H]x \quad (2.4) \text{ (R)}$$

donde:

$[H]$  matriz de dimensión  $N_m$  por  $N_s$  que contiene los coeficientes de la función

$N_s$  número variables de estado.

y el vector de mediciones:

$$z = [z_1^m \quad z_2^m \quad \dots \quad z_{N_m}^m]^T \quad (2.5)$$

la forma compacta de la Ec.(2.2) es:

$$\min J(x) = [z^m - h(x)]^T [R]^{-1} [z^m - h(x)] \quad (2.6)$$

donde:

$$[R] = \begin{bmatrix} \sigma_1^2 & & & \\ & \sigma_2^2 & & \\ & & \ddots & \\ & & & \sigma_{N_m}^2 \end{bmatrix}$$

es conocida como matriz de covariancia de las mediciones, una matriz de ponderación que modela los errores en equipos de medición.

Para el caso lineal la matriz  $[H]$  es igual a la matriz de primeras derivadas de  $[h]$ :

$$[H]_x = \begin{bmatrix} \frac{\partial h_1}{\partial x_1} & \frac{\partial h_1}{\partial x_2} & \dots & \frac{\partial h_1}{\partial x_{N_s}} \\ \frac{\partial h_2}{\partial x_1} & \frac{\partial h_2}{\partial x_2} & \dots & \frac{\partial h_2}{\partial x_{N_s}} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \frac{\partial h_{N_m}}{\partial x_1} & \frac{\partial h_{N_m}}{\partial x_2} & \dots & \frac{\partial h_{N_m}}{\partial x_{N_s}} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \\ \vdots \\ x_{N_s} \end{bmatrix} \quad (2.7)$$

si se sustituye la Ec. (2.7) en Ec. (2.6) se obtiene la función objetivo a minimizar:

$$\min J(x) = [z^m - Hx]^T [R]^{-1} [z^m - Hx] \quad (2.8)$$

al aplicar las reglas del álgebra lineal resulta la Ec. (2.9)

$$\min J(x) = z^{mT} R^{-1} z^m - x^T H^T R^{-1} z^{mT} + x^T H^T R^{-1} Hx - z^{mT} R^{-1} Hx \quad (2.9)$$

el mínimo de  $J(x)$  se obtiene cuando  $\frac{\partial J(x)}{\partial x} = 0$ , es decir, el gradiente de la función objetivo  $\nabla J(x) = 0$ . Se aplica este concepto a la Ec. (2.9) y se obtiene la ecuación general para estimación de estado lineal.

$$\nabla J(x) = -H^T R^{-1} z^m + H^T R^{-1} Hx = 0 \quad (2.10)$$

la estimación de las variables de estado se obtiene al resolver para  $x$  la ecuación resultante:

$$[H^T R^{-1} H] x = H^T R^{-1} z^m \quad (2.11)$$

la Ec. (2.11) es válida cuando el sistema es observable y la matriz  $[H^T R^{-1} H]$  es no singular.

### 2.2.3 Análisis y Resultados

Para visualizar y comprender mejor la estimación de estado lineal se presentan resultados de casos típicos y se comentan las ventajas y desventajas que presenta el modelo.

En la tabla 2.1 se presentan los resultados de la simulación para los casos: (1) todas las mediciones sin error (caso ideal); (2) todas las mediciones con error dentro del rango  $\pm 3\sigma$ ; (3) similar a (2) pero con la medición de flujo de potencia 1-2 invertida, para los tres casos se muestran los valores estimados de las variables de estado, los flujos entre líneas de potencia activa y las inyecciones de potencia activa.

En el sistema de la Fig. 2.1, se consideran mediciones de flujo de potencia activa en líneas y mediciones de inyección de potencia activa en generadores y cargas.

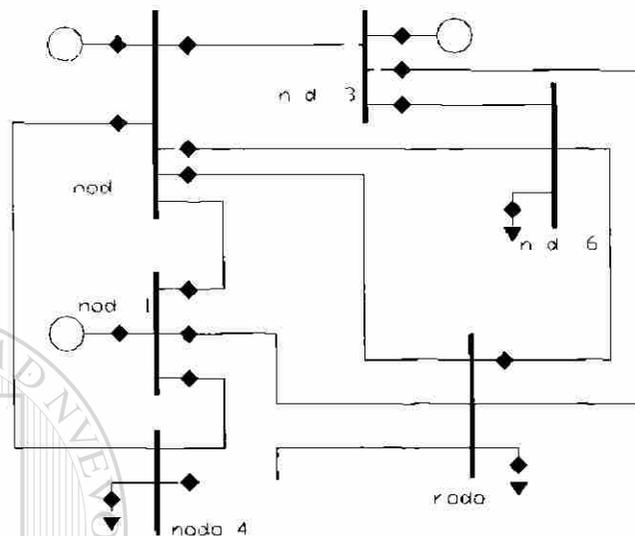


Fig. 2.1.- Sistema de prueba 1 para estimación lineal.

Tabla 2.1.- Tabla de resultados caso (1), caso (2) y caso (3).

Caso 1			Caso 2			Caso 3		
Nodo	Angulo estimado	Inyección de potencia	Nodo	Angulo estimado	Inyección de potencia	Nodo	Angulo estimado	Inyección de potencia
1	0.0000	1.0000	1	0.0000	1.0366	1	0.0000	0.8995
2	-0.0507	0.5000	2	-0.0536	0.4893	2	-0.0417	0.5623
3	-0.0553	0.6000	3	-0.0590	0.6005	3	-0.0445	0.6271
4	-0.0831	-0.7000	4	-0.0853	-0.7004	4	-0.0766	-0.6917
5	-0.0993	-0.7000	5	-0.1027	-0.7114	5	-0.0925	-0.7106
6	-0.1002	-0.7000	6	-0.1044	-0.7146	6	-0.0899	-0.6865
Flujos de potencia			Flujos de potencia			Flujos de potencia		
1-2	0.2533		1-2	0.2679		1-2	0.2084	
1-4	0.4157		1-4	0.4265		1-4	0.3828	
1-5	0.3310		1-5	0.3423		1-5	0.3083	
2-3	0.0185		2-3	0.0218		2-3	0.0114	
2-4	0.3248		2-4	0.3173		2-4	0.3488	
2-5	0.1622		2-5	0.1637		2-5	0.1694	
2-6	0.2478		2-6	0.2544		2-6	0.2412	
3-5	0.1693		3-5	0.1679		3-5	0.1845	
3-6	0.4492		3-6	0.4544		3-6	0.4540	
4-5	0.0404		4-5	0.0434		4-5	0.0398	
5-6	0.0030		5-6	0.0059		5-6	-0.0086	

Al existir una medición con error anormal (caso (3)) provoca que el estimado sea de mala calidad, por lo que es necesario aplicar alguna técnica para detectar la anomalía de la solución que es rápida y por tanto identificar la medición con error anormal. Estas características serán tratadas en el punto de estimación de estado no lineal. La desventaja del modelo lineal es que no representa de manera completa las variables de estado.

## 2.3 Estimación de estado no lineal

En un sistema eléctrico de potencia se requiere modelar el problema de manera completa. La no linealidad del problema está dada por las ecuaciones de potencia activa y reactiva en función de las variables de estado. El modelo que se presenta permite obtener los voltajes complejos de secuencia positiva de una red eléctrica, y considera que el sistema de potencia es balanceado. En este trabajo se utilizará el Método Newton-Raphson y una variante conocida como Método Desacoplado Rápido.

### 2.3.1 Estimador de estado no lineal por método Newton-Raphson

El modelo no lineal (versión CA) para estimación de estado emplea como variables de estado las magnitudes de voltaje y ángulos de fase de los nodos  $(|V|, \theta)$ , y como mediciones los flujos de potencia activa y reactiva en líneas de transmisión y transformadores de potencia, las mediciones de inyecciones de potencia activa y reactiva (generación y carga), y las mediciones de magnitud de voltaje. En todos los casos se incluyen errores en las mediciones, y se incluyen en la Ec. (2.1).

En el problema no lineal, las funciones  $h(x)$  que relacionan las mediciones a las variables de estado son no lineales. Para obtener la solución es necesario emplear métodos numéricos iterativos. El método más utilizado en sistemas de potencia para la solución de problemas no lineales es el Método Newton-Raphson. El algoritmo de solución transforma un problema no lineal en una secuencia de problemas lineales, las soluciones llevan en forma iterativa a la solución del problema original, cuando el proceso es convergente.

Para transformar la Ec. (2.1) en una ecuación lineal, se utiliza la expansión en series de Taylor alrededor de  $\hat{x}_k$ , la cual se expresa como:

$$z = h(\hat{x}_k) + v + \left. \frac{\partial h}{\partial x} \right|_{x=\hat{x}_k} \cdot (x - \hat{x}_k) + \text{términos de orden superior} \quad (2.12)$$

para simplificar las expresiones, se definen:

$$\Delta x_k = x - \hat{x}_k$$

$$\Delta z_k = z^m - h(\hat{x}_k)$$

$$H_k = \left. \frac{\partial h}{\partial x} \right|_{x=\hat{x}_k}$$

donde:

$k$  contador de iteraciones

$H_k$  matriz jacobiana de  $h(x)$  de dimensión  $N_m \times N_s$  que relaciona los cambios en las mediciones con los cambios en las variables de estado.

Ahora la Ec. (2.1) se puede expresar como:

$$\Delta z_k = H_k \Delta x_k + v \quad (2.13)$$

que al aplicar el método de mínimos cuadrados ponderados para minimizar  $J(x)$  se obtiene:

$$\min J(\Delta x) = [\Delta z_k^m - H_k \Delta x_k]^T [R]^{-1} [\Delta z_k^m - H_k \Delta x_k] \quad (2.14)$$

de donde se obtiene la ecuación general de estimación de estado para el caso no lineal.

$$\left[ H_k^T R^{-1} H_k \right] \Delta x_k = H_k^T R^{-1} \Delta z_k \quad (2.15)$$

con la estimación de los incrementos  $\Delta x_k$  se actualiza el valor de las variables de estado:

$$x_{k+1} = x_k + \Delta x_k \quad (2.16)$$

la solución iterativa de la Ec. (2.15) lleva a obtener la solución del problema si el proceso es convergente. El proceso de solución se detiene cuando los incrementos de la Ec. (2.16) son menores a cierta tolerancia especificada.

La Ec. (2.15) lleva a la solución si el sistema es observable y la matriz  $\left[ H_k^T R^{-1} H_k \right]$  es no singular.

La solución al problema de estimación de estado por el Método Newton-Raphson requiere en cada iteración la solución de un sistema sobredeterminado de ecuaciones lineales. Para esto se requiere valuar el jacobiano y realizar el cálculo de la matriz de ganancia  $\left[ G \right] = \left[ H^T R^{-1} H \right]$ , la cual es necesario factorizar (proceso de triangularización)

para calcular las correcciones de las variables de estado en cada iteración. Por este motivo se han buscado otros métodos que sean confiables en la búsqueda de la solución y que sean rápidos y eficientes desde el punto de vista computacional.

### 2.3.2 Estimador de estado no lineal por método Desacoplado Rápido

En los sistemas de potencia reales existe una fuerte dependencia entre la potencia activa y los ángulos de fase de los voltajes nodales, y también entre las potencias reactivas y las magnitudes de los voltajes. Por lo que se pueden establecer dos conjuntos de variables de estado: (i) magnitudes de voltaje ( $\Delta V$ ) y (ii) ángulos de fase de los voltajes ( $\Delta \theta$ ), de igual manera para las mediciones: (1) flujos e inyecciones de potencia

activa ( $z_A^m$ ) y (2) flujos e inyecciones de potencia reactiva y magnitudes de voltaje ( $z_R^m$ ).

### 2.3.2.1 Formulación desacoplada

Para obtener una formulación desacoplada para estimación de estado es necesario aplicar las consideraciones anteriores.

La Ec. (2.15) que se obtuvo por el Método Newton-Raphson se representa en forma completa como:

$$\begin{bmatrix} G_{AA} & G_{AR} \\ G_{AR}^T & G_{RR} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta\theta \\ \Delta V \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} T_A \\ T_R \end{bmatrix} \quad (2.17)$$

$$\begin{aligned} \theta_{k+1} &= \theta_k + \Delta\theta_k \\ V_{k+1} &= V_k + \Delta V_k \end{aligned} \quad (2.18)$$

donde:

$$G_{AA} = H_{AA}^T R_A^{-1} H_{AA} + H_{RA}^T R_R^{-1} H_{RA} \quad (2.19)$$

$$G_{RR} = H_{RR}^T R_R^{-1} H_{RR} + H_{AR}^T R_A^{-1} H_{AR} \quad (2.20)$$

$$G_{AR} = H_{AA}^T R_A^{-1} H_{AR} + H_{RA}^T R_R^{-1} H_{RR} \quad (2.21)$$

y el lado derecho de la ecuación:

$$T_A = H_{AA}^T R_A^{-1} \Delta z_A^m + H_{RA}^T R_R^{-1} \Delta z_R^m \quad (2.22)$$

$$T_R = H_{RR}^T R_R^{-1} \Delta z_R^m + H_{AR}^T R_A^{-1} \Delta z_A^m \quad (2.23)$$

Se toma como base la Ec.(2.17) y se aplican las simplificaciones, anteriormente mencionadas [2]:

1. Usar perfil plano de voltajes ( $V = 1.0, \theta = 0^\circ$ ) para calcular una matriz de ganancia constante.
2. Desacoplar la matriz de ganancia.

$$\begin{bmatrix} G_{AA} & 0 \\ 0 & G_{RR} \end{bmatrix} \quad (2.24)$$

3. Desacoplar la matriz jacobiana cuando se calcule la matriz de ganancia.

$$\begin{bmatrix} H_{AA} & 0 \\ 0 & H_{RR} \end{bmatrix} \quad (2.25)$$

se ignora la resistencia serie cuando se calcula la matriz  $H_{AA}$  para el cálculo de la matriz de ganancia:

$$G_{AA} = H_{AA}^T R_A^{-1} H_{AA} \quad (2.26) \quad \text{®}$$

$$G_{RR} = H_{RR}^T R_R^{-1} H_{RR} \quad (2.27)$$

4. Desacoplar la matriz jacobiana cuando se calcule el lado derecho de la ecuación, quedando expresado por:

$$T_A = H_{AA}^T R_A^{-1} \Delta z_A^m \quad (2.28)$$

$$T_R = H_{RR}^T R_R^{-1} \Delta z_R^m \quad (2.29)$$

5. Aplicar una transformación a las mediciones de potencia activa y potencia reactiva utilizando la magnitud de voltaje correspondiente:

$$\hat{z}_A = \begin{bmatrix} P_{km} / V_k^C \\ P_k / V_k^C \end{bmatrix} \quad (2.30)$$

$$\hat{z}_R = \begin{bmatrix} Q_{km} / V_k^C \\ Q_k / V_k^C \\ V_k \end{bmatrix} \quad (2.31)$$

donde  $V_k^C$  es la magnitud de voltaje calculado en el bus k.

Para obtener la solución estimada iterativa se sigue un procedimiento secuencial, establecido por el siguiente procedimiento:

1. Se obtiene la submatriz  $[H_{AA}]$  y se calcula la submatriz de ganancia  $G_{AA}$  para potencias activas mediante la Ec. (2.26).
2. Se obtiene la submatriz  $[H_{RR}]$  y se calcula la submatriz de ganancia  $G_{RR}$  para potencias reactivas y magnitudes de voltaje mediante la Ec. (2.27).
3. Se calcula el vector  $[T_A]$  de potencias activas del lado derecho de la ecuación mediante la Ec. (2.28).
4. Se obtiene la transformación en mediciones de potencia activa mediante la Ec. (2.30)
5. Se estiman los incrementos a las variables de estado ( $\theta$ ) mediante:

$$[G_{AA}][\Delta\theta_k] = [T_A]$$

6. Se obtienen los nuevos ángulos estimados mediante:

$$\theta_{k+1} = \theta_k + \Delta\theta_k$$

7. Con estos ángulos estimados se calcula el vector  $[T_R]$  de potencias reactivas y magnitudes de voltaje del lado derecho de la ecuación mediante la Ec. (2.29).
8. Se calcula la transformación en mediciones de potencia reactiva y magnitud de voltaje mediante la Ec. (2.31).
9. Se estiman los incrementos a las variables de estado ( $|V|$ ) mediante:

$$[G_{RR}][\Delta|V|_k] = [T_R]$$

10. Se obtienen los nuevos ángulos estimados mediante:

$$|V|_{k+1} = |V|_k + \Delta|V|_k$$

11. Si los incrementos ( $\Delta\theta < tol$  y  $\Delta|V| < tol$ ) el procedimiento se detiene, en caso contrario se regresa al paso 3, éste es un ciclo que termina cuando los incrementos son menores a una tolerancia establecida.

### 2.3.3 Análisis y resultados

Se presentan resultados con el método Newton-Raphson y método Desacoplado Rápido para analizar sus características particulares. En cada caso se incluye una introducción a la detección e identificación de errores, dejando para el capítulo V, un estudio completo de estas técnicas.

#### 2.3.3.1 Método Newton-Raphson

Para el sistema de la Fig. 2.1, se cuenta con mediciones de flujo de potencia activa y potencia reactiva en líneas, inyecciones de potencia activa y potencia reactiva en los nodos, y mediciones de magnitud de voltaje en los nodos. Se corre el estimador para los casos: (1) todas las mediciones sin error (caso ideal); (2) todas las mediciones tienen error dentro del rango  $\pm 3\sigma$ ; (3) similar a (2) pero con la medición de flujo de potencia activa y potencia reactiva de 1-2 invertida; (4) similar a (3) pero la medición invertida de 1-2 es eliminada.

Tabla 2.2.- Tabla de resultados caso (1) y caso (2) por Método Newton-Raphson.

Caso 1					Caso 2				
Valores estimados de las Variables de estado					Valores estimados de las Variables de estado				
N	V	A	Pne	Qne	N	V	A	Pne	Qne
1	1.0500	0.0000	1.0788	0.1596	1	1.0460	0.0000	1.1200	0.1879
2	1.0500	-0.0641	0.5000	0.7436	2	1.0424	-0.0669	0.4770	0.7024
3	1.0700	-0.0746	0.6000	0.8963	3	1.0634	-0.0782	0.5943	0.8761
4	0.9894	-0.0732	-0.7000	-0.7000	4	0.9827	-0.0756	-0.6969	-0.6999
5	0.9854	-0.0921	-0.7000	-0.7000	5	0.9787	-0.0966	-0.7239	-0.6961
6	1.0044	-0.1038	-0.7000	-0.7000	6	0.9996	-0.1077	-0.6903	-0.6596
Prueba de Hipótesis					Prueba de Hipótesis				
Factor J		Valor Xi2			Factor J		Valor Xi2		
0.0000		77.3633			39.9765		77.3633		
	Per	Pre	Qer	Qre		Per	Pre	Qer	Qre
1-2	0.2869	-0.2779	-0.1542	0.1282	1-2	0.3037	-0.2940	-0.1430	0.1190
1-4	0.4359	-0.4250	0.2012	-0.1993	1-4	0.4467	-0.4351	0.2119	-0.2066
1-5	0.3560	-0.3453	0.1126	-0.1345	1-5	0.3696	-0.3579	0.1191	-0.1369
2-3	0.0293	-0.0289	-0.1227	0.0573	2-3	0.0317	-0.0312	-0.1259	0.0616
2-4	0.3309	-0.3158	0.4605	-0.4512	2-4	0.3208	-0.3062	0.4515	-0.4429
2-5	0.1552	-0.1502	0.1535	-0.1801	2-5	0.1578	-0.1528	0.1486	-0.1746
2-6	0.2625	-0.2567	0.1240	-0.1601	2-6	0.2606	-0.2551	0.1092	-0.1454
3-5	0.1912	-0.1802	0.2317	-0.2609	3-5	0.1925	-0.1815	0.2298	-0.2581
3-6	0.4377	-0.4277	0.6072	-0.5786	3-6	0.4330	-0.4234	0.5847	-0.5580
4-5	0.0408	-0.0405	-0.0494	-0.0279	4-5	0.0445	-0.0440	-0.0505	-0.0256
5-6	0.0161	-0.0156	-0.0966	0.0387	5-6	0.0124	-0.0118	-0.1008	0.0438

Tabla 2.3.- Tabla de resultados caso (3) y caso (4) por Método Newton-Raphson.

Caso 3					Caso 4				
Valores estimados de las Variables de estado					Valores estimados de las Variables de estado				
N	V	A	Pne	Qne	N	V	A	Pne	Qne
1	1.0459	0.0000	0.9932	0.2208	1	1.0458	0.0000	1.1179	0.1856
2	1.0427	-0.0551	0.5461	0.6704	2	1.0425	-0.0668	0.4783	0.7036
3	1.0631	-0.0647	0.6137	0.8655	3	1.0635	-0.0781	0.5947	0.8763
4	0.9829	-0.0671	-0.6844	-0.6982	4	0.9827	-0.0756	-0.6968	-0.6996
5	0.9786	-0.0870	-0.7240	-0.6952	5	0.9787	-0.0965	-0.7240	-0.6961
6	0.9993	-0.0941	-0.6702	-0.6699	6	0.9997	-0.1076	-0.6899	-0.6593
Prueba de Hipótesis					Prueba de Hipótesis				
Factor J		Valor Xi2			Factor J		Valor Xi2		
207.5679		77.3633			39.8688		74.9153		
	Per	Pre	Qer	Qre		Per	Pre	Qer	Qre
1-2	0.2503	-0.2437	-0.1218	0.0914	1-2	0.3027	-0.2930	-0.1439	0.1198
1-4	0.4044	-0.3943	0.2182	-0.2190	1-4	0.4461	-0.4345	0.2110	-0.2059
1-5	0.3384	-0.3282	0.1244	-0.1478	1-5	0.3691	-0.3574	0.1184	-0.1364
2-3	0.0244	-0.0240	-0.1223	0.0578	2-3	0.0316	-0.0311	-0.1260	0.0617
2-4	0.3477	-0.3328	0.4394	-0.4301	2-4	0.3213	-0.3067	0.4520	-0.4433
2-5	0.1650	-0.1598	0.1476	-0.1730	2-5	0.1579	-0.1529	0.1488	-0.1748
2-6	0.2528	-0.2474	0.1144	-0.1511	2-6	0.2605	-0.2549	0.1091	-0.1453
3-5	0.2055	-0.1943	0.2231	-0.2511	3-5	0.1928	-0.1818	0.2300	-0.2583
3-6	0.4322	-0.4226	0.5846	-0.5579	3-6	0.4330	-0.4234	0.5847	-0.5580
4-5	0.0428	-0.0424	-0.0491	-0.0271	4-5	0.0444	-0.0440	-0.0505	-0.0256
5-6	0.0007	-0.0002	-0.0963	0.0391	5-6	0.0122	-0.0116	-0.1010	0.0440

Para el caso (1) el índice  $J(x)$  es cero, debido a que las mediciones que se usan dentro del proceso de estimación no contienen error (mediciones exactas), esto indica que las variables de estado estimadas también son exactas (caso ideal). Para el caso (2), donde las mediciones tienen un error dentro del rango  $\pm 3\sigma$ , y como resultado el índice  $J(x)$  es mayor que cero, volviéndose necesario contar con técnicas que permitan detectar e identificar mediciones con error anormal. El índice  $J(x)$  permite detectar la presencia de mediciones anormales cuando es comparado con el valor de la distribución chi-cuadrada  $x_i^2$  para el número de grados de libertad del problema y el nivel de confianza especificado, si  $J(x) < \text{valor } x_i^2$  el estimado se acepta de lo contrario se rechaza. Al tomar en cuenta esta consideración la estimación del caso (2) es aceptada. Sin embargo para el caso (3), donde hay presencia de mediciones con error anormal, al encontrarse invertida una medición de potencia activa y una medición de potencia reactiva, el índice  $J(x)$  presenta una desviación muy grande con respecto al caso base ideal. En este caso es necesario identificar las mediciones anormales que es necesario eliminar del proceso de estimación. Cuando ambas mediciones son eliminadas (caso (4)), se observa que el índice  $J(x)$  reduce su desviación con respecto al caso base ideal por lo que la estimación de las variables de estado se acepta.

Al analizar los resultados se observa que entre mayor número de mediciones con error anormal se encuentren dentro del proceso de estimación mayor será la desviación del índice  $J(x)$  con respecto al caso base ideal. Por lo que en sistemas de potencia reales esta consideración se vuelve muy importante.

Tabla 2.4.- Tabla de convergencia para el Método Newton-Raphson.

	Iteraciones	$\sum P_{Nodales}$	$\sum Q_{Nodales}$
Caso 1	3	0.0788	-0.3006
Caso 2	3	0.0802	-0.2893
Caso 3	3	0.0744	-0.3066
Caso 4	3	0.0802	-0.2896

### 2.3.3.2 Método Desacoplado Rápido

De igual manera tomando como base el sistema de la Fig. 2.1, se emplea el Método Desacoplado Rápido para resolver el problema de estimación de estado.

Tabla 2.5.- Tabla de resultados caso (1) y caso (2) por Método Desacoplado Rápido.

Caso 1					Caso 2				
Valores estimados de las Variables de estado					Valores estimados de las Variables de estado				
N	V	A	Pne	Qne	N	V	A	Pne	Qne
1	1.0500	0.0000	1.0788	0.1596	1	1.0461	0.0000	1.1219	0.1843
2	1.0500	-0.0641	0.5000	0.7436	2	1.0428	-0.0671	0.4754	0.7053
3	1.0700	-0.0746	0.6000	0.8963	3	1.0636	-0.0782	0.5957	0.8732
4	0.9894	-0.0732	-0.7000	-0.7000	4	0.9832	-0.0758	-0.6983	-0.6982
5	0.9854	-0.0921	-0.7000	-0.7000	5	0.9791	-0.0967	-0.7238	-0.6952
6	1.0044	-0.1038	-0.7000	-0.7000	6	0.9999	-0.1078	-0.6907	-0.6591
Prueba de Hipótesis					Prueba de Hipótesis				
Factor J		Valor Xi2			Factor J		Valor Xi2		
0.0000		77.3633			40.0500		77.3633		
	Per	Pre	Qer	Qre		Per	Pre	Qer	Qre
1-2	0.2869	-0.2779	-0.1542	0.1282	1-2	0.3043	-0.2945	-0.1445	0.1205
1-4	0.4359	-0.4250	0.2012	-0.1993	1-4	0.4478	-0.4361	0.2104	-0.2051
1-5	0.3560	-0.3453	0.1126	-0.1345	1-5	0.3698	-0.3582	0.1183	-0.1361
2-3	0.0293	-0.0289	-0.1227	0.0573	2-3	0.0310	-0.0306	-0.1251	0.0607
2-4	0.3309	-0.3158	0.4605	-0.4512	2-4	0.3210	-0.3065	0.4514	-0.4428
2-5	0.1552	-0.1502	0.1535	-0.1801	2-5	0.1575	-0.1526	0.1488	-0.1749
2-6	0.2625	-0.2567	0.1240	-0.1601	2-6	0.2603	-0.2548	0.1097	-0.1460
3-5	0.1912	-0.1802	0.2317	-0.2609	3-5	0.1926	-0.1816	0.2291	-0.2576
3-6	0.4377	-0.4277	0.6072	-0.5786	3-6	0.4336	-0.4241	0.5834	-0.5568
4-5	0.0408	-0.0405	-0.0494	-0.0279	4-5	0.0443	-0.0439	-0.0503	-0.0259
5-6	0.0161	-0.0156	-0.0966	0.0387	5-6	0.0124	-0.0119	-0.1007	0.0437

Tabla 2.6.- Tabla de resultados caso (3) y caso (4) por Método Desacoplado Rápido.

Caso 3					Caso 4				
Valores estimados de las Variables de estado					Valores estimados de las Variables de estado				
N	V	A	Pne	Qne	N	V	A	Pne	Qne
1	1.0464	0.0000	0.9996	0.2254	1	1.0459	0.0000	1.1197	0.1819
2	1.0428	-0.0555	0.5434	0.6743	2	1.0429	-0.0670	0.4767	0.7067
3	1.0631	-0.0650	0.6144	0.8640	3	1.0637	-0.0781	0.5960	0.8735
4	0.9827	-0.0674	-0.6868	-0.7036	4	0.9831	-0.0758	-0.6981	-0.6981
5	0.9786	-0.0873	-0.7238	-0.6973	5	0.9791	-0.0966	-0.7238	-0.6953
6	0.9994	-0.0946	-0.6718	-0.6681	6	1.0000	-0.1077	-0.6904	-0.6588
Prueba de Hipótesis					Prueba de Hipótesis				
Factor J		Valor Xi2			Factor J		Valor Xi2		
207.6503		77.3633			39.8954		74.9153		
	Per	Pre	Qer	Qre		Per	Pre	Qer	Qre
1-2	0.2531	-0.2463	-0.1214	0.0912	1-2	0.3033	-0.2935	-0.1454	0.1213
1-4	0.4068	-0.3965	0.2211	-0.2213	1-4	0.4470	-0.4355	0.2096	-0.2045
1-5	0.3398	-0.3295	0.1257	-0.1488	1-5	0.3693	-0.3577	0.1177	-0.1357
2-3	0.0242	-0.0239	-0.1219	0.0573	2-3	0.0309	-0.0305	-0.1252	0.0608
2-4	0.3478	-0.3328	0.4425	-0.4330	2-4	0.3215	-0.3069	0.4520	-0.4433
2-5	0.1646	-0.1594	0.1481	-0.1736	2-5	0.1576	-0.1527	0.1490	-0.1750
2-6	0.2530	-0.2476	0.1143	-0.1510	2-6	0.2602	-0.2546	0.1096	-0.1459

Tabla 2.6.- Continuación

3-5	0.2051	-0.1939	0.2233	-0.2513	3-5	0.1929	-0.1819	0.2293	-0.2578
3-6	0.4331	-0.4235	0.5834	-0.5568	3-6	0.4336	-0.4241	0.5834	-0.5568
4-5	0.0425	-0.0421	-0.0494	-0.0267	4-5	0.0443	-0.0438	-0.0503	-0.0258
5-6	0.0012	-0.0007	-0.0969	0.0396	5-6	0.0122	-0.0117	-0.1010	0.0439

En el método Desacoplado Rápido también se presenta la desviación del índice  $J(x)$  con respecto al caso base ideal cuando hay presencia de mediciones con error anormal, esta desviación sería cero en el caso de emplear mediciones exactas dentro del proceso de estimación de estado (caso (1)). El estimado de las variables de estado se acepta una vez que las mediciones con error anormal son eliminadas.

Las soluciones que presentan el método Newton-Raphson y el método Desacoplado Rápido son aceptables, aún y cuando los resultados no son idénticos pero si parecidos ambos estimadores son confiables para su aplicación práctica

Tabla 2.7.- Tabla de convergencia para el Método Desacoplado Rápido.

	Iteraciones	$\sum P_{Nodales}$	$\sum Q_{Nodales}$
Caso 1	5	0.0788	-0.3006
Caso 2	5	0.0802	-0.2898
Caso 3	4	0.0749	-0.3054
Caso 4	5	0.0801	-0.2900

Esto se debe principalmente a la utilización de los modelos activo y reactivo en el Método Desacoplado Rápido, al criterio de convergencia en ambos estimadores y al desacoplamiento de variables de estado y mediciones que presenta el Método Desacoplado Rápido.

#### 2.4 Estimación de estado con error anormal en parámetros de líneas de transmisión y transformadores de potencia

En esta sección se analiza el problema que causa al estimador de estado convencional que utiliza el Método Newton-Raphson o el Método Desacoplado Rápido un error anormal en el parámetro de líneas de transmisión.

### 2.4.1 Método Newton-Raphson

Para el sistema de la Fig. 2.1, con mediciones de flujo de potencia activa y potencia reactiva en líneas, inyecciones de potencia activa y potencia reactiva en los nodos y mediciones de magnitud de voltaje en los nodos. Se presenta la estimación para los casos: (1) errores aleatorios en mediciones dentro del rango  $\pm 3\sigma$  y errores en parámetros de la línea 1-4 y 3-6 del 50% superior a su valor de impedancia original, (2) similar a (1) pero con error del 100% superior a su valor de impedancia, (3) similar a (1) pero con error del 50% inferior a su valor de impedancia original, (4) similar a (1) pero sólo con error de parámetro en la línea 1-4 del 50% inferior a su valor de impedancia original.

Tabla 2.8.- Tabla de resultados caso (1) y caso (2) por Método Newton-Raphson.

Caso 1					Caso 2				
Valores estimados de las Variables de estado					Valores estimados de las Variables de estado				
N	V	A	Pne	Qne	N	V	A	Pne	Qne
1	1.0539	0.0000	1.1205	0.1773	1	1.0585	0.0000	1.1064	0.1608
2	1.0412	-0.0757	0.4693	0.6977	2	1.0404	-0.0804	0.4668	0.6939
3	1.0740	-0.0822	0.6010	0.8934	3	1.0819	-0.0836	0.5980	0.8936
4	0.9773	-0.0892	-0.6770	-0.6885	4	0.9742	-0.0965	-0.6527	-0.6803
5	0.9797	-0.1034	-0.7204	-0.6936	5	0.9801	-0.1070	-0.7190	-0.6933
6	0.9881	-0.1208	-0.6997	-0.6694	6	0.9795	-0.1286	-0.6974	-0.6674
Prueba de Hipótesis					Prueba de Hipótesis				
Factor J		Valor Xi2			Factor J		Valor Xi2		
51.3559		77.3633			95.5451		77.3633		
	Per	Pre	Qer	Qre		Per	Pre	Qer	Qre
1-2	0.3650	-0.3521	-0.1223	0.1042	1-2	0.3990	-0.3842	-0.1085	0.0942
1-4	0.3543	-0.3432	0.1607	-0.1786	1-4	0.2890	-0.2791	0.1180	-0.1615
1-5	0.4012	-0.3875	0.1388	-0.1495	1-5	0.4184	-0.4035	0.1512	-0.1576
2-3	0.0016	-0.0007	-0.1692	0.1064	2-3	-0.0194	0.0208	-0.2013	0.1403
2-4	0.3760	-0.3589	0.4674	-0.4537	2-4	0.4065	-0.3879	0.4763	-0.4594
2-5	0.1493	-0.1447	0.1435	-0.1707	2-5	0.1444	-0.1401	0.1407	-0.1685
2-6	0.2946	-0.2869	0.1517	-0.1813	2-6	0.3194	-0.3100	0.1840	-0.2079
3-5	0.2195	-0.2057	0.2604	-0.2835	3-5	0.2403	-0.2243	0.2847	-0.3033
3-6	0.3822	-0.3707	0.5266	-0.5011	3-6	0.3369	-0.3248	0.4686	-0.4504
4-5	0.0251	-0.0249	-0.0562	-0.0200	4-5	0.0144	-0.0142	-0.0594	-0.0168
5-6	0.0425	-0.0421	-0.0700	0.0130	5-6	0.0631	-0.0626	-0.0472	-0.0090

En general un error de parámetro en líneas de transmisión o transformadores de potencia afecta la estimación de estado. El grado de afectación depende básicamente de dos condiciones: (1) la cantidad de flujo que transporta la línea de transmisión o transformador de potencia y, (2) de la magnitud del error en el parámetro de la línea de transmisión o transformador de potencia. Esto significa que una línea de transmisión que

transporta poco flujo de potencia no afecta demasiado al índice  $J(x)$  como el caso donde la línea de transmisión transporta mucho flujo de potencia, para la misma magnitud de error de parámetro. El caso más crítico se tiene cuando el error de parámetro es grande y el flujo de potencia en la línea o transformadores grande. En todos los casos el índice  $J(x)$  se afecta.

Para un sistema observable con baja redundancia el problema es diferente, si el error de parámetro se tiene en una línea o transformador que no tiene medición de flujo de potencia activa y potencia reactiva, o en la medición de inyección de potencia o en la medición de magnitud de voltaje, no se utilizara en la formación del jacobiano y por lo tanto no entra en el proceso de estimación de estado, aunque los nodos que la componen si son tomados en cuenta para el proceso. Lo anterior indica que un error de parámetro muy grande no afecta al índice  $J(x)$  y a la prueba de identificación de errores. Pero si afecta al momento de estimar el flujo por esa línea o transformador y en la inyección de potencia ya que dará un valor incorrecto provocado por el error de parámetro.

Tabla 2.9.- Tabla de resultados caso (3) y caso (4) por Método Newton-Raphson.

Caso 3					Caso 4				
Valores estimados de las Variables de estado					Valores estimados de las Variables de estado				
N	V	A	Pne	Qne	N	V	A	Pne	Qne
1	1.0320	0.0000	1.0617	0.1747	1	1.0319	0.0000	1.0618	0.1744
2	1.0447	-0.0488	0.4990	0.7097	2	1.0444	-0.0491	0.5006	0.7074
3	1.0499	-0.0673	0.5718	0.8300	3	1.0644	-0.0610	0.6012	0.8762
4	0.9929	-0.0487	-0.6820	-0.7070	4	0.9928	-0.0488	-0.6821	-0.7076
5	0.9771	-0.0823	-0.7318	-0.7013	5	0.9777	-0.0817	-0.7297	-0.6946
6	1.0150	-0.0841	-0.6588	-0.6275	6	1.0007	-0.0903	-0.6834	-0.6583
Prueba de Hipótesis					Prueba de Hipótesis				
Factor J		Valor Xi2			Factor J		Valor Xi2		
126.4165		77.3633			97.7185		77.3633		
	Per	Pre	Qer	Qre		Per	Pre	Qer	Qre
1-2	0.1866	-0.1811	-0.1741	0.1419	1-2	0.1882	-0.1827	-0.1733	0.1412
1-4	0.5674	-0.5581	0.2626	-0.2459	1-4	0.5681	-0.5588	0.2633	-0.2465
1-5	0.3077	-0.2996	0.0862	-0.1162	1-5	0.3055	-0.2975	0.0844	-0.1149
2-3	0.0742	-0.0739	-0.0683	0.0040	2-3	0.0350	-0.0346	-0.1230	0.0584
2-4	0.2160	-0.2052	0.4225	-0.4217	2-4	0.2134	-0.2028	0.4214	-0.4208
2-5	0.1738	-0.1680	0.1578	-0.1815	2-5	0.1702	-0.1647	0.1555	-0.1798
2-6	0.2162	-0.2127	0.0558	-0.0991	2-6	0.2646	-0.2589	0.1124	-0.1483
3-5	0.1606	-0.1526	0.1927	-0.2266	3-5	0.2038	-0.1922	0.2335	-0.2605
3-6	0.4850	-0.4792	0.6333	-0.6148	3-6	0.4319	-0.4223	0.5843	-0.5578
4-5	0.0814	-0.0800	-0.0394	-0.0355	4-5	0.0794	-0.0781	-0.0403	-0.0348
5-6	-0.0316	0.0331	-0.1415	0.0863	5-6	0.0028	-0.0022	-0.1047	0.0478

Para el caso (1) solamente se afecta el índice  $J(x)$  pero el estimado se acepta, en los casos (2), (3) y (4) se afecta el índice  $J(x)$  y la prueba de identificación de errores, esto indica que se tienen errores anormales en mediciones cercanas a la línea con error de parámetro.

En el caso (4) se tiene una condición especial, debido a que si se cuenta con una línea o transformador con un valor de impedancia inferior a su valor original afecta en mayor medida que cuando se tiene un valor de impedancia superior al valor original para el mismo porcentaje de error.

#### 2.4.2 Método Desacoplado Rápido

Se corre el estimador convencional por el Método Desacoplado Rápido para los casos mencionados en el punto anterior, aplicando en cada uno de ellos la prueba de detección e identificación de errores anormales en mediciones.

Tabla 2.10.- Tabla de resultados caso (1) y caso (2) por Método Desacoplado Rápido.

Caso 1					Caso 2				
Valores estimados de las Variables de estado					Valores estimados de las Variables de estado				
N	V	A	Pne	Qne	N	V	A	Pne	Qne
1	1.0540	0.0000	1.1205	0.1788	1	1.0549	0.0000	1.0994	0.1753
2	1.0413	-0.0758	0.4644	0.7026	2	1.0408	-0.0844	0.4576	0.7050
3	1.0741	-0.0819	0.6024	0.8922	3	1.0822	-0.0870	0.5982	0.8953
4	0.9771	-0.0891	-0.6772	-0.6939	4	0.9763	-0.1021	-0.6506	-0.7035
5	0.9798	-0.1033	-0.7205	-0.6926	5	0.9799	-0.1100	-0.7197	-0.6922
6	0.9882	-0.1204	-0.6960	-0.6704	6	0.9798	-0.1316	-0.6911	-0.6685
Prueba de Hipótesis					Prueba de Hipótesis				
Factor J		Valor $\chi^2$			Factor J		Valor $\chi^2$		
51.4179		77.3633			97.4409		77.3633		
	Per	Pre	Qer	Qre		Per	Pre	Qer	Qre
1-2	0.3655	-0.3525	-0.1223	0.1042	1-2	0.4076	-0.3916	0.1323	0.1204
1-4	0.3542	-0.3431	0.1621	-0.1799	1-4	0.2677	-0.2667	0.1696	-0.2100
1-5	0.4009	-0.3872	0.1390	-0.1497	1-5	0.4241	-0.4090	0.1380	0.1438
2-3	-0.0001	0.0009	-0.1687	0.1059	2-3	-0.0218	0.0232	-0.2005	0.1395
2-4	0.3760	-0.3588	0.4712	-0.4571	2-4	0.4135	-0.3955	0.4562	-0.4406
2-5	0.1487	-0.1441	0.1437	-0.1709	2-5	0.1422	-0.1378	0.1433	-0.1710
2-6	0.2923	-0.2847	0.1523	-0.1821	2-6	0.3153	-0.3060	0.1856	-0.210
3-5	0.2200	-0.2063	0.2600	-0.2831	3-5	0.2399	-0.2238	0.2869	-0.3052
3-6	0.3815	-0.3700	0.5264	-0.5010	3-6	0.3351	-0.3230	0.4689	0.4509
4-5	0.0247	-0.0245	-0.0569	-0.0193	4-5	0.0116	-0.0115	0.0529	-0.0235
5-6	0.0416	-0.0413	-0.0697	0.0127	5-6	0.0625	-0.0621	-0.0486	-0.0076

Tabla 2.11.- Tabla de resultados caso (3) y caso (4) por Método Desacoplado Rápido.

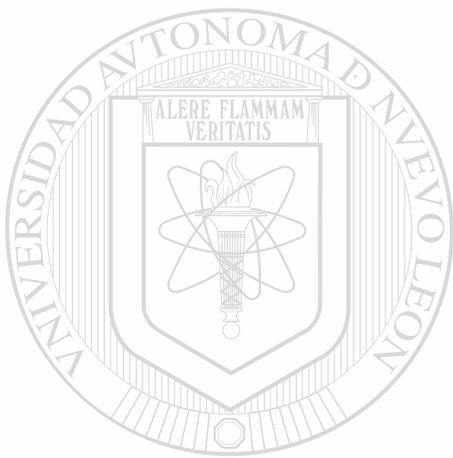
Caso 3					Caso 4				
Valores estimados de las Variables de estado					Valores estimados de las Variables de estado				
N	V	A	Pne	Qne	N	V	A	Pne	Qne
1	1.0322	0.0000	1.0645	0.1651	1	1.0322	0.0000	1.0635	0.1655
2	1.0453	-0.0489	0.5027	0.7091	2	1.0450	-0.0491	0.5009	0.7095
3	1.0501	-0.0675	0.5720	0.8265	3	1.0646	-0.0607	0.6026	0.8734
4	0.9939	-0.0491	-0.6864	-0.6944	4	0.9937	-0.0492	-0.6877	-0.6940
5	0.9775	-0.0823	-0.7306	-0.7023	5	0.9779	-0.0814	-0.7273	-0.6991
6	1.0153	-0.0843	-0.6626	-0.6263	6	1.0011	-0.0901	-0.6837	-0.6588
Prueba de Hipótesis					Prueba de Hipótesis				
Factor J		Valor Xi2			Factor J		Valor Xi2		
126.6296		77.3633			97.9456		77.3633		
	Per	Pre	Qer	Qre		Per	Pre	Qer	Qre
1-2	0.1864	-0.1809	-0.1755	0.1434	1-2	0.1878	-0.1823	-0.1748	0.1427
1-4	0.5703	-0.5610	0.2551	-0.2385	1-4	0.5711	-0.5617	0.2557	-0.2390
1-5	0.3679	-0.2997	0.0856	-0.1156	1-5	0.3046	-0.2966	0.0846	-0.1153
2-3	0.0749	-0.0746	-0.0672	0.0029	2-3	0.0340	-0.0336	-0.1213	0.0566
2-4	0.2172	-0.2067	0.4181	-0.4177	2-4	0.2153	-0.2048	0.4170	-0.4168
2-5	0.1739	-0.1682	0.1582	-0.1820	2-5	0.1697	-0.1641	0.1570	-0.1813
2-6	0.2176	-0.2141	0.0566	-0.0997	2-6	0.2641	-0.2584	0.1141	-0.1500
3-5	0.1600	-0.1519	0.1923	-0.2263	3-5	0.2037	-0.1921	0.2335	-0.2605
3-6	0.4866	-0.4808	0.6313	-0.6129	3-6	0.4325	-0.4229	0.5832	-0.5569
4-5	0.0812	-0.0799	-0.0382	-0.0369	4-5	0.0788	-0.0775	-0.0383	-0.0369
5-6	-0.0309	0.0323	-0.1415	0.0862	5-6	0.0030	-0.0024	-0.1051	0.0482

El comportamiento del estimador por Método Desacoplado Rápido es similar al Método Newton-Raphson, por lo que las condiciones mencionadas en el punto anterior son aplicables a éste método.

En todos los casos que se analizaron se consideró un error de parámetro con valor de impedancia superior o inferior al valor original. Y en estos casos el estimador de estado convencional y el estimador de estado por descomposición ortogonal presentan una solución idéntica que es aceptable, tanto en el método Newton-Raphson como en el método Desacoplado Rápido.

Cuando la impedancia de la línea de transmisión o transformador de potencia se considera muy pequeña el estimador convencional tiene problemas para presentar una solución de las variables de estado, a diferencia del estimador por descomposición ortogonal presenta una solución que no es aceptable en la mayoría de los casos, ya que la solución se presenta debido a la transformación ortogonal que tiene el problema.

Cuando se tienen impedancias con este valor el estimado es de mala calidad en todos los casos, por lo que es necesario tener revisión continua en la base de datos que da la conectividad y valores de impedancia de la red eléctrica.



# UANL

---

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN



DIRECCIÓN GENERAL DE BIBLIOTECAS

# CAPITULO III

## APLICACIÓN DE LA DESCOMPOSICION ORTOGONAL EN LA ESTIMACION DE ESTADO

### 3.1 Introducción

En la aplicación del método de mínimos cuadrados ponderados en la estimación de estado convencional se han detectado dificultades numéricas para resolver algunos casos especiales que se presentan en un sistema eléctrico de potencia. Uno de éstos casos es combinación de mediciones muy precisas con mediciones convencionales.

#### DIRECCIÓN GENERAL DE BIBLIOTECAS

En el desarrollo del capítulo se presentan dos alternativas de solución: (i) la aplicación de la descomposición ortogonal y (ii) la formulación del problema de estimación de estado con restricciones de igualdad. En éste capítulo el análisis se hace con el estimador lineal aplicando ambas técnicas. Posteriormente se aplica la técnica por descomposición ortogonal para estimación de estado no lineal, además se presentan sus consideraciones y restricciones, técnicas de detección e identificación de errores como medio para validar la información, así como los métodos de solución más adecuados y eficientes.

### 3.1 Estimación de estado por descomposición ortogonal

El caso de una medición con alta precisión se ilustra en el circuito de la figura 3.1, se muestran los flujos e inyecciones actuales así como los valores asumidos para las mediciones.

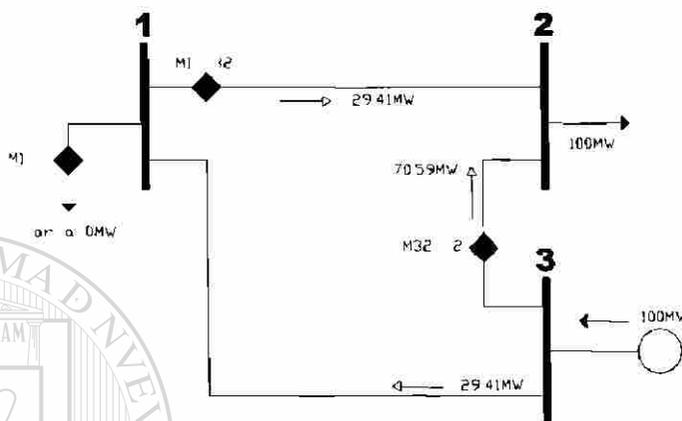


Figura 3.1.- Sistema con inyección cero.

La medición de potencia en el nodo 1 es cero debido a que no cuenta con generación o carga, entonces se conoce con certeza que su valor es 0 MW. El error en la medición para este tipo de inyecciones es cero. Al realizar la estimación del sistema especificando una variancia para la medición M1 de  $\sigma_{M1} = 10^{-2}$ , se obtienen los siguientes resultados:

Se observa que el valor estimado de potencia para el nodo 1 no es cero, sino  $P_{10} = 0.82 MW$ , el estimador no ha forzado la inyección del nodo a cero. Esto podría verse como un error aceptable, sin embargo, en un sistema con varios nodos con inyección cero el error sería mayor.

Una posible solución a éste problema es modelar la variancia del error de ésta inyección con valor muy pequeño y repetir el proceso de estimación. El problema que se presenta es el siguiente: si se asume la variancia del nodo con inyección cero como  $\sigma_{M1} = 10^{-10}$ , se esperaría tener un mejor ajuste en la inyección al aumentar la ponderación  $\left(\frac{1}{\sigma^2}\right)$  de esta medición. Sin embargo, en este caso la matriz de ganancia  $[G] = [H^T R^{-1} H]$  resulta ser casi singular, debido a

que los términos de la matriz  $[G]$  están dominados por los términos que son multiplicados por

$$\sigma^2 = 10^{-20}.$$

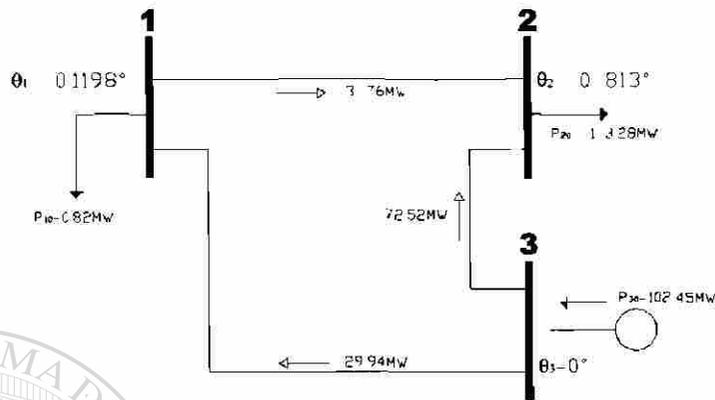


Fig. 3.2.- Valores estimados para sistema con inyección cero (estimador convencional).

Las matrices en este caso serían:

$$[H] = \begin{bmatrix} 5.0 & -5.0 \\ 0 & -4.0 \\ 7.5 & -5.0 \end{bmatrix}$$

$$[R] = \begin{bmatrix} 10^{-4} & & \\ & 10^{-4} & \\ & & 10^{-20} \end{bmatrix}$$

$$[G] = [H^T R^{-1} H] = \begin{bmatrix} 56.25 \times 10^{20} & -37.5 \times 10^{20} \\ -37.5 \times 10^{20} & 25.0 \times 10^{20} \end{bmatrix}$$

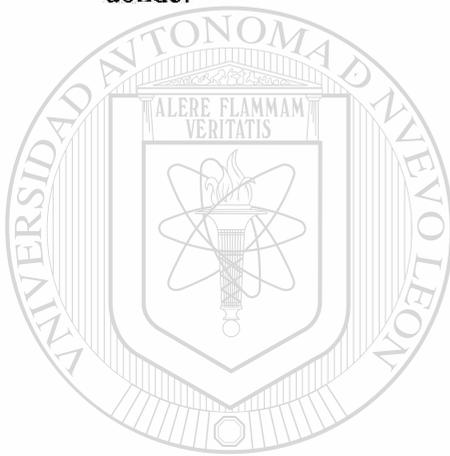
La solución a éste problema es emplear otro algoritmo para eliminar ésta situación indeseable en el proceso de cálculo.

### 3.2.1 Estimador lineal por descomposición ortogonal [9,10,11]

La idea principal del algoritmo por descomposición ortogonal es tomar la Ec. (2.13) obtenida aplicando el método de mínimos cuadrados ponderados y transformar la matriz  $[R^{-1}]$  en dos submatrices:

$$[R^{-1}] = [R^{-1/2}][R^{-1/2}] \quad (3.1)$$

donde:



$$[R^{-1/2}] = \begin{bmatrix} \frac{1}{\sigma_1} & & & \\ & \frac{1}{\sigma_2} & & \\ & & \ddots & \\ & & & \frac{1}{\sigma_{N_m}} \end{bmatrix} \quad (3.2)$$

aplicando la Ec. (3.2) en la matriz de ganancia se tiene:

$$[H^T R^{-1} H] = [H^T R^{-1/2} R^{-1/2} H] = [H'^T H'] \quad (3.3) \text{ ®}$$

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN  
DIRECCIÓN GENERAL DE BIBLIOTECAS

definiendo:

$$[H'] = [R^{-1/2}][H] \quad (3.4)$$

finalmente la Ec. (2.13) tiene la forma:

$$[H'^T H'] x = [H'^T] z'^m \quad (3.5)$$

donde:

$$z'^m = [R^{-1/2}] z^m \quad (3.6)$$

la idea fundamental del algoritmo por descomposición ortogonal es encontrar las matrices  $[Q]$  y  $[U]$  tal que:

$$[H] = [Q][U] \quad (3.7)$$

donde la matriz  $[Q]$  es ortogonal y tiene la siguiente propiedad especial:

$$[Q^T][Q] = [I] \quad (3.8)$$

siendo  $[I]$  la matriz identidad, y la matriz  $[U]$  es triangular superior en su estructura.

De esta forma  $[H]$  es en general una matriz no cuadrada y  $[U]$  deberá ser no cuadrada, logrando la estructura:

$$[H] = \begin{bmatrix} h_{11} & h_{12} & \dots & h_{1N_s} \\ h_{21} & h_{22} & \dots & h_{2N_s} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ h_{N_m1} & h_{N_m2} & \dots & h_{N_mN_s} \end{bmatrix} = [Q][U] =$$

$$\begin{bmatrix} q_{11} & q_{12} & \dots & q_{1N_m} \\ q_{21} & q_{22} & \dots & q_{2N_m} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ q_{N_m1} & q_{N_m2} & \dots & q_{N_mN_m} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} u_{11} & u_{12} & \dots & u_{1N_s} \\ 0 & u_{22} & \dots & u_{2N_s} \\ 0 & 0 & \ddots & \vdots \\ 0 & 0 & 0 & u_{N_sN_s} \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (3.9)$$

donde:

$[H'] =$  Matriz de dimensión  $N_m \times N_s$

$[Q] =$  matriz ortogonal de dimensión  $N_m \times N_m$

$[U] =$  matriz triangular superior de dimensión  $N_m \times N_s$

si se sustituye  $[Q][U]$  por  $[H']$  en la Ec. (3.5):

$$[U^T Q^T Q U] x = [U^T] [Q^T] z^m \quad (3.10)$$

y se aplica la Ec. (3.8) en la Ec. (3.10) se obtiene:

$$[U^T] [U] x = [U^T] \hat{z} \quad (3.11)$$

donde:

$$\hat{z} = [Q^T] z^m \quad (3.12)$$

los elementos de la matriz  $[U]$  que se encuentran arriba de la diagonal principal son distintos o igual a cero, y todos sus elementos por debajo de la diagonal principal son iguales a cero. Por lo que se pueden eliminar los elementos necesarios debajo de la diagonal principal para transformar la estructura de la matriz  $[U]$  a una matriz triangular superior cuadrada, al transformarla la matriz  $[U^T]$  tiene inversa, de ésta forma la Ec. (3.11) se simplifica y finalmente se obtiene la ecuación general para estimación de estado lineal por la técnica de descomposición ortogonal:

$$[U] x = \hat{z} \quad (3.13)$$

dado que la matriz  $[U]$  es triangular superior, el estimado de las variables de estado puede resolverse directamente por sustitución regresiva.

El objetivo de transformar el problema es evitar los problemas de convergencia en el algoritmo de estimación de estado convencional al combinar mediciones convencionales con mediciones de alta precisión.

Este problema se evita al dividir la matriz de covariancia en dos submatrices que permite no calcular la matriz de ganancia evitando que una pequeña ponderación afecte a los demás términos. Al aplicar una transformación sobre la matriz  $[H']$  y obtener una matriz  $[Q]$  ortogonal y  $[U]$  triangular superior se da solución a la ecuación de estimación de estado.

### 3.2.2 Descomposición ortogonal

Un método aplicado para obtener la matriz  $[Q]$  ortogonal y la matriz  $[U]$  triangular superior de la Ec. (3.7) es el Método de Rotación de Givens [4].

El principio de rotación de Givens considera dos vectores renglón:

$$\begin{aligned} \underline{u} &= [0 \quad \dots \quad 0 \quad u_i \quad \dots \quad u_k \quad \dots \quad u_{n+1}] \\ \underline{x} &= [0 \quad \dots \quad 0 \quad x_i \quad \dots \quad x_k \quad \dots \quad x_{n+1}] \end{aligned} \quad (3.14)$$

en cada paso del método de Givens se define una rotación de plano entre  $\underline{u}$  y  $\underline{x}$  así que el  $i$ -ésimo elemento de  $\underline{x}$  es eliminado. Después de la rotación los vectores renglón toman la forma:

$$\begin{aligned} \underline{u}' &= [0 \quad \dots \quad 0 \quad u'_i \quad \dots \quad u'_k \quad \dots \quad u'_{n+1}] \\ \underline{x}' &= [0 \quad \dots \quad 0 \quad 0 \quad \dots \quad x'_k \quad \dots \quad x'_{n+1}] \end{aligned} \quad (3.15)$$

Las rotaciones a ser aplicadas a los vectores renglón  $\underline{u}$  y  $\underline{x}$  están definidas por:

$$\begin{bmatrix} c & s \\ -s & c \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \underline{u} \\ \underline{x} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \underline{u}' \\ \underline{x}' \end{bmatrix} \quad (3.16)$$

donde  $c^2 + s^2 = 1$ . Los escalares  $c$  y  $s$  son determinados de los requerimientos que  $\underline{x}'_i = 0$ , y son dados por:

$$c = \frac{u_i}{\sqrt{u_i^2 + x_i^2}} \quad (3.17)$$

$$s = \frac{x_i}{\sqrt{u_i^2 + x_i^2}} \quad (3.18)$$

esto muestra que una rotación es una transformación ortogonal.

Este método se aplica para matrices rectangulares y por lo tanto es útil para matrices cuadradas, en el Apéndice B se presenta un ejemplo de la transformación.

### 3.2.3 Estimador lineal con restricciones de igualdad

#### DIRECCIÓN GENERAL DE BIBLIOTECAS

Otra opción para la solución del problema de estimación de estado, cuando se utilizan mediciones con alta precisión, como la inyección cero, es formular un problema de optimización con restricciones de igualdad.

La ecuación que relaciona las inyecciones cero con las variables de estado se puede expresar mediante:

$$g_p(x) = 0 \quad (3.19)$$

o bien en forma expandida:

$$g_p(x_1, x_2, \dots, x_{N_s}) = 0 = g_{p1}x_1 + g_{p2}x_2 + \dots + g_{pN_s}x_{N_s} \quad (3.20)$$

$g_p(x)$  representa las ecuaciones de potencia nodal de los nodos con inyección cero presentes en la red, que en el caso general se tiene la expresión matricial:

$$g_p(x) = \begin{bmatrix} g_1(x) \\ g_2(x) \\ \vdots \\ g_p(x) \end{bmatrix} = [G] \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \\ \vdots \\ x_{N_s} \end{bmatrix} \quad (3.21)$$

donde:

$x$  variables de estado

$[G]$  matriz de los coeficientes de las funciones de potencia nodal con inyección cero

$P$  número de nodos con inyección cero

$N_s$  número de variables de estado.

Las restricciones de igualdad son incluidas en la Ec. (2.6) y se establece la función objetivo a minimizar para obtener la estimación de estado por mínimos cuadrados ponderados:

$$\min J(x, \lambda) = [z^m - h(x)]^T [R]^{-1} [z^m - h(x)] - 2\lambda^T g(x) \quad (3.22)$$

donde  $\lambda$  representa el vector de multiplicadores de Lagrange. Se linealiza  $g(x)$  mediante expansión en series de Taylor:

$$0 = g(x_k) + \left. \frac{\partial g}{\partial x} \right|_{x=x_k} \cdot (x - x_k) + \text{términos de orden superior} \quad (3.23)$$

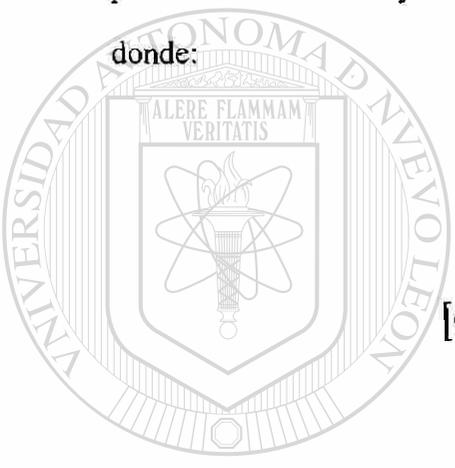
se define:

$$S = 0 - g(x_k) \quad (3.24)$$

al minimizar la Ec. (3.22) se obtiene el óptimo estimado del vector de las variables de estado  $[x]$ .

Para el caso lineal, la matriz  $[G]$  que representa los coeficientes de las funciones de potencia nodal con inyección cero, es igual a la matriz de primeras derivadas de  $[g]$ ,

donde:



$$[G]x = \begin{bmatrix} \frac{\partial g_1}{\partial x_1} & \frac{\partial g_1}{\partial x_2} & \dots & \frac{\partial g_1}{\partial x_{N_s}} \\ \frac{\partial g_2}{\partial x_1} & \frac{\partial g_2}{\partial x_2} & \dots & \frac{\partial g_2}{\partial x_{N_s}} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \frac{\partial g_p}{\partial x_1} & \frac{\partial g_p}{\partial x_2} & \dots & \frac{\partial g_p}{\partial x_{N_s}} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \\ \vdots \\ x_{N_s} \end{bmatrix} \quad (3.25)$$

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN

la Ec. (3.23) puede expresarse como:

DIRECCIÓN GENERAL DE BIBLIOTECAS

$$S = Gx \quad (3.26)$$

finalmente para obtener la ecuación para estimación de estado con restricciones de igualdad de un sistema lineal se sustituye la Ec. (2.7) y la Ec. (3.25) en la Ec. (3.22):

$$\min J(x, \lambda) = [z^m - Hx]^T [R^{-1}] [z^m - Hx] - 2\lambda^T (S - Gx) \quad (3.27)$$

y se obtiene el mínimo cuando el gradiente de la función objetivo  $\nabla J(x, \lambda) = 0$ .

Aplicando reglas del álgebra lineal en la Ec. (3.27):

$$\begin{aligned} \nabla J(x, \lambda) = & z^{mT} R^{-1} z^m - x^T H^T R^{-1} z^m + x^T H^T R^{-1} Hx \\ & - z^{mT} R^{-1} Hx - 2\lambda^T S + 2\lambda^T Bx \end{aligned} \quad (3.28)$$

al obtener las derivadas parciales, con respecto a  $x$  y  $\lambda$  se obtiene.

$$\frac{\partial J(x, \lambda)}{\partial x} = 0 = H^T R^{-1} Hx - H^T R^{-1} z^m + G^T \lambda \quad (3.29)$$

$$\frac{\partial J(x, \lambda)}{\partial \lambda} = 0 = -S + Gx \quad (3.30)$$

arreglando las ecuaciones se tiene:

$$H^T R^{-1} Hx + G^T \lambda = H^T R^{-1} z^m \quad (3.31)$$

$$S = Gx \quad (3.32)$$

y en forma matricial:

$$\begin{bmatrix} H^T R^{-1} H & G^T \\ G & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x \\ \lambda \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} H^T R^{-1} z^m \\ S \end{bmatrix} \quad (3.33)$$

donde  $x$  representa las variables de estado y  $\lambda$  los multiplicadores de Lagrange para ajustar los nodos con inyección cero.

La figura 3.3 presenta la solución de estimación de estado con restricciones de igualdad del sistema de la figura 3.1 que cuenta con nodos de inyección cero. Se observa como la inyección de potencia del nodo 1 se ajusta correctamente a valor cero de inyección de potencia.

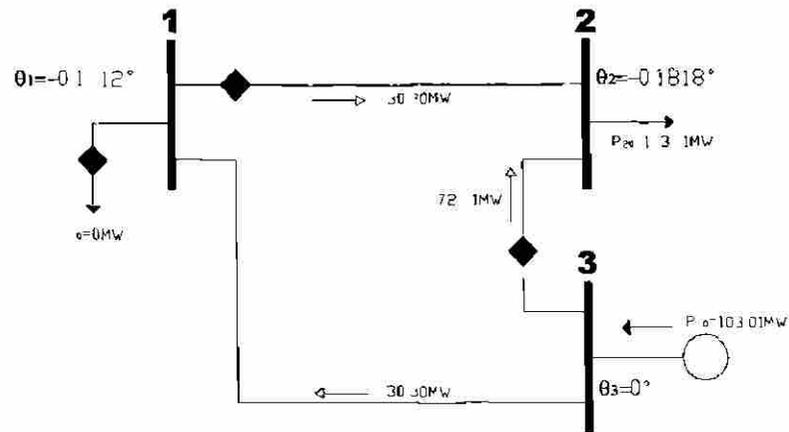


Fig. 3.3.- Valores estimados para sistema con inyección cero (estimador con restricciones de igualdad).

### 3.2.4 Análisis y resultados

Para establecer las características de cada uno de los estimadores descritos, se utilizó el sistema de la Fig. 3.4 se analiza el estimador lineal que utiliza descomposición ortogonal y el estimador lineal que modela las inyecciones cero como restricciones de igualdad.

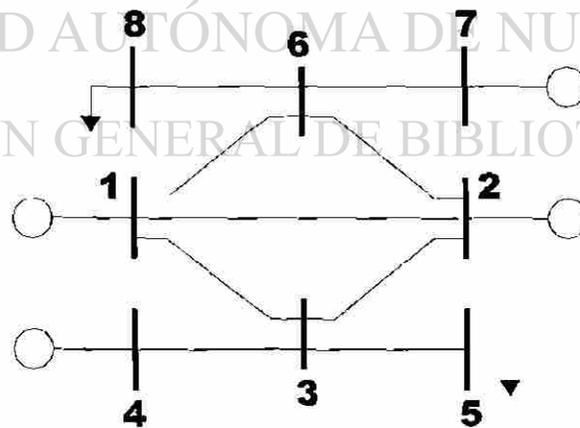


Figura 3.4.- Sistema de prueba 2 para estimación lineal.

Los datos para cada estimador son las inyecciones nodales de potencia activa y flujos de potencia activa en líneas de transmisión, las mediciones incluyen errores aleatorios en el rango  $\pm 3\sigma$  de error, se utiliza la misma información para ambos estimadores.

Tabla 3.1.- Comparación de resultados del estimador con restricciones de igualdad y el estimador por descomposición ortogonal.

Restricciones de igualdad			Descomposición ortogonal		
	Angulos estimados	Inyecciones de potencia		Angulos estimados	Inyecciones de potencia
1	0.0000	1.0120	1	0.0000	1.0120
2	0.0377	1.5066	2	0.0377	1.5066
3	-0.0561	0.0000	3	-0.0561	0.0000
4	0.2120	0.8043	4	0.2120	0.8043
5	-0.2584	-2.0222	5	-0.2584	-2.0222
6	-0.1278	0.0000	6	-0.1278	0.0000
7	0.2085	1.0087	7	0.2085	1.0087
8	-0.3587	-2.3093	8	-0.3587	-2.3093
Flujos entre líneas			Flujos entre líneas		
1-2		-0.1883	1-2		-0.1883
1-3		0.5614	1-3		0.5614
1-6		0.6389	1-6		0.6389
2-3		0.6566	2-3		0.6566
2-6		0.6617	2-6		0.6617
3-4		-0.8043	3-4		-0.8043
3-5		2.0222	3-5		2.0222
6-7		-1.0087	6-7		-1.0087
6-8		2.3093	6-8		2.3093

Los resultados obtenidos son idénticos y sin problemas de convergencia. Se concluye que ambos estimadores resuelven el problema de combinar mediciones convencionales con mediciones de alta precisión (nodos con inyección cero).

Sin embargo, una diferencia entre el estimador que utiliza descomposición ortogonal y el estimador con restricciones de igualdad, es la manera de modelar el error de la medición con alta precisión dentro del proceso de estimación. En el estimador con restricciones de igualdad, la medición precisa no requiere un factor de ponderación, el ajuste de la inyección en el nodo se da por la restricción de igualdad que se debe cumplir en la solución. En cambio, en el estimador por descomposición ortogonal la ponderación dada a la medición del nodo con inyección cero es muy alta (dominante), lo que permite ajustar el valor de la inyección cero.

### 3.3 Estimación de estado no lineal por descomposición ortogonal

Para extender la aplicación de la técnica de descomposición ortogonal al caso no lineal de estimación de estado, es necesario tener una representación completa de las variables de estado del sistema eléctrico de potencia  $(|V|, \theta)$

La no linealidad del problema dada por las ecuaciones de potencia activa y potencia reactiva en el sistema (funciones  $h(x)$ ) obliga a emplear métodos numéricos iterativos.

#### 3.3.1 Estimador CA por Método Newton-Raphson

La idea fundamental del algoritmo por descomposición ortogonal para estimación de estado no lineal es tomar la Ec. (2.17) y transformar la matriz  $[R^{-1}]$  en dos submatrices (Ec. (3.1)). Al aplicar a la Ec. (2.17) el procedimiento de la Ec. (3.3) a la Ec. (3.13) se obtiene la ecuación general para estimación de estado no lineal por descomposición ortogonal.

$$[U]\Delta x = \hat{\Delta z} \quad (3.34)$$

donde:

$$\hat{\Delta z} = [Q^T][R^{-1/2}][z^m - h(x)]$$

$[U]$  = matriz triangular superior de dimensión  $N_m \times N_s$ ,

$[Q]$  = matriz ortogonal de dimensión  $N_m \times N_m$

una vez que se resuelve la ecuación para los incrementos se actualizan los valores de las variables de estado.

$$x_{k+1} = x_k + \Delta x_k \quad (3.35)$$

la solución se obtiene (si el proceso es convergente) cuando los incrementos de la Ec. (3.35) son igual a cero o menor a cierta tolerancia.

En el método de Newton-Raphson en cada iteración se requiere la solución de un sistema sobredeterminado de ecuaciones lineales. Para esto es necesario determinar el jacobiano y obtener la Ec. (3.4) para realizar el proceso de ortogonalización, y finalmente mediante un algoritmo de sustitución regresiva aplicado a la matriz  $[U]$  obtener los incrementos de las variables (Ec. (3.34)) y actualizarlas (Ec. (3.35)).

### 3.3.2 Estimador CA por método Desacoplado Rápido

El algoritmo desacoplado para estimación de estado por descomposición ortogonal se basa en desacoplar la ecuación completa del método de Newton-Raphson (Ec. (2.19)) y aplicar la transformación ortogonal a cada una de ellas.

$$\begin{bmatrix} G_{AA} & G_{AR} \\ G_{AR}^T & G_{RR} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} H_{AA} & H_{AR} \\ H_{RA} & H_{RR} \end{bmatrix}^T \begin{bmatrix} R_A & 0 \\ 0 & R_R \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} H_{AA} & H_{AR} \\ H_{RA} & H_{RR} \end{bmatrix} \quad (3.36)$$

$$\begin{bmatrix} T_A \\ T_R \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} H_{AA} & H_{AR} \\ H_{RA} & H_{RR} \end{bmatrix}^T \begin{bmatrix} R_A & 0 \\ 0 & R_R \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} z_A^m \\ z_R^m \end{bmatrix} \quad (3.37)$$

donde:

$H_{AA}$  = submatriz jacobiana que relaciona las mediciones de flujos e inyecciones de potencia activa a los cambios en las variables de estado ( $\theta$ )

$H_{RR}$  = submatriz jacobiana que relaciona las mediciones de magnitud de voltajes, flujos e inyecciones de potencia reactiva a los cambios en las variables de estado ( $|V|$ )

$H_{AR}$  = submatriz jacobiana que relaciona las mediciones de flujos e inyecciones de potencia activa a los cambios en las variables de estado ( $|V|$ )

$H_{RA}$  = submatriz jacobiana que relaciona las mediciones de magnitud de voltajes, flujos e inyecciones de potencia reactiva a los cambios en las variables de estado ( $\theta$ )

$z_A^m$  = mediciones de flujos e inyecciones de potencia activa

$z_R^m$  = mediciones de flujos e inyecciones de potencia reactiva y magnitud de voltajes.

Al aplicar las simplificaciones del capítulo II (paso 1 al 5) a la Ec. (2.19) se obtiene la ecuación desacoplada para estimación de estado, para los ángulos es representada por:

$$\left[ H_{AA}^T R_A^{-1} H_{AA} \right] \Delta \theta = H_{AA}^T R_A^{-1} \Delta z_A^m \quad (3.38)$$

con estos incrementos se actualizan los ángulos de fase:

$$\theta_{k+1} = \theta_k + \Delta \theta_k \quad (3.39)$$

y para los voltajes nodales:

$$\left[ H_{RR}^T R_R^{-1} H_{RR} \right] \Delta |V| = H_{RR}^T R_R^{-1} \Delta z_R^m \quad (3.40)$$

con los incrementos calculados se actualizan los voltajes nodales:

$$|V|_{k+1} = |V|_k + \Delta |V|_k \quad (3.41)$$

ahora se aplica la transformación ortogonal (procedimiento de Ec. (3.1) a Ec. (3.13)) a la Ec. (3.38) y a la Ec. (3.40) para finalmente obtener el algoritmo desacoplado rápido para estimación de estado por descomposición ortogonal:

$$\left[ U_A \right] \Delta \theta = \hat{\Delta z}_A \quad (3.42)$$

y para los voltajes se tiene:

$$[U_R] \Delta |V| = \Delta \hat{z}_R \quad (3.43)$$

donde:

$[U_A]$  = matriz triangular superior para determinar corrección en variables de estado ( $\theta$ )

$[U_R]$  = matriz triangular superior para determinar corrección en variables de estado ( $|V|$ )

con los incrementos calculados se actualizan las variables de estado dadas por la Ec. (3.39) y la Ec. (3.41).

En el método de solución se emplea un esquema secuencial, ya que presenta mejores características de convergencia que un esquema simultáneo.

### 3.4 Análisis y resultados

Ahora se analiza la aplicación de la estimación de estado por descomposición ortogonal utilizando el Método Newton-Raphson y el Método Desacoplado Rápido, con el objetivo comparar el desempeño de éstos modelos.

#### 3.4.1 Método Newton-Raphson

Para el sistema de la figura 3.5 cuyos datos se presentan en el apéndice C se realiza la estimación por descomposición ortogonal para los casos: (1) todas las mediciones sin error (caso ideal); (2) se tiene error en todas las mediciones dentro del rango  $\pm 3\sigma$ ; (3) similar a (2) pero con la medición de potencia activa y potencia reactiva de 10-11 invertida; (4) similar a (3) pero con la medición de potencia activa y potencia reactiva de 10-11 con error anormal es eliminada.

Se cuenta con mediciones de flujos de potencia activa y potencia reactiva en líneas, inyecciones de potencia activa y potencia reactiva en los nodos, y mediciones de magnitud de voltaje en los nodos.

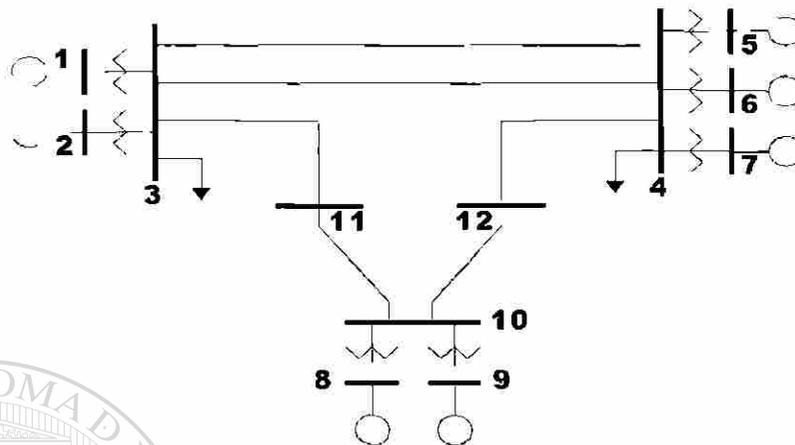


Figura 3.5.- Sistema de prueba 3 para estimación de estado.

Tabla 3.2.- Resultados para caso (1) y caso (2) por Método Newton-Raphson.

Caso 1					Caso 2				
Valores estimados de las Variables de estado					Valores estimados de las Variables de estado				
N	V	A	Pne	Qne	N	V	A	Pne	Qne
1	1.0200	0.0000	1.9418	0.3952	1	1.0273	0.0000	1.9567	0.3866
2	1.0200	0.0023	2.0000	0.3997	2	1.0273	-0.0022	2.0149	0.3911
3	1.0074	-0.0757	-4.6500	-0.9000	3	1.0151	-0.0751	-4.6487	-0.9175
4	1.0097	-0.1109	-4.6500	-0.9000	4	1.0179	-0.1117	-4.6359	-0.9371
5	1.0200	-0.0720	1.0000	0.2832	5	1.0284	-0.0739	0.9886	0.2897
6	1.0200	-0.0720	1.0000	0.2832	6	1.0284	-0.0739	0.9886	0.2897
7	1.0200	-0.0720	1.0000	0.2832	7	1.0284	-0.0739	0.9886	0.2897
8	1.0200	0.3461	1.2500	-0.1552	8	1.0298	0.3349	1.2329	-0.1541
9	1.0200	0.3461	1.2500	-0.1552	9	1.0290	0.3357	1.2522	-0.1734
10	1.0273	0.2984	0.0000	0.0000	10	1.0369	0.2888	0.0000	0.0000
11	1.0267	0.1092	0.0000	0.0000	11	1.0365	0.1048	0.0000	0.0000
12	1.0243	0.0916	0.0000	0.0000	12	1.0342	0.0864	0.0000	0.0000
Prueba de Hipótesis					Prueba de Hipótesis				
Factor J					Factor J				
0.0000					67.6689				
Valor Xi2					Valor Xi2				
92.8025					92.8025				
	Per	Pre	Qer	Qre		Per	Pre	Qer	Qre
1-3	1.9418	-1.9418	0.3952	-0.2442	1-3	1.9567	-1.9567	0.3866	-0.2359
2-3	2.0000	-2.0000	0.3997	-0.2397	2-3	2.0149	-2.0149	0.3911	-0.2314
5-4	1.0000	-1.0000	0.2832	-0.2416	5-4	0.9886	-0.9886	0.2897	-0.2496
6-4	1.0000	-1.0000	0.2832	-0.2416	6-4	0.9886	-0.9886	0.2897	-0.2496
7-4	1.0000	-1.0000	0.2832	-0.2416	7-4	0.9886	-0.9886	0.2897	-0.2496
8-10	1.2500	-1.2500	-0.1552	0.2162	8-10	1.2329	-1.2329	-0.1541	0.2123
9-10	1.2500	-1.2500	-0.1552	0.2162	9-10	1.2522	-1.2522	-0.1734	0.2338
3-4	0.2113	-0.2102	-0.2038	-0.1150	3-4	0.2227	-0.2215	-0.2103	-0.1129
3-4	0.2113	-0.2102	-0.2038	-0.1150	3-4	0.2227	-0.2215	-0.2103	-0.1129
3-11	-1.1309	1.1619	-0.0085	-0.1117	3-11	-1.1224	1.1523	-0.0295	-0.1037
4-12	-1.2295	1.2664	0.0549	-0.1346	4-12	-1.2272	1.2633	0.0374	-0.1289
10-11	1.1946	-1.1619	-0.2266	0.1117	10-11	1.1838	-1.1523	-0.2330	0.1037
10-12	1.3054	-1.2664	-0.2058	0.1346	10-12	1.3013	-1.2633	-0.2131	0.1289

Al detectar la presencia de una medición errónea mediante un índice  $J(x)$  mayor que el valor de la distribución  $\chi^2$  se identifica y se elimina, se corre el estimador y se espera que los resultados arrojados sean confiables para ser validados y aplicados en diferentes aplicaciones.

Tabla 3.3.- Resultados para caso (3) y caso (4) por Método Newton-Raphson.

Caso 3					Caso 4				
Valores estimados de las Variables de estado					Valores estimados de las Variables de estado				
N	V	A	Pne	Qne	N	V	A	Pne	Qne
1	1.0135	0.0000	2.0092	0.3652	1	1.0264	0.0000	1.9559	0.3859
2	1.0135	0.0023	2.0675	0.3698	2	1.0264	0.0022	2.0141	0.3904
3	1.0022	-0.0792	-4.4986	-0.9991	3	1.0143	-0.0752	-4.6514	-0.9202
4	1.0087	-0.1258	-4.6274	-0.9419	4	1.0172	-0.1117	-4.6357	-0.9364
5	1.0193	-0.0872	0.9915	0.2895	5	1.0278	-0.0739	0.9887	0.2900
6	1.0193	-0.0872	0.9915	0.2895	6	1.0278	-0.0739	0.9887	0.2900
7	1.0193	-0.0872	0.9915	0.2895	7	1.0278	-0.0739	0.9887	0.2900
8	1.0267	0.2766	1.0825	-0.1698	8	1.0303	0.3356	1.2350	-0.1502
9	1.0260	0.2773	1.1024	-0.1892	9	1.0295	0.3364	1.2544	-0.1695
10	<b>1.0342</b>	<b>0.2358</b>	<b>0.0000</b>	<b>0.0000</b>	10	<b>1.0373</b>	<b>0.2894</b>	<b>0.0000</b>	<b>0.0000</b>
11	<b>1.0329</b>	<b>0.0768</b>	<b>0.0000</b>	<b>0.0000</b>	11	<b>1.0361</b>	<b>0.1052</b>	<b>0.0000</b>	<b>0.0000</b>
12	<b>1.0321</b>	<b>0.0533</b>	<b>0.0000</b>	<b>0.0000</b>	12	<b>1.0340</b>	<b>0.0869</b>	<b>0.0000</b>	<b>0.0000</b>
Prueba de Hipótesis					Prueba de Hipótesis				
Factor J		Valor $\chi^2$			Factor J		Valor $\chi^2$		
2289.82		92.8025			66.0338		92.8025		
	Per	Pre	Qer	Qre		Per	Pre	Qer	Qre
1-3	2.0092	-2.0092	0.3652	-0.2028	1-3	1.9559	-1.9559	0.3859	-0.2350
2-3	2.0675	-2.0675	0.3698	-0.1980	2-3	2.0141	-2.0141	0.3904	-0.2306
5-4	0.9915	-0.9915	0.2895	-0.2484	5-4	0.9887	-0.9887	0.2900	-0.2498
6-4	0.9915	-0.9915	0.2895	-0.2484	6-4	0.9887	-0.9887	0.2900	-0.2498
7-4	0.9915	-0.9915	0.2895	-0.2484	7-4	0.9887	-0.9887	0.2900	-0.2498
8-10	1.0825	-1.0825	-0.1698	0.2154	8-10	1.2350	-1.2350	-0.1502	0.2085
9-10	1.1024	-1.1024	-0.1892	0.2368	9-10	1.2544	-1.2544	-0.1695	0.2300
3-4	0.2746	-0.2727	-0.2344	-0.0767	3-4	0.2215	-0.2203	-0.2115	-0.1113
3-4	0.2746	-0.2727	-0.2344	-0.0767	3-4	0.2215	-0.2203	-0.2115	-0.1113
3-11	-0.9711	0.9938	-0.1295	-0.0478	3-11	-1.1244	1.1545	-0.0317	-0.1001
4-12	-1.1074	1.1368	-0.0433	-0.0898	4-12	-1.2291	1.2653	0.0358	-0.1261
10-11	1.0172	-0.9938	-0.2305	0.0478	10-11	1.1861	-1.1545	-0.2288	0.1001
10-12	1.1676	-1.1368	-0.2217	0.0898	10-12	1.3034	-1.2653	-0.2097	0.1261

Tabla 3.4.- Tabla de convergencia para el Método Newton-Raphson.

	Iteraciones	$\sum P_{Nodales}$	$\sum Q_{Nodales}$
Caso 1	3	0.1417	-0.4660
Caso 2	3	0.1379	-0.5352
Caso 3	3	0.1102	-0.6966
Caso 4	3	0.1384	-0.5298

Los resultados muestran que una medición con error anormal desvía el índice  $J(x)$  de valor cero de acuerdo al error de la medición y flujo de la línea de transmisión.

### 3.4.2 Método Desacoplado Rápido

Ahora se realizan los casos mencionados en el punto anterior con el estimador desacoplado rápido por descomposición ortogonal, de igual manera se aplica la técnica de detección e identificación de errores.

Tabla 3.5.- Resultados para caso (1) y caso (2) por Método Desacoplado Rápido.

Caso 1					Caso 2				
Valores estimados de las Variables de estado					Valores estimados de las Variables de estado				
N	V	A	Pne	Qne	N	V	A	Pne	Qne
1	1.0200	0.0000	1.9418	0.3952	1	1.0270	0.0000	1.9550	0.3874
2	1.0200	0.0023	2.0000	0.3997	2	1.0270	0.0022	2.0132	0.3919
3	1.0074	-0.0757	4.6500	-0.9000	3	1.0148	-0.0751	4.6492	-0.9118
4	1.0197	-0.1109	-4.6500	-0.9000	4	1.0174	-0.1118	-4.6361	-0.9339
5	1.0200	-0.0720	1.0000	0.2832	5	1.0280	-0.0740	0.9868	0.2901
6	1.0270	0.0720	1.0000	0.2832	6	1.0280	-0.0740	0.9868	0.2901
7	1.0200	0.0720	1.0000	0.2832	7	1.0280	-0.0740	0.9868	0.2901
8	1.0200	0.3461	1.2500	-0.1572	8	1.0292	0.3373	1.2365	-0.1720
9	1.0200	0.3461	1.2500	-0.1572	9	1.0284	0.3381	1.2597	-0.1720
10	1.0273	0.2984	0.0000	0.0000	10	1.0363	0.2909	0.0000	0.0000
11	1.0267	0.1092	0.0000	0.0000	11	1.0358	0.1059	0.0000	0.0000
12	1.0243	0.0916	0.0000	0.0000	12	1.0334	0.0875	0.0000	0.0000
Prueba de Hipótesis					Prueba de Hipótesis				
Factor J					Factor J				
92.8025					67.9071				
Valor $\chi^2$					Valor $\chi^2$				
92.8025					92.8025				
	Per	Pre	Qer	Qre		Per	Pre	Qer	Qre
1-3	1.9418	-1.9418	0.3952	-0.2442	1-3	1.9550	-1.9550	0.3874	-0.2567
2-3	2.0000	-2.0000	0.3997	0.2832	2-3	2.0132	-2.0132	0.3919	-0.2565
5-4	1.0000	-1.0000	0.2832	-0.2832	5-4	0.9868	-0.9868	0.2901	-0.2500
6-4	1.0000	-1.0000	0.2832	-0.2832	6-4	0.9868	-0.9868	0.2901	-0.2500
7-4	1.0000	-1.0000	0.2832	-0.2832	7-4	0.9868	-0.9868	0.2901	-0.2500
8-10	1.2500	-1.2500	-0.1572	0.2162	8-10	1.2365	-1.2365	0.1579	0.2169
9-10	1.2500	-1.2500	-0.1572	0.2162	9-10	1.2597	-1.2597	-0.1720	0.2331
3-4	0.2113	-0.2113	-0.2038	-0.1150	3-4	0.2231	-0.2219	-0.2101	-0.1128
3-4	0.2113	-0.2102	-0.2038	-0.1150	3-4	0.2231	-0.2219	-0.2101	-0.1128
3-11	-1.1309	1.1619	-0.0085	-0.1117	3-11	-1.1272	1.1574	-0.0254	-0.1053
4-12	-1.2795	1.2664	0.0549	-0.1346	4-12	-1.2321	1.2685	0.0418	-0.1305
10-11	1.1893	-1.1619	-0.2266	0.1117	10-11	1.1893	-1.1574	-0.2320	0.1153
10-12	1.3064	-1.2664	-0.2057	0.1346	10-12	1.3069	-1.2785	-0.2116	0.1305

Cuando las mediciones se encuentran con un error en el rango de  $\pm 3\sigma$ , la desviación que presenta el índice  $J(x)$  no es suficientemente grande para rechazar el estimado.

Ahora se presenta el caso de mediciones con error anormal y se verá el impacto que se tiene en los valores estimados de las variables de estado y el índice  $J(x)$ .

Tabla 3.6.- Resultados para caso (3) y caso (4) por Método Desacoplado Rápido.

Caso 3					Caso 4				
Valores estimados de las Variables de estado					Valores estimados de las Variables de estado				
N	V	A	Pne	Qne	N	V	A	Pne	Qne
1	1.0172	0.0000	2.0091	0.3715	1	1.0261	0.0000	1.9544	0.3864
2	1.0172	0.0023	2.0673	0.3761	2	1.0261	0.0022	2.0126	0.3909
3	1.0057	-0.0786	-4.4884	-0.9764	3	1.0139	-0.0752	-4.6510	-0.9182
4	1.0091	-0.1250	-4.6243	-0.9635	4	1.0169	-0.1119	-4.6363	-0.9331
5	1.0194	-0.0865	0.9907	0.2815	5	1.0275	-0.0741	0.9867	0.2904
6	1.0194	-0.0865	0.9907	0.2815	6	1.0275	-0.0741	0.9867	0.2904
7	1.0194	-0.0865	0.9907	0.2815	7	1.0275	-0.0741	0.9867	0.2904
8	1.0277	0.2740	1.0748	-0.1747	8	1.0299	0.3377	1.2383	-0.1481
9	1.0269	0.2750	1.0981	-0.1949	9	1.0291	0.3386	1.2615	-0.1682
10	1.0354	0.2336	0.0000	0.0000	10	1.0368	0.2913	0.0000	0.0000
11	1.0355	0.0758	0.0000	0.0000	11	1.0356	0.1061	0.0000	0.0000
12	1.0331	0.0527	0.0000	0.0000	12	1.0334	0.0877	0.0000	0.0000
Prueba de Hipótesis					Prueba de Hipótesis				
Factor J		Valor Xi2			Factor J		Valor Xi2		
2291.68		92.8025			66.2265		91.0000		
	Per	Pre	Qer	Qre		Per	Pre	Qer	Qre
1-3	2.0091	-2.0091	0.3715	-0.2101	1-3	1.9544	-1.9544	0.3864	-0.2356
2-3	2.0673	-2.0673	0.3761	-0.2054	2-3	2.0126	-2.0126	0.3909	-0.2312
5-4	0.9907	-0.9907	0.2815	-0.2407	5-4	0.9867	-0.9867	0.2904	-0.2503
6-4	0.9907	-0.9907	0.2815	-0.2407	6-4	0.9867	-0.9867	0.2904	-0.2503
7-4	0.9907	-0.9907	0.2815	-0.2407	7-4	0.9867	-0.9867	0.2904	-0.2503
8-10	1.0748	-1.0748	-0.1747	0.2196	8-10	1.2383	-1.2383	-0.1481	0.2067
9-10	1.0981	-1.0981	-0.1949	0.2421	9-10	1.2615	-1.2615	-0.1682	0.2293
3-4	0.2774	-0.2755	-0.2168	-0.0957	3-4	0.2224	-0.2212	-0.2116	-0.1109
3-4	0.2774	-0.2755	-0.2168	-0.0957	3-4	0.2224	-0.2212	-0.2116	-0.1109
3-11	-0.9668	0.9891	-0.1274	-0.0543	3-11	-1.1288	1.1591	-0.0283	-0.1013
4-12	-1.1012	1.1302	-0.0500	-0.0861	4-12	-1.2338	1.2703	0.0397	-0.1275
10-11	1.0123	-0.9891	-0.2399	0.0543	10-11	1.1910	-1.1591	-0.2278	0.1013
10-12	1.1606	-1.1302	-0.2218	0.0861	10-12	1.3087	-1.2703	-0.2083	0.1275

Se observa que el nodo con inyección cero se ajusta correctamente a valor cero de inyección de potencia activa y potencia reactiva.

DIRECCIÓN GENERAL DE BIBLIOTECAS  
Tabla 3.7.- Tabla de convergencia para el Método Desacoplado Rápido.

	Iteraciones	$\sum P_{Nodales}$	$\sum Q_{Nodales}$
Caso 1	4	0.1417	-0.4660
Caso 2	4	0.1393	-0.5230
Caso 3	4	0.1087	-0.7175
Caso 4	4	0.1396	-0.5191

Las características de convergencia son parecidas entre ambos estimadores aún cuando los resultados no resultan ser idénticos pero sí muy parecidos.

Tabla 3.8.- Tabla de ajuste de inyección de potencia, en nodo con inyección cero caso (2) por el Método Newton-Raphson.

Iteración	Potencia Activa			Potencia Reactiva		
	Nodo 10	Nodo 11	Nodo 12	Nodo 10	Nodo 11	Nodo 12
1	0.07849	-0.01730	-0.01524	0.33343	0.25261	0.30038
2	0.00168	-0.00102	-0.00128	-0.00015	0.00123	0.00198
3	-0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	-0.00000	-0.00000

Tabla 3.9.- Tabla de ajuste de inyección de potencia, en nodo con inyección cero caso (2) por el Método Desacoplado Rápido.

Iteración	Potencia Activa			Potencia Reactiva		
	Nodo 10	Nodo 11	Nodo 12	Nodo 10	Nodo 11	Nodo 12
1	-0.01561	0.02806	0.02956	0.00996	0.02151	0.02205
2	0.00046	-0.00247	-0.00317	0.00003	-0.00012	-0.00012
3	-0.00000	-0.00002	-0.00000	0.00000	0.00001	0.00001
4	0.00000	-0.00000	-0.00000	0.00000	0.00000	-0.00000

En las tablas anteriores se observa cómo se va ajustando a cero la inyección de potencia activa y reactiva en el nodo con inyección cero. Provocado por la ponderación tan pequeña que se otorga a la medición con alta precisión del nodo.

### 3.5 Estimación de estado convencional en sistemas con inyección cero.

Un problema que presenta la estimación de estado convencional cuando en el sistema hay presentes nodos con inyección cero es la mala estimación y problemas de convergencia, debido a la incorrecta modelación del error de las mediciones de este tipo de nodos que se consideran como precisas.

Se emplea el sistema de la figura 3.5 para correr el estimador convencional por Método Newton-Raphson y Método Desacoplado Rápido, que cuenta con un nodo con inyección cero (nodo 10,11,12) y se otorga una ponderación de  $\sigma_{10} = 0.05$  para la medición de potencia activa y potencia reactiva

Se cuenta con mediciones de flujos de potencia activa y potencia reactiva en líneas de transmisión y transformadores, mediciones de inyección de potencia activa y potencia reactiva y mediciones de magnitud de voltaje en los nodos. Todas las mediciones

cuentan con un error dentro del rango  $\pm 3\sigma$ . Y se aplica la prueba de detección e identificación de errores.

Tabla 3.10.- Resultados estimación convencional para sistema con inyección cero.

<b>Método Newton-Raphson</b>					<b>Método Desacoplado Rápido</b>				
Valores estimados de las Variables de estado					Valores estimados de las Variables de estado				
N	V	A	Pne	Qne	N	V	A	Pne	Qne
1	1.0276	0.0000	1.9608	0.3854	1	1.0270	0.0000	1.9584	0.3859
2	1.0276	0.0022	2.0190	0.3899	2	1.0270	0.0022	2.0166	0.3904
3	1.0155	-0.0752	-4.6369	-0.9216	3	1.0148	-0.0752	-4.6392	-0.9196
4	1.0181	-0.1117	-4.6257	-0.9397	4	1.0174	-0.1118	-4.6276	-0.9374
5	1.0286	-0.0738	0.9921	0.2889	5	1.0279	-0.0739	0.9896	0.2890
6	1.0286	-0.0738	0.9921	0.2889	6	1.0279	-0.0739	0.9896	0.2890
7	1.0286	-0.0738	0.9921	0.2889	7	1.0279	-0.0739	0.9896	0.2890
8	1.0290	0.3327	1.2482	-0.1491	8	1.0283	0.3362	1.2464	-0.1487
9	1.0282	0.3335	1.2675	-0.1685	9	1.0275	0.3371	1.2696	-0.1688
10	1.0359	0.2859	-0.0266	-0.0200	10	1.0353	0.2894	-0.0044	-0.0190
11	1.0370	0.1009	-0.0267	0.0104	11	1.0364	0.1025	-0.0281	0.0160
12	1.0341	0.0833	-0.0197	0.0020	12	1.0335	0.0847	-0.0223	0.0083
Prueba de Hipótesis					Prueba de Hipótesis				
Factor J		Valor Xi2			Factor J		Valor Xi2		
65.9790		92.8025			66.3918		92.8025		
	Per	Pre	Qer	Qre		Per	Pre	Qer	Qre
1-3	1.9608	-1.9608	0.3854	-0.2342	1-3	1.9584	-1.9584	0.3859	-0.2348
2-3	2.0190	-2.0190	0.3899	-0.2297	2-3	2.0166	-2.0166	0.3904	-0.2304
5-4	0.9921	-0.9921	0.2889	-0.2485	5-4	0.9896	-0.9896	0.2890	-0.2488
6-4	0.9921	-0.9921	0.2889	-0.2485	6-4	0.9896	-0.9896	0.2890	-0.2488
7-4	0.9921	-0.9921	0.2889	-0.2485	7-4	0.9896	-0.9896	0.2890	-0.2488
8-10	1.2482	-1.2482	-0.1491	0.2088	8-10	1.2464	-1.2464	-0.1487	0.2083
9-10	1.2675	-1.2675	-0.1685	0.2304	9-10	1.2696	-1.2696	-0.1688	0.2310
3-4	0.2219	-0.2207	-0.2100	-0.1135	3-4	0.2225	-0.2213	-0.2096	-0.1133
3-4	0.2219	-0.2207	-0.2100	-0.1135	3-4	0.2225	-0.2213	-0.2096	-0.1133
3-11	-1.1009	1.1296	-0.0377	-0.1039	3-11	-1.1092	1.1385	-0.0351	-0.1027
4-12	-1.2081	1.2430	0.0330	-0.1324	4-12	1.2161	1.2515	0.0356	-0.1310
10-11	1.1882	-1.1564	-0.2413	0.1143	10-11	1.1990	-1.1666	-0.2410	0.1187
10-12	1.3008	-1.2628	-0.2179	0.1344	10-12	1.3126	-1.2737	-0.2172	0.1393

## DIRECCIÓN GENERAL DE BIBLIOTECAS

Se observa en los resultados que el nodo con inyección cero no se ajusta a valor cero de inyección de potencia, esto se debe a la ponderación grande que se otorga a una medición con alta precisión.

Si en este caso se otorga una ponderación muy pequeña  $\left(\frac{1}{\sigma} = 1 \times 10^8\right)$  para ajustar al nodo con inyección cero a valor cero de inyección de potencia el estimador convencional por el Método Newton-Raphson y el Método Desacoplado Rápido no convergen, debido a que esta ponderación afecta a los demás términos de la matriz de ganancia y la vuelve casi singular.

# CAPITULO IV

## ESTIMACION DE ESTADO CON MEDICIONES FASORIALES SINCRONIZADAS

### 4.1 Introducción

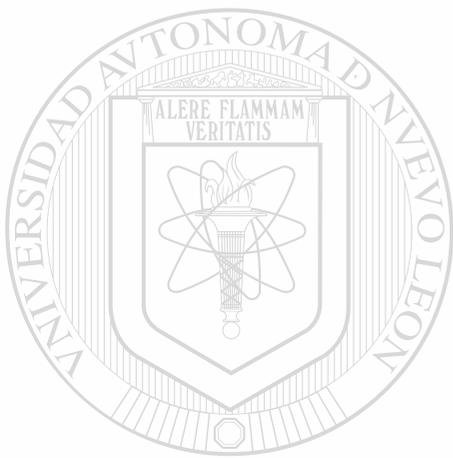
En la actualidad existen equipos de medición fasorial (PMU “Phasor Measuring Unit”) capaces de obtener fasores (medición de ángulo de fase y magnitud de voltaje), en diferentes puntos de la red, éstas mediciones pueden ser sincronizadas y son de alta precisión. Debido a la alta calidad de estas mediciones es atractivo incluirlas en el proceso de estimación de estado para incrementar la redundancia y lograr una mejor estimación.

### DIRECCIÓN GENERAL DE BIBLIOTECAS

En este capítulo se presentarán los conceptos básicos de las mediciones fasoriales, se describen las técnicas para obtener el fasor, la sincronización de mediciones y el esquema de una unidad de medición fasorial sincronizada.

En el capítulo anterior se analizó el problema de combinar las mediciones convencionales con mediciones de alta precisión (nodos con inyección cero), se presentaron casos de estudio y se analizaron los métodos de solución más eficientes. En el desarrollo de este capítulo se empleará un estimador con descomposición ortogonal

Las mediciones de nodos con inyección cero que se deseen incluir en el estimador convencional deberán tener una ponderación menor a  $\left(\frac{1}{\sigma} = 1 \times 10^8\right)$  para no tener el problema de convergencia.



# UANL

---

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN

®

DIRECCIÓN GENERAL DE BIBLIOTECAS

148560

utilizando mediciones fasoriales sincronizadas, y dos métodos de solución: Método Newton-Raphson y Método Desacoplado Rápido.

También, se considera la posibilidad que la medición fasorial tenga errores anormales, se analiza el efecto de la alta ponderación en estas mediciones en la estimación de estado.

#### 4.2 Mediciones Fasoriales Sincronizadas

Los fasores son una herramienta básica en el análisis de circuitos eléctricos de corriente alterna (CA) [5], se utilizan para representar las señales senoidales de voltaje y corriente en estado estable. Aún y cuando el sistema de potencia nunca está totalmente en estado estable, los fasores son frecuentemente usados en análisis de flujos de potencia.

Si se considera la forma de onda en estado estable de una señal de voltaje senoidal de frecuencia nominal, como se muestra en la Figura 4.1, y se inicia una observación de ésta forma de onda en un instante ( $t=0$ ), la forma de onda en estado estable se puede representar por un número complejo con una magnitud igual al valor RMS de la señal y con un ángulo de fase igual al ángulo ( $\phi$ ), el fasor es una representación compacta de las variables en función de la magnitud y ángulo de fase de la señal de corriente alterna (CA), y se define como una magnitud  $|X|$  que mantiene un ángulo  $\phi$  con respecto a una referencia que gira a la velocidad angular de la señal senoidal.

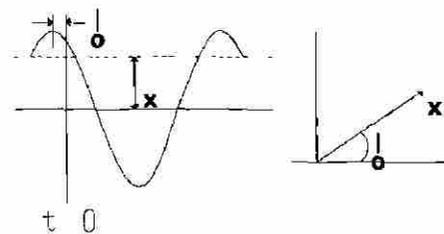


Figura 4.1.- Representación fasorial de una forma de onda sinusoidal

En un sistema de medición digital, las muestras de la señal para un periodo se obtienen empezando en  $(t=0)$ , y la componente de frecuencia fundamental de la Transformada Discreta de Fourier es calculada de acuerdo a la relación:

$$X = \frac{\sqrt{2}}{N} \sum_{k=1}^N x_k e^{\left(\frac{-j2k\pi}{N}\right)} \quad (4.1)$$

donde:

$N$  = el número de muestras en un período

$X$  = el fasor

$x_k$  = muestras de la forma de onda.

Para las señales de voltaje que se muestran en la figura 4.2 se obtiene el fasor aplicando la Ec. (4.1), se utilizó una onda sinusoidal pura con ventana de datos de un ciclo y 16 muestras de la forma de onda.

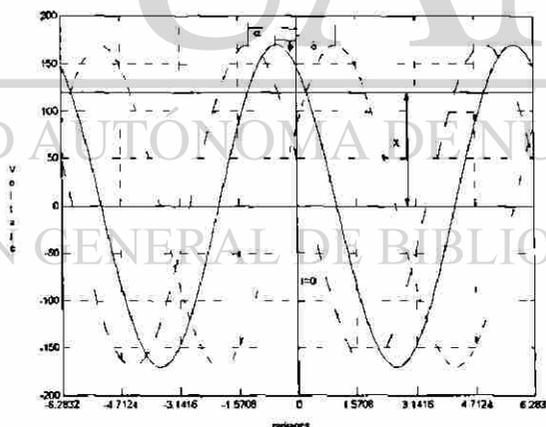


Figura 4.2.- Señales de voltaje.

Tabla 4.1.- Fasores calculados para las señales de voltaje.

Señal	Fasor	Magnitud de Voltaje	Angulo
—————	$103.923 + j60.000$	$ V =120.000$	$\phi=30.000^\circ$
-----	$33.808 + j115.139$	$ V =120.000$	$\alpha=73.636^\circ$
.....	$60.000 - j103.923$	$ V =120.000$	$\delta=-60.000^\circ$

Esta definición de fasor de la forma de onda es la representación correcta de la componente de frecuencia fundamental, cuando no existen componentes transitorias en la señal. Cuando hay frecuencias en la señal de entrada diferentes a la frecuencia nominal un error es introducido en la magnitud y ángulo de fase del fasor. Este error puede ser usado para determinar la frecuencia de la señal de entrada. Con el fin de eliminar los errores aliasing en el cálculo de la DFT descrita, la señal no deberá contener frecuencias arriba del rango de Nyquist:  $\frac{N\Omega_0}{2}$ , donde  $\Omega_0$  = frecuencia fundamental de la señal de entrada.

Cuando la señal de entrada contiene componentes que no son armónicas de la frecuencia fundamental, el fasor calculado contiene un error que puede ser considerable dependiendo de la posición frecuencial de esas componentes. Considerando las componentes no armónicas extrañas como un ruido en la señal de entrada, el fasor calculado tiene una incertidumbre asociada con este error, como se muestra en la Figura 4.3. El círculo de incertidumbre depende del tipo de ruido y de su ubicación espectral. Para el desarrollo de nuestro estudio las muestras se toman en condiciones de estado estable para el cálculo del fasor y cualquier filtro empleado es adecuado en el estimado del fasor.

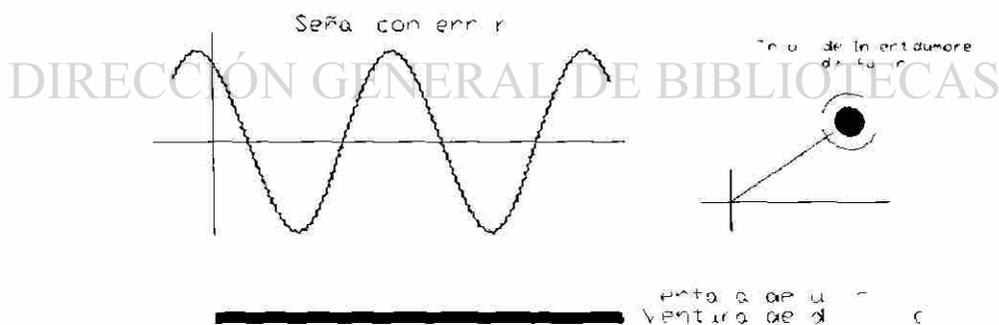


Figura 4.3.- Ventana de datos e incertidumbre en la estimación del fasor

Considerando que el sistema de potencia es balanceado el fasor de secuencia positiva puede ser utilizado. Los fasores pueden ser medidos para cada una de las fases, y el fasor de secuencia positiva útil para el caso de estudio es calculado de acuerdo a la definición:

$$V_1 = \frac{1}{3}(V_A + aV_B + a^2V_C) \quad (4.2)$$

donde:

$$a = e^{\frac{j2\pi}{3}}$$

Los sistemas de medición usando computadoras digitales se introdujeron en la industria hace varios años. Sin embargo, el problema ha sido encontrar una fuente confiable de tiempo de sincronización para las mediciones. Con el reciente desarrollo de las técnicas de sincronización de tiempo, acopladas con las técnicas de medición asistida por computadora, se han abierto opciones para medir fasores y diferencias de ángulos de fase en tiempo real de un sistema de potencia.

En años recientes la tecnología ha permitido llegar a una plataforma donde es posible sincronizar el proceso de muestreo de señales en distintas subestaciones del sistema [6], y con un error menor a 1 microsegundo. Un error de un microsegundo se traduce en un error en el ángulo de fase de  $0.021^\circ$  para un sistema de 60 Hz.

Las fuentes de sincronización utilizadas anteriormente como, líneas, microondas, ondas de radio AM, etc. No ofrecen la exactitud debida para su aplicación práctica. Un canal de fibra óptica empleado solamente para este propósito puede proporcionar una alta precisión de señal de sincronización. Sin embargo si el canal de fibra óptica es multiplexado, los errores de sincronización son del orden de 100 microsegundos, lo que no es aceptable para un sistema de medición de un sistema de potencia, además de los problemas que presentaría por las grandes distancias entre las subestaciones y costos de mantenimiento.

La tecnología moderna para la sincronización de señales utiliza el sistema de posicionamiento usando señales satelitales (GPS “Global Positioning System”)[5]. Este sistema fue diseñado para propósitos de navegación, y genera un pulso con un tiempo de acceso común de 1 microsegundo en cualquier punto de la tierra. El sistema usa la

transmisión de señales de una constelación de satélites en órbitas no estacionarias a aproximadamente 10,000 millas sobre la tierra [7]. Para lograr la exactitud descrita, sólo un satélite necesita ser visible por la antena, la cual es pequeña y puede ser fácilmente montada en el cuarto de control de la subestación.

Las unidades de medición fasorial (PMU) usando señales de sincronización del sistema satelital (GPS) han evolucionado y en la actualidad están siendo manufacturados para su venta comercial.

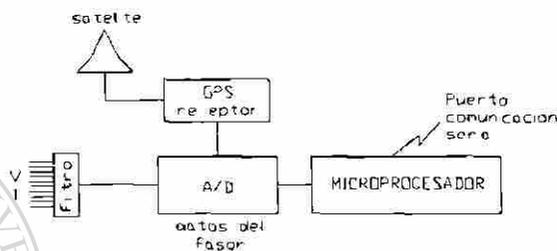


Figura 4.4.- Unidad de Medición Fasorial.

### 4.3 Resultados de estimación de estado con MFS

La característica relevante de la Medición Fasorial Sincronizada (MFS) es la alta precisión de la medición, lo que hace atractivo utilizarla en el proceso de estimación de estado. En este trabajo los estudios de estimación de estado son en estado estable y la medición fasorial para este caso en particular no presenta problemas, como es el caso del estado transitorio o dinámico de un sistema de potencia.

Para analizar el impacto de la MFS en el proceso de estimación de estado es necesario evaluar casos de estudio para presentar ventajas y desventajas, tanto para el algoritmo de estimación de estado convencional como en la estimación de estado que utiliza descomposición ortogonal.

#### 4.3.1 Estimación de estado convencional con MFS

Se presentan resultados del estimador de estado convencional por el Método Newton-Raphson y el Método Desacoplado Rápido,

### 4.3.1.1 Resultados del Método de Newton-Raphson

En el sistema de la Fig. 2.1 se cuenta con mediciones de flujo de potencia activa y potencia reactiva en líneas, inyecciones de potencia activa y potencia reactiva en nodos, y mediciones de magnitud de voltaje en los nodos. Se presentan resultados del estimador para los casos siguientes: (1) mediciones convencionales con un error aleatorio dentro del rango  $\pm 3\sigma$ , se cuenta con medición fasorial en los nodos 3 y 5; (2) similar a (1) pero con la medición de flujo de potencia activa y potencia reactiva de 3-5 invertida; (3) similar a (1) pero con error en la medición de flujo de potencia activa y potencia reactiva de 1-4 fuera del rango de  $\pm 3\sigma$ ; (4) similar a (1) pero con medición fasorial en todos los nodos. Se considera que la medición fasorial no contiene error.

Tabla 4.2.- Resultados del caso (1) y caso (2) con el Método de Newton-Raphson.

Caso 1					Caso 2				
Valores estimados de las Variables de estado					Valores estimados de las Variables de estado				
N	V	A	Pne	Qne	N	V	A	Pne	Qne
1	1.0521	0.0000	1.0954	0.1914	1	1.0521	0.0000	1.0954	0.1914
2	1.0487	-0.0644	0.4732	0.6984	2	1.0487	-0.0644	0.4732	0.6984
3	1.0700	-0.0746	0.5985	0.8802	3	1.0700	-0.0746	0.5985	0.8802
4	0.9891	-0.0735	-0.7009	-0.7024	4	0.9891	-0.0735	-0.7009	-0.7024
5	0.9854	-0.0921	-0.7011	-0.7088	5	0.9854	-0.0921	-0.7011	-0.7088
6	1.0065	-0.1037	-0.6872	-0.6620	6	1.0065	-0.1037	-0.6872	-0.6620
Prueba de Hipótesis					Prueba de Hipótesis				
Factor J		Valor Xi2			Factor J		Valor Xi2		
40.1616		79.8052			182.9193		79.8052		
Porcentaje de la diferencia de medidos y estimados fuera de $1.2\sigma$ 14.0625%					Porcentaje de la diferencia de medidos y estimados fuera de $1.2\sigma$ 17.1875%				
	Per	Pre	Qer	Qre		Per	Pre	Qer	Qre
1-2	0.2958	-0.2867	-0.1410	0.1152	1-2	0.2958	-0.2867	-0.1410	0.1152
1-4	0.4410	-0.4297	0.2128	-0.2094	1-4	0.4410	-0.4297	0.2128	-0.2094
1-5	0.3585	-0.3476	0.1195	-0.1407	1-5	0.3585	-0.3476	0.1195	-0.1407
2-3	0.0267	-0.0262	-0.1273	0.0621	2-3	0.0267	-0.0262	-0.1273	0.0621
2-4	0.3257	-0.3111	0.4517	-0.4434	2-4	0.3257	-0.3111	0.4517	-0.4434
2-5	0.1525	-0.1477	0.1498	-0.1768	2-5	0.1525	-0.1477	0.1498	-0.1768
2-6	0.2551	-0.2498	0.1090	-0.1466	2-6	0.2551	-0.2498	0.1090	-0.1466
3-5	0.1912	-0.1802	0.2317	-0.2610	3-5	0.1912	-0.1802	0.2317	-0.2610
3-6	0.4335	-0.4240	0.5863	-0.5603	3-6	0.4335	-0.4240	0.5863	-0.5603
4-5	0.0400	-0.0396	-0.0496	-0.0277	4-5	0.0400	-0.0396	-0.0496	-0.0277
5-6	0.0140	-0.0134	-0.1026	0.0448	5-6	0.0140	-0.0134	-0.1026	0.0448

El estimador de estado no presenta problemas de convergencia con la adición de la medición fasorial en el proceso de estimación. Los resultados son aceptables y la prueba

de detección e identificación de errores no presenta problemas para detectar e identificar errores en mediciones convencionales y en mediciones fasoriales.

Los problemas de convergencia no se presentan debido a lo siguiente:

(1) La ponderación que se otorga a la medición de ángulo y a la medición de magnitud de voltaje de la medición fasorial ( $\sigma = 1 \times 10^{-5}$  y  $\sigma = 1 \times 10^{-7}$ ) respectivamente, no es lo suficientemente pequeña para hacer singular la matriz de ganancia, ya que la ponderación debe tomar en cuenta el error en la medición de ángulo provocado por el tiempo de sincronización en mediciones fasoriales. En cambio, la medición de magnitud de voltaje es más precisa porque en estado estable no depende de una referencia temporal, sino de las muestras de la señal de voltaje que se estén tomando en ese instante de tiempo.

(2) Las derivadas parciales de las mediciones de ángulo y magnitud de voltaje en un nodo son cero con respecto a todas las demás variables de estado. Esta situación provoca que una ponderación muy pequeña no afecte a los demás términos de la matriz de ganancia evitando la singularidad de ésta matriz. La ponderación afecta solamente a la medición de ángulo y magnitud de voltaje y no a las demás mediciones, como sucede con la ponderación de las mediciones de potencia en nodos con inyección cero.

En los casos de estudio se consideró un sistema que no tiene nodos con inyección <sup>®</sup> cero, medición que es exacta, por lo que su ponderación debe ser mayor. Para el estimador de estado convencional una ponderación menor a  $\sigma = 1 \times 10^{-7}$  provoca problemas graves de convergencia o el estimador no converge. Para evitar problemas de convergencia se podría aplicar una ponderación mayor a la medición de un nodo con inyección cero en el estimador convencional. El ajuste a valor cero de inyección de potencia es bueno con una ponderación en el rango ( $1 \times 10^{-5} \leq \sigma \leq 1 \times 10^{-7}$ ), limitando al estimador en la ponderación que se puede otorgar a una medición. Sin embargo, la estabilidad numérica que tiene el estimador por descomposición ortogonal para esta y otras condiciones que se presentan en un sistema eléctrico de potencia es mejor que el del estimador convencional.

Tabla 4.3.- Resultados caso (3) y caso (4) por Método Newton-Raphson.

Caso 3					Caso 4				
Valores estimados de las Variables de estado					Valores estimados de las Variables de estado				
N	V	A	Pne	Qne	N	V	A	Pne	Qne
1	1.0504	0.0000	1.0899	0.1786	1	1.0500	0.0000	1.0787	0.1596
2	1.0480	-0.0645	0.4730	0.6970	2	1.0500	-0.0641	0.5000	0.7436
3	1.0700	-0.0746	0.5998	0.8835	3	1.0700	-0.0746	0.6000	0.8963
4	0.9881	-0.0737	-0.7023	-0.7035	4	0.9894	-0.0732	-0.7000	-0.7000
5	0.9854	-0.0921	-0.6967	-0.6996	5	0.9854	-0.0921	-0.7000	-0.7000
6	1.0064	-0.1038	-0.6860	-0.6598	6	1.0044	-0.1038	-0.7000	-0.7000
Prueba de Hipótesis					Prueba de Hipótesis				
Factor J		Valor Xi2			Factor J		Valor Xi2		
48.0328		79.8052			41.4876		84.5540		
Porcentaje de la diferencia de medidos y estimados fuera de $1.2\sigma$ 17.1875%					Porcentaje de la diferencia de medidos y estimados fuera de $1.2\sigma$ 16.1765%				
	Per	Pre	Qer	Qre		Per	Pre	Qer	Qre
1-2	0.2936	-0.2844	-0.1449	0.1192	1-2	0.2869	-0.2778	-0.1542	0.1282
1-4	0.4398	-0.4286	0.2095	-0.2063	1-4	0.4358	-0.4250	0.2012	-0.1993
1-5	0.3565	-0.3457	0.1139	-0.1357	1-5	0.3560	-0.3453	0.1125	-0.1345
2-3	0.0256	-0.0252	-0.1300	0.0650	2-3	0.0293	-0.0289	-0.1227	0.0573
2-4	0.3271	-0.3123	0.4543	-0.4456	2-4	0.3309	-0.3159	0.4605	-0.4513
2-5	0.1513	-0.1466	0.1475	-0.1748	2-5	0.1551	-0.1502	0.1535	-0.1801
2-6	0.2534	-0.2482	0.1059	-0.1438	2-6	0.2625	-0.2567	0.1240	-0.1601
3-5	0.1912	-0.1802	0.2317	-0.2610	3-5	0.1912	-0.1802	0.2317	-0.2610
3-6	0.4338	-0.4242	-0.5868	-0.5607	3-6	0.4377	-0.4277	0.6072	-0.5786
4-5	0.0386	-0.0383	-0.0515	-0.0257	4-5	0.0408	-0.0405	-0.0494	-0.0279
5-6	0.0141	-0.0135	-0.1025	0.0447	5-6	0.0161	-0.0156	-0.0966	0.0387

Incluso teniendo mediciones fasoriales en todos los nodos del sistema se tiene una buena estimación y no se presentan problemas de convergencia. Más adelante se analiza la ventaja de contar con mediciones fasoriales en todos los nodos de la red.

#### 4.3.1.2 Resultados por Método Desacoplado Rápido

### DIRECCIÓN GENERAL DE BIBLIOTECAS

De igual manera tomando como base el sistema de la Fig. 2.1, considerando los casos mencionados en el punto anterior se emplea el Método Desacoplado Rápido para resolver la ecuación de estimación de estado incluyendo mediciones fasoriales.

Las características de convergencia del Método Desacoplado Rápido son muy parecidas al Método Newton-Raphson. No presenta problemas al combinar las mediciones fasoriales con ponderación pequeña con mediciones convencionales, las condiciones mencionadas en los puntos referente a la convergencia del algoritmo cuando hay mediciones fasoriales se aplican de igual manera a este método.

Tabla 4.4.- Resultados caso (1) y caso (2) por Método Desacoplado Rápido.

Caso 1					Caso 2				
Valores estimados de las Variables de estado					Valores estimados de las Variables de estado				
N	V	A	Pne	Qne	N	V	A	Pne	Qne
1	1.0504	0.0000	1.0903	0.1771	1	1.0504	0.0000	1.0903	0.1771
2	1.0482	-0.0647	0.4713	0.7003	2	1.0482	-0.0647	0.4713	0.7003
3	1.0700	<b>-0.0746</b>	<b>0.6006</b>	<b>0.8819</b>	3	1.0700	<b>-0.0746</b>	<b>0.6006</b>	<b>0.8819</b>
4	0.9882	-0.0737	-0.7016	-0.7032	4	0.9882	-0.0737	-0.7016	-0.7032
5	<b>0.9854</b>	<b>-0.0921</b>	<b>-0.6965</b>	<b>-0.7008</b>	5	<b>0.9854</b>	<b>-0.0921</b>	<b>-0.6965</b>	<b>-0.7008</b>
6	1.0065	-0.1038	-0.6864	-0.6591	6	1.0065	-0.1038	-0.6864	-0.6591
Prueba de Hipótesis					Prueba de Hipótesis				
Factor J		Valor Xi2			Factor J		Valor Xi2		
40.3998		79.8052			183.1577		79.8052		
Porcentaje de la diferencia de medidos y estimados fuera de $1.2\sigma$ 15.6250%					Porcentaje de la diferencia de medidos y estimados fuera de $1.2\sigma$ 18.7500%				
	Per	Pre	Qer	Qre		Per	Pre	Qer	Qre
1-2	0.2939	-0.2847	-0.1457	0.1201	1-2	0.2939	-0.2847	-0.1457	0.1201
1-4	0.4398	-0.4287	0.2089	-0.2058	1-4	0.4398	-0.4287	0.2089	-0.2058
1-5	0.3565	-0.3457	0.1140	-0.1358	1-5	0.3565	-0.3457	0.1140	-0.1358
2-3	0.0252	-0.0248	-0.1293	0.0642	2-3	0.0252	-0.0248	-0.1293	0.0642
2-4	0.3264	-0.3117	0.4550	-0.4462	2-4	0.3264	-0.3117	0.4550	-0.4462
2-5	0.1511	-0.1464	0.1481	-0.1754	2-5	0.1511	-0.1464	0.1481	-0.1754
2-6	0.2533	-0.2481	0.1064	-0.1442	2-6	0.2533	-0.2481	0.1064	-0.1442
3-5	0.1912	-0.1802	0.2317	-0.2610	3-5	0.1912	-0.1802	0.2317	-0.2610
3-6	0.4342	-0.4247	0.5859	-0.5599	3-6	0.4342	-0.4247	0.5859	-0.5599
4-5	0.0387	-0.0384	-0.0512	-0.0260	4-5	0.0387	-0.0384	-0.0512	-0.0260
5-6	0.0142	-0.0136	-0.1028	0.0450	5-6	0.0142	-0.0136	-0.1028	0.0450

Cuando se incluye en estimación de estado con el Método Desacoplado Rápido las mediciones de nodos con inyección cero, la ponderación debe estar en el rango  $(1 \times 10^{-5} \leq \sigma < 1 \times 10^{-7})$  para tener un buen ajuste de inyección de potencia cero en el nodo y evitar los problemas de convergencia, sin embargo también está limitado el algoritmo a tener una ponderación en mediciones menor a  $\sigma = 1 \times 10^{-8}$ .

DIRECCIÓN GENERAL DE BIBLIOTECAS

Tabla 4.5.- Resultados caso (3) y caso (4) por Método Desacoplado Rápido.

Caso 3					Caso 4				
Valores estimados de las Variables de estado					Valores estimados de las Variables de estado				
N	V	A	Pne	Qne	N	V	A	Pne	Qne
1	1.0491	0.0000	1.0857	0.1668	1	1.0500	0.0000	1.0787	0.1596
2	1.0476	-0.0648	0.4708	0.6996	2	1.0500	-0.0641	0.5000	0.7436
3	1.0700	-0.0746	0.6018	0.8845	3	1.0700	-0.0746	0.6000	0.8963
4	0.9873	-0.0738	-0.7022	-0.7042	4	0.9894	-0.0732	-0.7000	-0.7000
5	<b>0.9854</b>	<b>-0.0921</b>	<b>-0.6931</b>	<b>-0.6936</b>	5	<b>0.9854</b>	<b>-0.0921</b>	<b>-0.7000</b>	<b>-0.7000</b>
6	1.0064	-0.1038	-0.6856	-0.6573	6	1.0044	-0.1038	-0.7000	-0.7000
Prueba de Hipótesis					Prueba de Hipótesis				
Factor J		Valor Xi2			Factor J		Valor Xi2		
48.1932		79.8052			41.4876		84.5540		
Porcentaje de la diferencia de medidos y estimados fuera de $1.2\sigma$ 17.1875%					Porcentaje de la diferencia de medidos y estimados fuera de $1.2\sigma$ 16.1765%				

Tabla 4.5.- Continuación.

	Per	Pre	Qer	Qre		Per	Pre	Qer	Qre
1-2	0.2921	-0.2829	-0.1489	0.1234	1-2	0.2869	-0.2778	-0.1542	0.1282
1-4	0.4387	-0.4276	0.2062	-0.2033	1-4	0.4358	-0.4250	0.2012	-0.1993
1-5	0.3549	-0.3443	0.1095	-0.1317	1-5	0.3560	-0.3453	0.1125	-0.1345
2-3	0.0244	-0.0239	-0.1314	0.0665	2-3	0.0293	-0.0289	-0.1227	0.0573
2-4	0.3272	-0.3123	0.4572	-0.4482	2-4	0.3309	-0.3159	0.4605	-0.4513
2-5	0.1502	-0.1455	0.1464	-0.1738	2-5	0.1551	-0.1502	0.1535	-0.1801
2-6	0.2520	-0.2469	0.1040	-0.1421	2-6	0.2625	-0.2567	0.1240	-0.1601
3-5	0.1912	-0.1802	0.2317	-0.2610	3-5	0.1912	-0.1802	0.2317	-0.2610
3-6	0.4346	-0.4250	0.5863	-0.5602	3-6	0.4377	-0.4277	0.6072	-0.5786
4-5	0.0377	-0.0374	-0.0528	-0.0244	4-5	0.0408	-0.0405	-0.0494	-0.0279
5-6	0.0143	-0.0138	-0.1027	0.0449	5-6	0.0161	-0.0156	-0.0966	0.0387

Las ventajas y posibles desventajas que presenta incluir mediciones fasoriales sincronizadas en el proceso de estimación y contar con un sistema que tiene nodos con inyección cero se analizarán en el punto siguiente.

Tabla 4.6.- Tabla de comparación entre Método Newton-Raphson y Método Desacoplado Rápido.

	Newton-Raphson			Desacoplado Rápido		
	Iteraciones	$\sum P_{Nodales}$	$\sum Q_{Nodales}$	Iteraciones	$\sum P_{Nodales}$	$\sum Q_{Nodales}$
Caso 1	3	0.0779	-0.3032	4	0.0777	-0.3039
Caso 2	3	0.0779	-0.3032	4	0.0777	-0.3039
Caso 3	3	0.0777	-0.3038	4	0.0775	-0.3044
Caso 4	2	0.0788	-0.3006	2	0.0788	-0.3006

Los métodos aplicados presentan características de convergencia similares, son aceptables para presentar una solución a la ecuación de estimación con las restricciones consideradas. Los dos métodos son eficientes y confiables para ser aplicados de manera práctica. La desventaja del método de Newton-Raphson es el mayor tiempo de ejecución del algoritmo con respecto al método Desacoplado Rápido. Y la desventaja del método Desacoplado Rápido es que la estabilidad numérica es inferior al método de Newton-Raphson.

### 4.3.2 Estimación de estado por descomposición ortogonal con MFS

Se presentan resultados del estimador que utiliza descomposición ortogonal con el Método Newton-Raphson y el Método Desacoplado Rápido.

### 4.3.2.1 Resultados con el Método de Newton-Raphson

Para el sistema de la figura 4.5 se realiza la estimación de estado por descomposición ortogonal para los casos: (1) se tiene error aleatorio en todas las mediciones dentro del rango  $\pm 3\sigma$ ; (2) similar a (1) pero con la medición de potencia activa y potencia reactiva del nodo 3-4 invertida; (3) similar a (2) pero con la medición de potencia activa y reactiva del nodo 3-4 eliminadas; (4) similar a (1) pero con la medición de potencia activa y potencia reactiva de 11-3 fuera del rango de  $\pm 3\sigma$ . Para los 4 casos se cuenta con medición fasorial en los nodos 1, 11 y 12, se considera que no tienen error, y sus valores se tomaron del caso base de flujos.

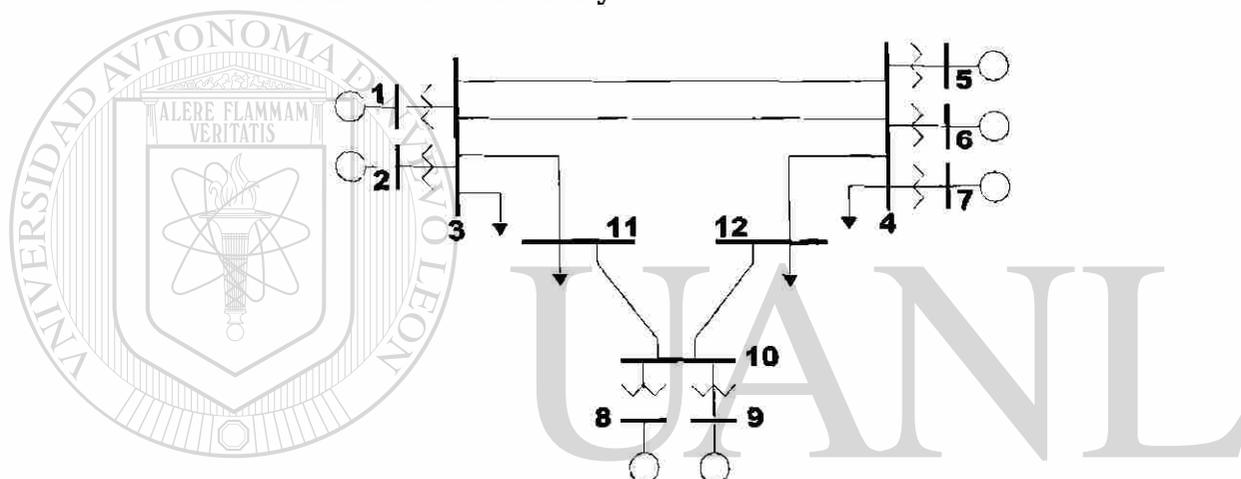


Figura 4.5.- Sistema de prueba 4 para estimación de estado.

Tabla 4.7.- Resultados para caso (1) y caso (2) por Método Newton-Raphson.

Caso 1					Caso 2				
Valores estimados de las Variables de estado					Valores estimados de las Variables de estado				
N	V	A	Pne	Qne	N	V	A	Pne	Qne
1	1.0200	0.0000	2.0327	0.1360	1	1.0200	0.0000	1.9908	0.1490
2	1.0200	-0.0009	2.0102	0.1352	2	1.0194	-0.0023	1.9308	0.1288
3	1.0178	-0.0784	-0.3110	-0.1012	3	1.0172	-0.0768	-0.5509	-0.1089
4	1.0059	-0.2807	-4.4838	-0.7714	4	1.0024	-0.2493	-4.2266	-0.8515
5	1.0215	-0.2422	0.9890	0.4158	5	1.0169	-0.2071	1.0763	0.3923
6	1.0215	-0.2422	0.9890	0.4158	6	1.0169	-0.2071	1.0763	0.3923
7	1.0215	-0.2422	0.9890	0.4158	7	1.0169	-0.2071	1.0763	0.3923
8	1.0208	-0.0999	1.2342	0.2710	8	1.0217	-0.1035	1.2192	0.2732
9	1.0200	-0.0991	1.2535	0.2501	9	1.0208	-0.1027	1.2386	0.2523
10	1.0113	-0.1477	0.0000	0.0000	10	1.0121	-0.1507	0.0000	0.0000
11	0.9564	-0.2804	-1.9919	-0.5053	11	0.9564	-0.2804	-1.9843	-0.5076
12	0.9346	-0.4316	-2.4893	-0.4617	12	0.9346	-0.4316	-2.6380	-0.3995
Prueba de Hipótesis					Prueba de Hipótesis				
Factor J		Valor Xi2			Factor J		Valor Xi2		
72.5095		95.0425			2456.3775		95.0425		

Tabla 4.7.- Continuación

Porcentaje de la diferencia de medidos y estimados fuera de $1.2\sigma$ 18.6813%					Porcentaje de la diferencia de medidos y estimados fuera de $1.2\sigma$ 36.2637%				
	Per	Pre	Qer	Qre		Per	Pre	Qer	Qre
1-3	2.0327	-2.0327	0.1360	0.0235	1-3	1.9908	-1.9908	0.1490	0.0042
2-3	2.0102	-2.0102	0.1352	0.0208	2-3	1.9308	-1.9308	0.1288	0.0154
5-4	0.9890	-0.9890	0.4158	-0.3717	5-4	1.0763	-1.0763	0.3923	-0.3415
6-4	0.9890	-0.9890	0.4158	-0.3717	6-4	1.0763	-1.0763	0.3923	-0.3415
7-4	0.9890	-0.9890	0.4158	-0.3717	7-4	1.0763	-1.0763	0.3923	-0.3415
8-10	1.2342	-1.2342	0.2710	-0.2097	8-10	1.2192	-1.2192	0.2732	-0.2134
9-10	1.2535	-1.2535	0.2501	-0.1873	9-10	1.2386	-1.2386	0.2523	-0.1909
3-4	1.2502	-1.2138	-0.1492	0.0695	3-4	1.0657	-1.0392	-0.1390	-0.0071
3-4	1.2502	-1.2138	-0.1492	0.0695	3-4	1.0657	-1.0392	-0.1390	-0.0071
3-11	1.2315	-1.1938	0.1528	-0.2081	3-11	1.2393	-1.2012	0.1495	-0.2016
4-12	0.9109	-0.8879	0.2047	-0.3500	4-12	1.0808	-1.0498	0.1873	-0.2770
10-11	0.8155	-0.7981	0.1052	-0.2971	10-11	0.8000	-0.7831	0.1101	-0.3060
10-12	1.6722	-1.6014	0.2917	-0.1117	10-12	1.6578	-1.5882	0.2942	-0.1225

En el caso (1) se observa que las mediciones fasoriales ayudan a mejorar el estimado, sin embargo para el caso (2) la estimación no es buena ya que se cuenta con 2 mediciones con error anormal lejos de los nodos donde hay presencia de mediciones fasoriales sincronizadas.

En este caso es necesario identificar y eliminar las mediciones con error anormal, correr el estimador y esperar que el estimado cumpla los requerimientos de validación de la información para ser aplicada por los operadores en los centros de control en diferentes estudios de interés.

Tabla 4.8.- Resultados para caso (3) y caso (4) por Método Newton-Raphson.

Caso 3					Caso 4				
Valores estimados de las Variables de estado					Valores estimados de las Variables de estado				
N	V	A	Pne	Qne	N	V	A	Pne	Qne
1	1.0200	0.0000	2.0332	0.1367	1	1.0200	0.0000	2.0375	0.1491
2	1.0201	-0.0008	2.0115	0.1375	2	1.0194	-0.0011	2.0087	0.1317
3	1.0178	-0.0784	-0.3064	-0.0947	3	1.0173	-0.0786	-0.3165	-0.1117
4	1.0052	-0.2813	-4.4894	-0.7771	4	1.0054	-0.2811	-4.4857	-0.7733
5	1.0206	-0.2428	0.9873	0.4140	5	1.0209	-0.2426	0.9884	0.4153
6	1.0206	-0.2428	0.9873	0.4140	6	1.0209	-0.2426	0.9884	0.4153
7	1.0206	-0.2428	0.9873	0.4140	7	1.0209	-0.2426	0.9884	0.4153
8	1.0209	-0.0999	1.2345	0.2713	8	1.0209	-0.0999	1.2345	0.2714
9	1.0200	-0.0991	1.2537	0.2504	9	1.0200	-0.0991	1.2538	0.2505
10	1.0114	-0.1477	0.0000	0.0000	10	1.0114	-0.1477	-0.0000	0.0000
11	0.9564	-0.2804	-1.9920	-0.5054	11	0.9564	-0.2804	-1.9900	-0.5033
12	0.9346	-0.4316	-2.4851	-0.4588	12	0.9346	-0.4316	-2.4863	-0.4597
Prueba de Hipótesis					Prueba de Hipótesis				
Factor J		Valor $\chi^2$			Factor J		Valor $\chi^2$		
70.3834		93.6075			88.1735		95.0425		

Tabla 4.8.- Continuación

Porcentaje de la diferencia de medidos y estimados fuera de $1.2\sigma$ 17.9775%					Porcentaje de la diferencia de medidos y estimados fuera de $1.2\sigma$ 20.8791%				
	Per	Pre	Qer	Qre		Per	Pre	Qer	Qre
1-3	2.0332	-2.0332	0.1367	0.0230	1-3	2.0375	-2.0375	0.1491	0.0113
2-3	2.0115	-2.0115	0.1375	0.0188	2-3	2.0087	-2.0087	0.1317	0.0242
5-4	0.9873	-0.9873	0.4140	-0.3700	5-4	0.9884	-0.9884	0.4153	-0.3712
6-4	0.9873	-0.9873	0.4140	-0.3700	6-4	0.9884	-0.9884	0.4153	-0.3712
7-4	0.9873	-0.9873	0.4140	-0.3700	7-4	0.9884	-0.9884	0.4153	-0.3712
8-10	1.2345	-1.2345	0.2713	-0.2100	8-10	1.2345	-1.2345	0.2714	-0.2101
9-10	1.2537	-1.2537	0.2504	-0.1875	9-10	1.2538	-1.2538	0.2505	-0.1876
3-4	1.2535	-1.2169	-0.1445	0.0664	3-4	1.2503	-1.2139	-0.1485	0.0694
3-4	1.2535	-1.2169	-0.1445	0.0664	3-4	1.2503	-1.2139	-0.1485	0.0694
3-11	1.2313	-1.1936	0.1526	-0.2081	3-11	1.2291	-1.1916	0.1497	-0.2059
4-12	0.9062	-0.8835	0.2002	-0.3469	4-12	0.9074	-0.8846	0.2013	-0.3477
10-11	0.8158	-0.7984	0.1055	-0.2973	10-11	0.8158	-0.7984	0.1056	-0.2974
10-12	1.6725	-1.6016	0.2920	-0.1119	10-12	1.6725	-1.6017	0.2921	-0.1120

El estimador no presentó problemas de convergencia en los casos presentados. Sin embargo, una característica importante que se debe observar es que el índice  $J(x)$ , con la presencia de mediciones fasoriales muy precisas no necesariamente debe reducirse, incluso se encontró que el índice puede ser un poco mayor, lo que pareciera indicar que la estimación es mala. Pero en realidad la estimación obtenida es mejor si se comparan los resultados con respecto al caso base ideal (mediciones sin error).

Los resultados también muestran que las mediciones fasoriales ayudan al estimado en menor medida cuando éstas no se ubican en nodos donde existen mediciones convencionales con errores anormales. Esta es la situación del caso 2 donde con la medición invertida del flujo entre los nodos 3-4, la estimación es mala y es necesario eliminar mediciones del proceso de estimación. También en el caso 4, con dos mediciones convencionales con error superior a  $\pm 5\sigma$  las mediciones necesitan ser eliminadas para aceptar el estimado.

Ahora se analiza el caso donde la medición convencional errónea se encuentra entre nodos donde hay mediciones fasoriales sincronizadas. En el caso (5) existen errores aleatorios en todas las mediciones dentro del rango  $\pm 3\sigma$  y la medición de potencia activa y potencia reactiva de 3-4 está invertida, el caso (6) similar a (5) pero con las mediciones de potencia activa y potencia reactiva de 3-4 eliminadas.

Tabla 4.9.- Resultados para caso (5) y caso (6) por Método Newton-Raphson.

Caso 5					Caso 6				
Valores estimados de las Variables de estado					Valores estimados de las Variables de estado				
N	V	A	Pne	Qne	N	V	A	Pne	Qne
1	1.0200	0.0000	2.0221	0.1387	1	1.0200	0.0000	2.0221	0.1387
2	1.0197	-0.0005	2.0098	0.1311	2	1.0197	-0.0005	2.0098	0.1311
3	1.0177	-0.0780	-0.3136	-0.1137	3	1.0177	-0.0780	-0.3136	-0.1137
4	1.0050	-0.2794	-4.4824	-0.7912	4	1.0050	-0.2794	-4.4824	-0.7912
5	1.0203	-0.2408	0.9898	0.4095	5	1.0203	-0.2408	0.9898	0.4095
6	1.0203	-0.2408	0.9898	0.4095	6	1.0203	-0.2408	0.9898	0.4095
7	1.0203	-0.2408	0.9898	0.4095	7	1.0203	-0.2408	0.9898	0.4095
8	1.0243	-0.1002	1.2342	0.2710	8	1.0243	-0.1002	1.2342	0.2710
9	1.0235	-0.0994	1.2535	0.2501	9	1.0235	-0.0994	1.2535	0.2501
10	1.0149	-0.1477	0.0000	0.0000	10	1.0149	-0.1477	0.0000	0.0000
11	0.9598	-0.2796	-1.9917	-0.4903	11	0.9598	-0.2796	-1.9917	-0.4903
12	0.9378	-0.4293	-2.4821	-0.4481	12	0.9378	-0.4293	-2.4821	-0.4481
Prueba de Hipótesis					Prueba de Hipótesis				
Factor J					Factor J				
Valor $\chi^2$					Valor $\chi^2$				
2626.3849					69.0735				
95.0425					93.6075				
Porcentaje de la diferencia de medidos y estimados fuera de $1.2\sigma$ 16.4835%					Porcentaje de la diferencia de medidos y estimados fuera de $1.2\sigma$ 14.6067%				
	Per	Pre	Qer	Qre		Per	Pre	Qer	Qre
1-3	-2.0221	-2.0221	0.1387	0.0193	1-3	2.0221	-2.0221	0.1387	0.0193
2-3	2.0098	-2.0098	0.1311	0.0250	2-3	2.0098	-2.0098	0.1311	0.0250
5-4	0.9898	-0.9898	0.4095	-0.3654	5-4	0.9898	-0.9898	0.4095	-0.3654
6-4	0.9898	-0.9898	0.4095	-0.3654	6-4	0.9898	-0.9898	0.4095	-0.3654
7-4	0.9898	-0.9898	0.4095	-0.3654	7-4	0.9898	-0.9898	0.4095	-0.3654
8-10	1.2342	-1.2342	0.2710	-0.2101	8-10	1.2342	-1.2342	0.2710	-0.2101
9-10	1.2535	-1.2535	0.2501	-0.1877	9-10	1.2535	-1.2535	0.2501	-0.1877
3-4	1.2443	-1.2082	-0.1444	0.0628	3-4	1.2443	-1.2082	-0.1444	0.0628
3-4	1.2443	-1.2082	-0.1444	0.0628	3-4	1.2443	-1.2082	-0.1444	0.0628
3-11	1.2298	-1.1925	0.1310	-0.1901	3-11	1.2298	-1.1925	0.1310	-0.1901
4-12	0.9035	-0.8812	0.1793	-0.3301	4-12	0.9035	-0.8812	0.1793	-0.3301
10-11	0.8165	-0.7992	0.1057	-0.3002	10-11	0.8165	-0.7992	0.1057	-0.3002
10-12	1.6711	-1.6008	0.2921	-0.1180	10-12	1.6711	-1.6008	0.2921	-0.1180

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN

Como se comentó anteriormente el índice  $J(x)$  al utilizar mediciones fasoriales muy

precisas cambia su significado respecto a lo que se ha venido aplicando a través de los años. En el caso 5 se observa que el índice  $J(x)$  es muy grande, sin embargo al momento de eliminar la medición errónea, el estimado obtenido no cambia, es exactamente el mismo, por lo que para este caso es innecesario el proceso de detección, identificación y eliminación de la medición con error anormal. Además se observa en los porcentajes entre valores medidos y estimados fuera del rango  $\pm 1.2\sigma$ , que estos dan normales de acuerdo a los errores obtenidos con mediciones convencionales. En los casos 5 y 6 los porcentajes son parecidos excepto que en el caso 6 ya no se toma en cuenta las mediciones eliminadas. Incluso si se toma las dos mediciones de potencia

activa y las dos mediciones de potencia reactiva que van del nodo 3-4 invertidas, el estimado da exactamente el mismo.

De esta forma se establece que el estimado se acepta, aún y cuando una medición convencional de muy mala calidad (error anormal) se encuentra entre nodos que cuentan con medición fasorial, sin importar que el índice  $J(x)$  sea mayor que el valor de la distribución  $\chi^2$ . Por lo que es necesario utilizar otro criterio de aceptación de la estimación, que en el caso de estudio se aplica el porcentaje fuera del rango  $\pm 1.2\sigma$ .

#### 4.3.2.2 Resultados con el Método Desacoplado Rápido

Ahora se realizan los casos que se plantean en el punto anterior utilizando el Método Desacoplado Rápido por descomposición ortogonal, para analizar y establecer el impacto que tienen las mediciones fasoriales sincronizadas dentro del proceso de estimación de estado.

Tabla 4.10.- Resultados para caso (1) y caso (2) por Método Desacoplado Rápido.

Caso 1					Caso 2				
Valores estimados de las Variables de estado					Valores estimados de las Variables de estado				
N	V	A	Pne	Qne	N	V	A	Pne	Qne
1	1.0200	0.0000	2.0266	0.1348	1	1.0200	0.0000	1.9903	0.1193
2	1.0201	-0.0006	2.0116	0.1352	2	1.0204	-0.0026	1.9235	0.1255
3	1.0178	-0.0782	-0.3046	-0.1015	3	1.0183	-0.0767	-0.5689	-0.1170
4	1.0060	-0.2804	-4.4807	-0.7694	4	1.0072	-0.2464	-4.1965	-0.8176
5	1.0216	-0.2420	0.9884	0.4157	5	1.0220	-0.2042	1.0841	0.4018
6	1.0216	-0.2420	0.9884	0.4157	6	1.0220	-0.2042	1.0841	0.4018
7	1.0216	-0.2420	0.9884	0.4157	7	1.0220	-0.2042	1.0841	0.4018
8	1.0211	-0.0991	1.2367	0.2724	8	1.0217	-0.1031	1.2192	0.2733
9	1.0203	-0.0982	1.2602	0.2528	9	1.0209	-0.1022	1.2428	0.2536
10	1.0116	-0.1470	0.0000	0.0000	10	1.0122	-0.1503	-0.0000	-0.0000
11	0.9564	-0.2804	-1.9977	-0.5051	11	0.9564	-0.2804	-1.9892	-0.5134
12	0.9346	-0.4316	-2.4950	-0.4614	12	0.9346	-0.4316	-2.6644	-0.4192
Prueba de Hipótesis					Prueba de Hipótesis				
Factor J      Valor $\chi^2$					Factor J      Valor $\chi^2$				
72.7160      95.0425					2461.8724      95.0425				
Porcentaje de la diferencia de medidos y estimados fuera de $1.2\sigma$ 16.4835%					Porcentaje de la diferencia de medidos y estimados fuera de $1.2\sigma$ 31.8681%				
	Per	Pre	Qer	Qre		Per	Pre	Qer	Qre
1-3	2.0266	-2.0266	0.1348	0.0238	1-3	1.9903	-1.9903	0.1193	0.0335
2-3	2.0116	-2.0116	0.1352	0.0210	2-3	1.9235	-1.9235	0.1255	0.0172
5-4	0.9884	-0.9884	0.4157	-0.3716	5-4	1.0841	-1.0841	0.4018	-0.3506
6-4	0.9884	-0.9884	0.4157	-0.3716	6-4	1.0841	-1.0841	0.4018	-0.3506
7-4	0.9884	-0.9884	0.4157	-0.3716	7-4	1.0841	-1.0841	0.4018	-0.3506

Tabla 4.10.- Continuación

8-10	1.2367	-1.2367	0.2724	-0.2109	8-10	1.2192	-1.2192	0.2733	-0.2134
9-10	1.2602	-1.2602	0.2528	-0.1893	9-10	1.2428	-1.2428	0.2536	-0.1919
3-4	1.2504	-1.2140	-0.1497	0.0700	3-4	1.0512	-1.0255	-0.1621	0.0087
3-4	1.2504	-1.2140	-0.1497	0.0700	3-4	1.0512	-1.0255	-0.1621	0.0087
3-11	1.2329	-1.1951	0.1530	-0.2078	3-11	1.2424	-1.2040	0.1565	-0.2076
4-12	0.9124	-0.8894	0.2054	-0.3502	4-12	1.1069	-1.0743	0.2168	-0.2971
10-11	0.8201	-0.8025	0.1065	-0.2972	10-11	0.8021	-0.7851	0.1104	-0.3058
10-12	1.6768	-1.6056	0.2937	-0.1112	10-12	1.6599	-1.5901	0.2949	-0.1221

Las características de convergencia del Método Desacoplado Rápido son similares al Método de Newton-Raphson, aunque los resultados no resultan ser idénticos. El comportamiento del estimador desacoplado con la presencia de mediciones fasoriales es igual al estimador de Newton-Raphson, de nuevo se observa que la medición fasorial ayuda al proceso de estimación.

Tabla 4.11.- Resultados para caso (3) y caso (4) por Método Desacoplado Rápido.

Caso 3					Caso 4				
Valores estimados de las Variables de estado					Valores estimados de las Variables de estado				
N	V	A	Pne	Qne	N	V	A	Pne	Qne
1	1.0200	0.0000	2.0267	0.1358	1	1.0200	0.0000	2.0360	0.1469
2	1.0201	-0.0005	2.0128	0.1374	2	1.0195	-0.0010	2.0081	0.1321
3	1.0178	-0.0782	-0.3011	-0.0951	3	1.0174	-0.0786	-0.3152	-0.1108
4	1.0052	-0.2809	-4.4851	-0.7756	4	1.0055	-0.2809	-4.4817	-0.7715
5	1.0207	-0.2424	0.9869	0.4137	5	1.0210	-0.2424	0.9880	0.4150
6	1.0207	-0.2424	0.9869	0.4137	6	1.0210	-0.2424	0.9880	0.4150
7	1.0207	-0.2424	0.9869	0.4137	7	1.0210	-0.2424	0.9880	0.4150
8	1.0211	-0.0991	1.2371	0.2728	8	1.0212	-0.0990	1.2373	0.2729
9	1.0203	-0.0981	1.2606	0.2532	9	1.0203	-0.0981	1.2608	0.2532
10	1.0116	-0.1470	-0.0000	-0.0000	10	1.0116	-0.1469	-0.0000	-0.0000
11	0.9564	-0.2804	-1.9979	-0.5051	11	0.9564	-0.2804	-1.9951	-0.5036
12	0.9346	-0.4316	-2.4915	-0.4580	12	0.9346	-0.4316	-2.4922	-0.4595
Prueba de Hipótesis Factor J      Valor $\chi^2$ 70.6025      93.6075					Prueba de Hipótesis Factor J      Valor $\chi^2$ 88.3349      95.0425				
Porcentaje de la diferencia de medidos y estimados fuera de $1.2\sigma$ 17.9775%					Porcentaje de la diferencia de medidos y estimados fuera de $1.2\sigma$ 20.8791%				
	Per	Pre	Qer	Qre		Per	Pre	Qer	Qre
1-3	2.0267	-2.0267	0.1358	0.0228	1-3	2.0360	-2.0360	0.1469	0.0133
2-3	2.0128	-2.0128	0.1374	0.0190	2-3	2.0081	-2.0081	0.1321	0.0238
5-4	0.9869	-0.9869	0.4137	-0.3697	5-4	0.9880	-0.9880	0.4150	-0.3710
6-4	0.9869	-0.9869	0.4137	-0.3697	6-4	0.9880	-0.9880	0.4150	-0.3710
7-4	0.9869	-0.9869	0.4137	-0.3697	7-4	0.9880	-0.9880	0.4150	-0.3710
8-10	1.2371	-1.2371	0.2728	-0.2113	8-10	1.2373	-1.2373	0.2729	-0.2113
9-10	1.2606	-1.2606	0.2532	-0.1897	9-10	1.2608	-1.2608	0.2532	-0.1897
3-4	1.2528	-1.2163	-0.1448	0.0665	3-4	1.2497	-1.2133	-0.1490	0.0696
3-4	1.2528	-1.2163	-0.1448	0.0665	3-4	1.2497	-1.2133	-0.1490	0.0696
3-11	1.2328	-1.1950	0.1528	-0.2076	3-11	1.2296	-1.1921	0.1502	-0.2062
4-12	0.9083	-0.8855	0.2005	-0.3467	4-12	0.9089	-0.8860	0.2022	-0.3482
10-11	0.8204	-0.8028	0.1069	-0.2975	10-11	0.8207	-0.8030	0.1068	-0.2974
10-12	1.6772	-1.6060	0.2941	-0.1114	10-12	1.6774	-1.6062	0.2941	-0.1113

En el caso (1) mejora la estimación la presencia de mediciones fasoriales. Sin embargo para el caso (2) las mediciones fasoriales sincronizadas no ayudan a mejorar la estimación ya que se cuenta con dos mediciones de flujo de potencia con alto error en nodos donde no hay presencia de mediciones fasoriales, por lo que es necesario eliminarlas del proceso de estimación (caso (3)). En el caso (4) aunque la estimación pareciera no ser buena, la estimación es mejor que si no se contara con mediciones fasoriales sincronizadas y se compararan los resultados con respecto al caso base ideal (mediciones sin error). El contar con dos mediciones convencionales con error superior a  $\pm 5\sigma$  afecta la estimación de estado por lo que deben ser eliminadas para aceptar el estimado.

Enseguida se presentan los resultados para los casos (5) y (6) del punto anterior, con el Método Desacoplado Rápido. Se analiza la ventaja de contar con mediciones fasoriales y que entre sus nodos existan mediciones convencionales con alto error, y vemos su impacto en el índice  $J(x)$ , y se presenta la prueba de detección e identificación de errores, así como el criterio del porcentaje fuera del rango  $\pm 1.2\sigma$ .

Tabla 4.12.- Resultados para caso (5) y caso (6) por Método Desacoplado Rápido.

Caso 5					Caso 6				
Valores estimados de las Variables de estado					Valores estimados de las Variables de estado				
N	V	A	Pne	Qne	N	V	A	Pne	Qne
1	1.0200	0.0000	2.0221	0.1387	1	1.0200	0.0000	2.0221	0.1387
2	1.0198	-0.0004	2.0107	0.1328	2	1.0198	-0.0004	2.0107	0.1328
3	1.0177	-0.0780	-0.3076	-0.1087	3	1.0177	-0.0780	-0.3076	-0.1087
4	1.0050	-0.2794	-4.4750	-0.7859	4	1.0050	-0.2794	-4.4750	-0.7859
5	1.0203	-0.2408	0.9904	0.4103	5	1.0203	-0.2408	0.9904	0.4103
6	1.0203	-0.2408	0.9904	0.4103	6	1.0203	-0.2408	0.9904	0.4103
7	1.0203	-0.2408	0.9904	0.4103	7	1.0203	-0.2408	0.9904	0.4103
8	1.0235	-0.1003	1.2363	0.2729	8	1.0235	-0.1003	1.2363	0.2729
9	1.0227	-0.0994	1.2598	0.2532	9	1.0227	-0.0994	1.2598	0.2532
10	1.0140	-0.1480	0.0000	0.0000	10	1.0140	-0.1480	0.0000	0.0000
11	0.9588	-0.2808	-2.0021	-0.4921	11	0.9588	-0.2808	-2.0021	-0.4921
12	0.9366	-0.4309	-2.4945	-0.4506	12	0.9366	-0.4309	-2.4945	-0.4506
Prueba de Hipótesis					Prueba de Hipótesis				
Factor J					Factor J				
2626.8202					69.5156				
Valor $\chi^2$					Valor $\chi^2$				
95.0425					93.6075				
Porcentaje de la diferencia de medidos y estimados fuera de $1.2\sigma$ 15.3846%					Porcentaje de la diferencia de medidos y estimados fuera de $1.2\sigma$ 13.4831%				
	Per	Pre	Qer	Qre		Per	Pre	Qer	Qre
1-3	2.0221	-2.0221	0.1387	0.0193	1-3	2.0221	-2.0221	0.1387	0.0193
2-3	2.0107	-2.0107	0.1328	0.0233	2-3	2.0107	-2.0107	0.1328	0.0233
5-4	0.9904	-0.9904	0.4103	-0.366	5-4	0.9904	-0.9904	0.4103	-0.3661

Tabla 4.12.- Continuación

6-4	0.9904	-0.9904	0.4103	-0.3661	6-4	0.9904	-0.9904	0.4103	-0.3661
7-4	0.9904	-0.9904	0.4103	-0.3661	7-4	0.9904	-0.9904	0.4103	-0.3661
8-10	1.2363	-1.2363	0.2729	-0.2117	8-10	1.2363	-1.2363	0.2729	-0.2117
9-10	1.2598	-1.2598	0.2532	-0.1901	9-10	1.2598	-1.2598	0.2532	-0.1901
3-4	1.2443	-1.2082	-0.1444	0.0628	3-4	1.2443	-1.2082	-0.1444	0.0628
3-4	1.2443	-1.2082	-0.1444	0.0628	3-4	1.2443	-1.2082	-0.1444	0.0628
3-11	1.2367	-1.1990	0.1376	-0.1930	3-11	1.2367	-1.1990	0.1376	-0.1930
4-12	0.9127	-0.8899	0.1869	-0.3337	4-12	0.9127	-0.8899	0.1869	-0.3337
10-11	0.8207	-0.8031	0.1065	-0.2991	10-11	0.8207	-0.8031	0.1065	-0.2991
10-12	1.6754	-1.6046	0.2953	-0.1169	10-12	1.6754	-1.6046	0.2953	-0.1169

El impacto que tiene una medición convencional con error anormal sobre el índice  $J(x)$  depende generalmente de dos condiciones: (1) si el error es grande el impacto será grande y (2) si la línea de transmisión o transformador transporta mucho flujo de potencia el impacto será mayor que cuando transporte poco flujo.

Para el caso 5, la presencia de mediciones fasoriales sincronizadas no evita que el índice  $J(x)$  sea menor, aunque el estimado resulte idéntico después de realizar el proceso de detección, identificación y eliminación de las mediciones convencionales con error anormal y se corra de nuevo el estimador.

Esta condición justifica el nuevo criterio de aceptación del estimado, el porcentaje de mediciones fuera del rango  $\pm 1.2\sigma$ , entre valor medido menos valor estimado. Se observa en los resultados que una medición con error anormal tiene impacto sobre sus mediciones cercanas, sacándolas de este rango.

#### DIRECCIÓN GENERAL DE BIBLIOTECAS

La medición fasorial evita este efecto, un grado que depende del error de la medición convencional y la lejanía del nodo donde está presente una medición fasorial. El mejor efecto se logra cuando entre dos mediciones fasoriales se encuentra la medición convencional errónea, y aunque sea de muy mala calidad (error grande), el estimado es bueno sin importar el índice  $J(x)$  que se obtenga al final del proceso de estimación.

Tabla 4.13.- Tabla de comparación entre Método Newton-Raphson y Método Desacoplado Rápido.

	Newton-Raphson			Desacoplado Rápido		
	Iteraciones	$\sum P_{Nodales}$	$\sum Q_{Nodales}$	Iteraciones	$\sum P_{Nodales}$	$\sum Q_{Nodales}$
Caso 1	3	0.2217	0.2002	4	0.2224	0.2049
Caso 2	3	0.2086	0.1126	4	0.2090	0.1099
Caso 3	3	0.2219	0.2019	4	0.2225	0.2064
Caso 4	3	0.2215	0.2006	4	0.2221	0.2048
Caso 5	3	0.2193	0.1759	5	0.2211	0.1912
Caso 6	3	0.2193	0.1759	5	0.2211	0.1912

#### 4.4 Sistema de potencia con MFS en todos los nodos

Ahora se presentan los resultados del estimador que utiliza descomposición ortogonal empleando mediciones fasoriales en todos los nodos y mediciones convencionales de flujo e inyección de potencia activa y reactiva y magnitudes de voltaje. Para este caso de estudio se aplica el modelo no lineal de estimación de estado con el método de Newton-Raphson y el método Desacoplado Rápido.

La estimación de estado considerando mediciones fasoriales en todos los nodos presenta la posibilidad de acercarse más al valor verdadero de flujo e inyección de potencia que se tiene en el sistema eléctrico.

Tabla 4.14.- Resultados para caso con MFS en todos los nodos.

Newton-Raphson					Desacoplado Rápido				
Valores estimados de las Variables de estado					Valores estimados de las Variables de estado				
N	V	A	Pne	Qne	N	V	A	Pne	Qne
1	1.0200	0.0000	2.0221	0.1387	1	1.0200	0.0000	2.0221	0.1387
2	1.0200	-0.0009	2.0000	0.1370	2	1.0200	-0.0009	2.0000	0.1370
3	1.0177	-0.0780	-0.3000	-0.1000	3	1.0177	-0.0780	-0.3000	-0.1000
4	1.0050	-0.2794	-4.5000	-0.7500	4	1.0050	-0.2794	-4.5000	-0.7500
5	1.0200	-0.2404	1.0000	0.4029	5	1.0200	-0.2404	1.0000	0.4029
6	1.0200	-0.2404	1.0000	0.4029	6	1.0200	-0.2404	1.0000	0.4029
7	1.0200	-0.2404	1.0000	0.4029	7	1.0200	-0.2404	1.0000	0.4029
8	1.0200	-0.0980	1.2500	0.2596	8	1.0200	-0.0980	1.2500	0.2596
9	1.0200	-0.0980	1.2500	0.2596	9	1.0200	-0.0980	1.2500	0.2596
10	1.0110	-0.1466	-0.0000	0.0000	10	1.0110	-0.1466	-0.0000	0.0000
11	0.9564	-0.2804	-2.0000	-0.5000	11	0.9564	-0.2804	-2.0000	-0.5000
12	0.9346	-0.4316	-2.5000	-0.4500	12	0.9346	-0.4316	-2.5000	-0.4500
Prueba de Hipótesis					Prueba de Hipótesis				
Factor J		Valor Xi2			Factor J		Valor Xi2		
70.5303		98.5250			70.5684		98.5250		
Porcentaje de la diferencia de medidos y estimados fuera de $1.2\sigma$ 14.0000%					Porcentaje de la diferencia de medidos y estimados fuera de $1.2\sigma$ 14.0000%				

Tabla 4.14.- Continuación

	Per	Pre	Qer	Qre		Per	Pre	Qer	Qre
1-3	2.0221	-2.0221	0.1387	0.0193	1-3	2.0221	-2.0221	0.1387	0.0193
2-3	2.0000	-2.0000	0.1370	0.0175	2-3	2.0000	-2.0000	0.1370	0.0175
5-4	1.0000	-1.0000	0.4029	-0.3582	5-4	1.0000	-1.0000	0.4029	-0.3582
6-4	1.0000	-1.0000	0.4029	-0.3582	6-4	1.0000	-1.0000	0.4029	-0.3582
7-4	1.0000	-1.0000	0.4029	-0.3582	7-4	1.0000	-1.0000	0.4029	-0.3582
8-10	1.2500	-1.2500	0.2596	-0.1969	8-10	1.2500	-1.2500	0.2596	-0.1969
9-10	1.2500	-1.2500	0.2596	-0.1969	9-10	1.2500	-1.2500	0.2596	-0.1969
3-4	1.2443	-1.2082	-0.1444	0.0628	3-4	1.2443	-1.2082	-0.1444	0.0628
3-4	1.2443	-1.2082	-0.1444	0.0628	3-4	1.2443	-1.2082	-0.1444	0.0628
3-11	1.2335	-1.1957	0.1521	-0.2066	3-11	1.2335	-1.1957	0.1521	-0.2066
4-12	0.9164	-0.8932	0.1990	-0.3428	4-12	0.9164	-0.8932	0.1990	-0.3428
10-11	0.8219	-0.8043	0.1032	-0.2934	10-11	0.8219	-0.8043	0.1032	-0.2934
10-12	1.6781	-1.6068	0.2906	-0.1072	10-12	1.6781	-1.6068	0.2906	-0.1072

Al contar con mediciones fasoriales en todos los nodos de la red se tiene la posibilidad de diseñar un algoritmo de estimación de estado con una formulación lineal, donde se multiplica una matriz constante por el vector de mediciones obteniendo las variables de estado de manera muy rápida.

En todos los casos no se aplican como mediciones diferencias angulares de mediciones fasoriales entre nodos.

#### 4.4.1 Formulación lineal con MFS en todos los nodos

El objetivo de la técnica de estimación de estado es estimar las variables de estado de un sistema eléctrico de potencia  $(|V|, \theta)$ , y en base a pruebas estadísticas detectar e identificar si alguna medición tiene un error anormal. El contar con mediciones fasoriales en todos los nodos de la red presenta un caso ideal dentro del sistema de potencia. Esta condición indica que las variables de estado estimadas van a ser los valores de las mediciones fasoriales.

Sin embargo, se debe contar con la posibilidad de que las mediciones fasoriales emitan una señal con error anormal. Si solamente se utilizan las ecuaciones de las mediciones fasoriales  $(|V|, \theta)$  resulta una matriz cuadrada unitaria, lo que ajusta el valor de las variables de estado al valor de las mediciones fasoriales y no se tiene la posibilidad de identificar si una o más mediciones fasoriales tienen error anormal.

El problema de redundancia evita identificar un error anormal en las mediciones fasoriales. Al aplicar como mediciones diferencias angulares se tiene redundancia en el estimador y éste permite identificar errores anormales en ángulos de fase.

Las derivadas de las diferencias angulares con respecto a todas las demás variables son cero y uno con respecto a ellas. Por lo que la matriz jacobiana resulta en una matriz rectangular de ceros y unos, siendo una matriz constante obteniendo así una solución lineal.

Para aplicar esta formulación lineal es necesario contar con mediciones fasoriales en todos los nodos y utilizar como mediciones las diferencias angulares, de lo contrario es necesario aplicar la formulación no lineal ya que no se tendría la posibilidad de detectar errores anormales en las mediciones fasoriales.

Se aplica la formulación lineal al sistema de la figura 2.1 para los casos: (1) se tienen mediciones fasoriales en todos los nodos sin error anormal; (2) se tiene error anormal en la medición de magnitud de voltaje del nodo 4 y ángulo de fase del nodo 3.

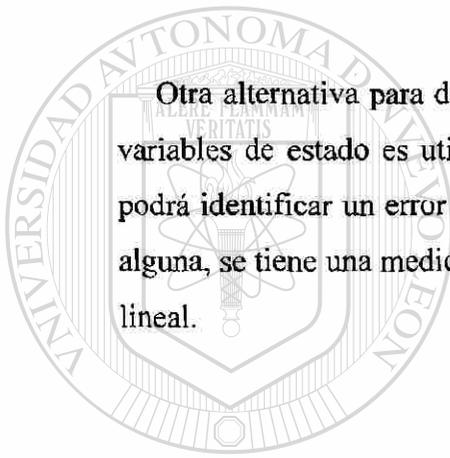
Tabla 4.15.- Resultados para caso (1) y caso (2).

<b>Caso 1</b>					<b>Caso 2</b>					
Valores estimados de las Variables de estado					Valores estimados de las Variables de estado					
N	V	A	Pne	Qne	N	V	A	Pne	Qne	
1	1.0500	0.0000	1.0787	0.1596	1	1.0489	0.0000	1.0770	0.1659	
2	1.0500	-0.0641	0.5000	0.7436	2	1.0490	-0.0640	0.5052	0.7534	
<b>3</b>	<b>1.0700</b>	<b>-0.0746</b>	<b>0.6000</b>	<b>0.8963</b>	<b>3</b>	<b>1.0693</b>	<b>-0.0744</b>	<b>0.6017</b>	<b>0.8979</b>	
4	0.9894	-0.0732	-0.7000	-0.7000	4	0.9868	-0.0732	-0.7071	-0.7197	
5	0.9854	-0.0921	-0.7000	-0.7000	5	0.9844	-0.0920	-0.6981	-0.6978	
6	1.0044	-0.1038	-0.7000	-0.7000	6	1.0038	-0.1037	-0.6990	-0.6970	
		Per	Pre	Qer	Qre		Per	Pre	Qer	Qre
1-2	0.2869	-0.2778	-0.1542	0.1282	1-2	0.2858	-0.2768	-0.1543	0.1284	
1-4	0.4358	-0.4250	0.2012	-0.1993	1-4	0.4361	-0.4250	0.2081	-0.2054	
1-5	0.3560	-0.3453	0.1125	-0.1345	1-5	0.3551	-0.3444	0.1121	-0.1341	
2-3	0.0293	-0.0289	-0.1227	0.0573	2-3	0.0286	-0.0282	-0.1238	0.0585	
2-4	0.3309	-0.3159	0.4605	-0.4513	2-4	0.3370	-0.3212	0.4730	-0.4621	
2-5	0.1551	-0.1502	0.1535	-0.1801	2-5	0.1549	-0.1499	0.1534	-0.1799	
2-6	0.2625	-0.2567	0.1240	-0.1601	2-6	0.2615	-0.2557	0.1224	-0.1586	
3-5	0.1912	-0.1802	0.2317	-0.2610	3-5	0.1918	-0.1808	0.2326	-0.2616	
3-6	0.4377	-0.4277	0.6072	-0.5786	3-6	0.4381	-0.4280	0.6068	-0.5781	
4-5	0.0408	-0.0405	-0.0494	-0.0279	4-5	0.0391	-0.0388	-0.0522	-0.0248	
5-6	0.0161	-0.0156	-0.0966	0.0387	5-6	0.0157	-0.0152	-0.0975	0.0397	

En el caso 1 la estimación es buena, ya que la prueba de identificación de errores no indica que alguna medición fasorial contenga un error anormal, sin embargo, para el caso 2 se detecta un error y la prueba de identificación de errores identifica correctamente que la medición de magnitud de voltaje del nodo 4 y la medición de ángulo de fase del nodo 3 tienen un error anormal.

Debido a que la solución que se presenta es una formulación lineal se aplica solamente cuando hay mediciones fasoriales en todos los nodos. Al eliminar algunas mediciones fasoriales del proceso por tener un error anormal es necesario aplicar la estimación de estado no lineal.

Otra alternativa para dar redundancia a la formulación lineal en la estimación de las variables de estado es utilizar doble medición fasorial en cada nodo de la red. Así se podrá identificar un error anormal en las mediciones fasoriales y en el caso de eliminar alguna, se tiene una medición fasorial de respaldo. Lo que permite aplicar la formulación lineal.



UANL

---

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN



DIRECCIÓN GENERAL DE BIBLIOTECAS

# CAPITULO V

## DETECCION E IDENTIFICACION DE ERRORES ANORMALES

### 5.1 Introducción

Para validar la información mediante el proceso de estimación de estado es vital contar con herramientas que tengan la habilidad de detectar e identificar mediciones con errores anormales. Esta validación de la información permite aplicar los resultados del estimador en diferentes estudios, que se realizan en la operación de un sistema de potencia.

Siguiendo el proceso de estimación, cuando el estimador obtiene una solución, la primera prueba a realizar es la detección de errores, mediante la comparación del índice  $J(x)$  con el valor límite de la distribución chi-cuadrada  $\chi_r^2$ , para los grados de libertad del problema y el nivel de confianza especificado. Si no se detectan errores en la prueba el proceso de estimación finaliza, en caso contrario, el siguiente paso es la prueba para la identificación de la medición con error anormal para posteriormente eliminarla. Este procedimiento es un ciclo que termina cuando el índice  $J(x)$  es menor que el valor límite de la distribución chi-cuadrada  $\chi_r^2$ .

En este capítulo se presentan los conceptos básicos del proceso de detección e identificación de errores, presentando un nuevo criterio para la aceptación de la estimación.

Al incluir mediciones fasoriales sincronizadas en el proceso de validación, el estimador debe ser capaz también de detectar e identificar si éstas mediciones contienen errores anormales. En el desarrollo del capítulo se analizará el caso de estimación con mediciones fasoriales sincronizadas con error anormal y se evaluará el procedimiento para la detección e identificación de errores. También se evaluará el impacto que produce la medición fasorial errónea sobre el índice  $J(x)$  y el porcentaje de mediciones fuera de un rango de  $\pm 1.2\sigma$ .

## 5.2 Detección de errores

En general en un sistema de potencia existen múltiples mediciones, y es difícil que todas sean correctas (con errores aleatorios normales). Las mediciones que incluyen errores anormales se deben a la mala calibración, errores de transductores, fallas de equipos, y a otros problemas. La modelación de mediciones y la localización de las mismas son aspectos muy importantes en la validación de información en un centro de control.

El proceso para detectar errores anormales en mediciones dependerá de la configuración del sistema eléctrico y del sistema de mediciones, el residual  $J(x)$  será pequeño si no hay mediciones con error anormal. En el caso contrario, el estimador puede obtener resultados, pero el índice  $J(x)$  tendrá un valor alto.

La pregunta importante es, ¿Qué magnitud del índice  $J(x)$  permite detectar mediciones con error anormal?

Los errores de medición son variables aleatorias, así el índice  $J(x)$  también es una variable aleatoria. Si se asume que todos los errores de medición son descritos por funciones de densidad de probabilidad normal o Gaussiana, entonces se puede demostrar que  $J(x)$  tiene una función de densidad de probabilidad conocida como distribución chi-cuadrada ( $\chi^2(K)$ ) [24], donde el parámetro  $K$  representa los grados de libertad de la distribución, que se define como la diferencia entre el número de mediciones y el número de variables de estado por estimar.

Cuando una medición es anormal, su error está fuera del rango  $\pm 3\sigma$ . Aún bajo circunstancias normales (todas las mediciones dentro del rango  $\pm 3\sigma$ ) el índice  $J(x)$  puede ser grande, aunque la probabilidad de que esto ocurra es pequeña. Al establecer un umbral para  $J(x)$ , el cual se llamará  $t_j$ , se dice que es probable que existan mediciones anormales cuando  $J(x) > t_j$ , y pueden existir dos casos. Si el umbral  $t_j$  es bajo, se tendrán algunas falsas alarmas, es decir, se detecta la presencia de mediciones anormales cuando de hecho no existe ninguna. Y al tomar  $t_j$  un valor alto, la prueba indicará que “todo está correcto”, cuando en realidad hay mediciones anormales presentes. De esta forma el valor de  $t_j$  se asociará con un nivel de significancia en la prueba.

DIRECCIÓN GENERAL DE BIBLIOTECAS

$$\text{prob}[J(x) > t_j | J(x) \text{ con distribución chi-cuadrada}] = \alpha, \quad (5.1)$$

con  $K$  grados de libertad

la ecuación dice que la probabilidad que  $J(x)$  sea mayor que  $t_j$  es igual a  $\alpha$ .

Del teorema de límite central [24], la suma de un gran número de variables aleatorias que sigue cualquier distribución, con variancia delimitada, se aproxima a una

distribución normal. Conforme el número de grados de libertad aumenta la distribución  $(\chi^2(K))$  también tiende a una distribución normal.

Al procedimiento descrito se le conoce como prueba de hipótesis, donde el parámetro  $\alpha_s$  es llamado nivel de confianza de la prueba. Al seleccionar el valor  $\alpha_s$  y valorar la distribución  $\chi^2$  se obtiene el valor  $t_j$  que va a ser comparado contra el índice  $J(x)$ . Por ejemplo si se establece un  $\alpha_s = 0.01$ , se dirá que las falsas alarmas ocurrirán en solo 1% de las pruebas realizadas.

### 5.2.1 Distribución $\chi^2$ chi-cuadrada.

La distribución  $\chi^2$  es un caso especial de la distribución gamma. A su vez la distribución gamma utiliza la función gamma, empleada en diferentes aplicaciones matemáticas:

$$\Gamma(\alpha) = \int_0^{\alpha} x^{\alpha-1} e^{-x} dx \quad (5.2)$$

al aplicarse en la definición de la distribución gamma, con parámetros  $\alpha$  y  $\beta$ , su función de densidad de probabilidad es:

$$f(x) = \begin{cases} \frac{1}{\beta^\alpha \Gamma(\alpha)} x^{\alpha-1} e^{-\frac{x}{\beta}} & x > 0 \\ 0 & \text{en cualquier otro caso} \end{cases} \quad (5.3)$$

con  $\alpha > 0$  y  $\beta > 0$

La distribución  $\chi^2$  es la distribución gamma valuada en:  $\alpha = \frac{K}{2}$  y  $\beta = 2$ , con  $K$  grados de libertad, y está definida:

$$f(x) = \begin{cases} \frac{1}{2^{K/2} \Gamma(K/2)} x^{(K/2)-1} e^{-x/2} & x > 0 \\ 0 & \text{en cualquier otro caso} \end{cases} \quad (5.4)$$

Para obtener un valor  $t$ , se integra mediante métodos numéricos y se detiene cuando se cumple la condición para el valor de  $x$  dado:

$$\int f(x) = 1 - \alpha_s \quad (5.5)$$

### 5.2.2 Porcentaje de residuales ponderados fuera del rango $\pm 1.2\sigma$

Las pruebas que se aplican a medidores para establecer su precisión se fundamentan en técnicas estadísticas, definiendo el parámetro conocido como desviación estandar:

$$\sigma = \sqrt{\frac{\sum (\bar{x} - x_i)^2}{N}} \quad (5.6)$$

donde:

$\bar{x}$  = valor medio

$x_i$  = valor medido

$N$  = número de muestras.

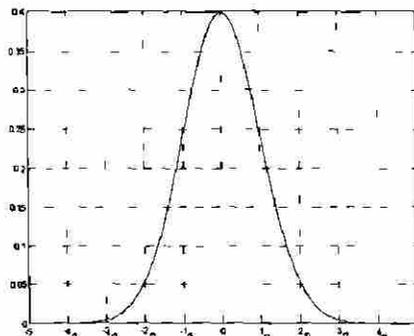


Figura 5.1.- Función de distribución de probabilidad normal.

La desviación estándar es una medida cuantitativa de la precisión del medidor, para una distribución Gaussiana la probabilidad que los valores medidos se encuentren en el intervalo  $x \pm \sigma$  es 68%, 95% en el intervalo  $x \pm 2\sigma$ , y 99% en el intervalo  $x \pm 3\sigma$ , donde  $x$  es el valor medio del espacio muestral. Esto indica que el valor medido deberá estar en el intervalo  $x \pm 3\sigma$  con una probabilidad del 99%.

Tabla 5.1.- Valores de área bajo la curva de una distribución normal para diferentes  $\sigma$

Valor de $\sigma$	Probabilidad
$\pm 4$	0.999936
$\pm 3$	0.997300
$\pm 2$	0.954499
$\pm 1.2$	0.769860
$\pm 1$	0.682689

En estimación de estado se modelan las mediciones con éstas características para obtener un buen estimado del sistema. Sin embargo, las mediciones pueden presentar errores mayores a los casos descritos con anterioridad, dando lugar a un error anormal (fuera de lo esperado).

En la detección de errores generalmente se compara el índice  $J(x)$  con el valor  $t_j$ , si el índice  $J(x)$  es menor que  $t_j$  se acepta el estimado, en el caso contrario se inicia el proceso de identificación y eliminación de las mediciones anormales, hasta que se cumpla dicha condición. La técnica común [1,2,22,23] aplica un criterio de aceptación, ya sea el índice  $J(x)$  contra el valor  $t_j$  o la técnica llamada  $r^n$  [22], aunque la segunda técnica detecta e identifica los errores. Las dos técnicas son eficientes con sus características particulares, sin embargo es solamente un criterio para decidir si el estimado se acepta o se rechaza.

### 5.3 Detección de errores en sistemas con medición fasorial

Con el desarrollo de mediciones fasoriales sincronizadas en los sistemas de potencia, su aplicación en estimación de estado es atractiva debido a su alta precisión y

confiabilidad, ya que dan redundancia al estimador y pueden mejorar la estimación, aún ante la presencia de mediciones con errores fuera del intervalo  $x \pm 3\sigma$ .

Para analizar estas condiciones se emplea el sistema de la figura 2.1 presentando los siguientes casos de estudio: (1) las mediciones convencionales sin error (caso ideal); (2) mediciones convencionales con error aleatorio dentro del rango  $\pm 3\sigma$  y la medición de potencia activa y potencia reactiva de 2-6 con un error de  $\pm 4.5\sigma$ ; (3) similar a (2) pero con mediciones fasoriales en los nodos 3 y 5; (4) similar a (3) pero con las mediciones de potencia activa y potencia reactiva de 2-6 eliminadas.

Tabla 5.2.- Tabla de resultados para caso (1) y caso (2).

Caso 1					Caso 2				
Valores estimados de las Variables de estado					Valores estimados de las Variables de estado				
N	V	A	Pne	Qne	N	V	A	Pne	Qne
1	1.0500	0.0000	1.0788	0.1596	1	1.0438	0.0000	1.1140	0.1779
2	1.0500	-0.0641	0.5000	0.7436	2	1.0410	-0.0671	0.4507	0.6705
3	1.0700	-0.0746	0.6000	0.8963	3	1.0661	-0.0768	0.6051	0.8881
4	0.9894	-0.0732	-0.7000	-0.7000	4	0.9803	-0.0760	-0.7070	-0.7117
5	0.9854	-0.0921	-0.7000	-0.7000	5	0.9792	-0.0960	-0.7236	-0.6952
6	1.0044	-0.1038	-0.7000	-0.7000	6	1.0036	-0.1058	-0.6594	-0.6221
Prueba de Hipótesis					Prueba de Hipótesis				
Factor J		Valor Xi2			Factor J		Valor Xi2		
0.0000		77.3633			68.9254		77.3633		
Porcentaje de la diferencia de medidos y estimados fuera de $1.2\sigma$ 0.0000%					Porcentaje de la diferencia de medidos y estimados fuera de $1.2\sigma$ 19.3548%				
	Per	Pre	Qer	Qre		Per	Pre	Qer	Qre
1-2	0.2869	-0.2779	-0.1542	0.1282	1-2	0.3021	-0.2923	-0.1459	0.1220
1-4	0.4359	-0.4250	0.2012	-0.1993	1-4	0.4472	-0.4355	0.2131	-0.2072
1-5	0.3560	-0.3453	0.1126	-0.1345	1-5	0.3647	-0.3534	0.1108	-0.1300
2-3	0.0293	-0.0289	-0.1227	0.0573	2-3	0.0216	-0.0210	-0.1410	0.0772
2-4	0.3309	-0.3158	0.4605	-0.4512	2-4	0.3262	-0.3111	0.4592	-0.4494
2-5	0.1552	-0.1502	0.1535	-0.1801	2-5	0.1532	-0.1485	0.1434	-0.1702
2-6	0.2625	-0.2567	0.1240	-0.1601	2-6	0.2421	-0.2374	0.0869	-0.1260
3-5	0.1912	-0.1802	0.2317	-0.2609	3-5	0.1992	-0.1876	0.2368	-0.2640
3-6	0.4377	-0.4277	0.6072	-0.5786	3-6	0.4269	-0.4176	0.5741	-0.5493
4-5	0.0408	-0.0405	-0.0494	-0.0279	4-5	0.0396	-0.0392	-0.0551	-0.0210
5-6	0.0161	-0.0156	-0.0966	0.0387	5-6	0.0051	-0.0044	-0.1101	0.0532

En el caso (2) se observa que el índice  $J(x)$  y el porcentaje de residuales fuera del rango  $\pm 1.2\sigma$  están cerca de violar los criterios de aceptación. En el caso 3 se observa que las mediciones fasoriales no ayudan a mejorar la estimación de las variables de estado, ya que las mediciones convencionales con error anormal se encuentran en nodos alejados de los nodos que tienen mediciones fasoriales. Por lo que es necesario eliminar

las mediciones convencionales con error anormal y repetir el proceso de estimación de estado (caso (4)).

Tabla 5.3.- Tabla de resultados para caso (3) y caso (4).

Caso 3					Caso 4				
Valores estimados de las Variables de estado					Valores estimados de las Variables de estado				
N	V	A	Pne	Qne	N	V	A	Pne	Qne
1	1.0492	0.0000	1.0962	0.1824	1	1.0519	0.0000	1.0928	0.1918
2	1.0459	-0.0653	0.4471	0.6676	2	1.0485	-0.0642	0.4772	0.6928
3	<b>1.0700</b>	<b>-0.0746</b>	<b>0.5959</b>	<b>0.8765</b>	3	<b>1.0700</b>	<b>-0.0746</b>	<b>0.5998</b>	<b>0.8793</b>
4	0.9856	-0.0744	-0.7097	-0.7133	4	0.9888	-0.0733	-0.6997	-0.7039
5	<b>0.9854</b>	<b>-0.0921</b>	<b>-0.6902</b>	<b>-0.6905</b>	5	<b>0.9854</b>	<b>-0.0921</b>	<b>-0.7009</b>	<b>-0.7070</b>
6	1.0080	-0.1032	-0.6625	-0.6290	6	1.0066	-0.1040	-0.6913	-0.6564
Prueba de Hipótesis					Prueba de Hipótesis				
Factor J		Valor Xi2			Factor J		Valor Xi2		
68.9168		79.8052			39.0129		77.3633		
Porcentaje de la diferencia de medidos y estimados fuera de $1.2\sigma$ 20.3125%					Porcentaje de la diferencia de medidos y estimados fuera de $1.2\sigma$ 14.5161%				
	Per	Pre	Qer	Qre		Per	Pre	Qer	Qre
1-2	0.2978	-0.2884	-0.1422	0.1170	1-2	0.2947	-0.2856	-0.1403	0.1145
1-4	0.4434	-0.4319	0.2149	-0.2104	1-4	0.4398	-0.4286	0.2134	-0.2101
1-5	0.3550	-0.3443	0.1097	-0.1320	1-5	0.3583	-0.3473	0.1188	-0.1400
2-3	0.0207	-0.0202	-0.1376	0.0730	2-3	0.0274	-0.0270	-0.1285	0.0634
2-4	0.3274	-0.3126	0.4565	-0.4474	2-4	0.3258	-0.3113	0.4519	-0.4435
2-5	0.1465	-0.1421	0.1413	-0.1694	2-5	0.1529	-0.1481	0.1487	-0.1758
2-6	0.2409	-0.2363	0.0904	-0.1300	2-6	0.2566	-0.2513	0.1063	-0.1438
3-5	0.1912	-0.1802	0.2317	-0.2610	3-5	0.1912	-0.1802	0.2317	-0.2610
3-6	0.4250	-0.4159	0.5717	-0.5478	3-6	0.4356	-0.4261	0.5841	-0.5582
4-5	0.0347	-0.0344	-0.0555	-0.0216	4-5	0.0401	-0.0398	-0.0504	-0.0269
5-6	0.0109	-0.0103	-0.1065	0.0488	5-6	0.0145	-0.0140	-0.1033	0.0456

La técnica utilizada en este trabajo y que se empleó para determinar la aceptación o rechazo del estimado, bajo las condiciones de tener error en mediciones convencionales fuera del intervalo  $x \pm 3\sigma$  se detalla a continuación.

Si se cuenta con mediciones fasoriales sincronizadas correctas en el sistema y en todos los casos  $J(x)$  es menor que  $t_j$ , el estimado se acepta y no presenta problemas para determinar el criterio de aceptación.

Sin embargo, el proceso de estimación debe contar con un alto porcentaje de mediciones dentro del intervalo  $x \pm 3\sigma$  para obtener un buen estimado. Esto provoca que un alto porcentaje (77% o mayor), de los residuales se encuentren en el rango

$x \pm 1.2\sigma$  con respecto a su medición correspondiente, y esta condición es un indicativo que la estimación es correcta.

Cuando en el sistema existen mediciones convencionales con errores muy grandes, éstas perturban la estimación de variables de estado cercanas, sin embargo el contar con mediciones fasoriales sincronizadas, con una alta ponderación por su precisión, se puede reducir o evitar la contaminación de la estimación.

Este efecto es más notable cuando la medición convencional con error anormal se encuentra conectada a un nodo con medición fasorial, y el efecto es menor cuando se encuentra alejada del nodo con información precisa. El mejor efecto se logra cuando la medición convencional con error anormal se encuentra entre nodos que tienen medición fasorial.

Esta condición descrita indica que la estimación de variables de estado se puede aceptar aún cuando  $J(x) > t$ , que contradice la teoría clásica en pruebas de hipótesis.

Cuando hay mediciones fasoriales en el sistema de medición se debe combinar la prueba de hipótesis y el porcentaje de residuales fuera del rango  $\pm 1.2\sigma$  para decidir si la estimación se acepta o se rechaza. Si el índice  $J(x) < t$ , la estimación se acepta. Si  $J(x) > t$ , y el porcentaje de residuales fuera del rango  $\pm 1.2\sigma$  es mayor al 77% la estimación se acepta, y solamente se elimina la medición con error anormal sin necesidad de estimar nuevamente las variables de estado, ahorrando tiempo y esfuerzo computacional.

Inclusive se puede presentar el caso donde el índice  $J(x) < t$ , y que el porcentaje de residuales fuera del rango  $\pm 1.2\sigma$  sea menor al 77%. Indicando que hay varias mediciones con error normal cercano al  $\pm 3\sigma$  que contamina las variables de estado pero no lo suficiente para rechazar el estimado. Por lo que el porcentaje al ser menor al 77%

indicaría que hay presencia de mediciones con error grande, siendo este un criterio más para aceptar o rechazar la estimación.

Para ilustrar los efectos descritos arriba se emplea el sistema de la figura 2.1, y se presentan los casos: (1) mediciones convencionales sin error (caso ideal); (2) mediciones convencionales con error aleatorio y medición de potencia activa y potencia reactiva de 1-2 invertidas; (3) similar a (2) pero con medición fasorial en nodos 1 y 2; (4) similar a (3) con mediciones de potencia activa y potencia reactiva con error anormal eliminadas.

Tabla 5.4.- Tabla de resultados para caso (1) y caso (2).

Caso 1					Caso 2				
Valores estimados de las Variables de estado					Valores estimados de las Variables de estado				
N	V	A	Pne	Qne	N	V	A	Pne	Qne
1	1.0500	0.0000	1.0788	0.1596	1	1.0459	0.0000	0.9932	0.2208
2	1.0500	-0.0641	0.5000	0.7436	2	1.0427	-0.0551	0.5461	0.6704
3	1.0700	-0.0746	0.6000	0.8963	3	1.0631	-0.0647	0.6137	0.8655
4	0.9894	-0.0732	-0.7000	-0.7000	4	0.9829	-0.0671	-0.6844	-0.6982
5	0.9854	-0.0921	-0.7000	-0.7000	5	0.9786	-0.0870	-0.7240	-0.6952
6	1.0044	-0.1038	-0.7000	-0.7000	6	0.9993	-0.0941	-0.6702	-0.6699
Prueba de Hipótesis					Prueba de Hipótesis				
Factor J					Factor J				
0.0000					207.5678				
Valor Xi2					Valor Xi2				
77.3633					77.3633				
Porcentaje de la diferencia de medidos y estimados fuera de 1.2σ 0.0000%					Porcentaje de la diferencia de medidos y estimados fuera de 1.2σ 22.5806%				
	Per	Pre	Qer	Qre		Per	Pre	Qer	Qre
1-2	0.2869	-0.2779	-0.1542	0.1282	1-2	0.2503	-0.2437	-0.1218	0.0914
1-4	0.4359	-0.4250	0.2012	-0.1993	1-4	0.4044	-0.3943	0.2182	-0.2190
1-5	0.3560	-0.3453	0.1126	-0.1345	1-5	0.3384	-0.3282	0.1244	-0.1478
2-3	0.0293	-0.0289	-0.1227	0.0573	2-3	0.0244	-0.0240	-0.1223	0.0578
2-4	0.3309	-0.3158	0.4605	-0.4512	2-4	0.3477	-0.3328	0.4394	-0.4301
2-5	0.1552	-0.1502	0.1535	-0.1801	2-5	0.1650	-0.1598	0.1476	-0.1730
2-6	0.2625	-0.2567	0.1240	-0.1601	2-6	0.2528	-0.2474	0.1144	-0.1511
3-5	0.1912	-0.1802	0.2317	-0.2609	3-5	0.2055	-0.1943	0.2231	-0.2511
3-6	0.4377	-0.4277	0.6072	-0.5786	3-6	0.4322	-0.4226	0.5846	-0.5579
4-5	0.0408	-0.0405	-0.0494	-0.0279	4-5	0.0428	-0.0424	-0.0491	-0.0271
5-6	0.0161	-0.0156	-0.0966	0.0387	5-6	0.0007	-0.0002	-0.0963	0.0391

Tabla 5.5.- Tabla de resultados para caso (3) y caso (4).

Caso 3					Caso 4				
Valores estimados de las Variables de estado					Valores estimados de las Variables de estado				
N	V	A	Pne	Qne	N	V	A	Pne	Qne
1	1.0500	0.0000	1.0782	0.1581	1	1.0500	0.0000	1.0782	0.1581
2	1.0500	-0.0635	0.5038	0.7202	2	1.0500	-0.0635	0.5038	0.7202
3	1.0706	-0.0742	0.6010	0.8747	3	1.0706	-0.0742	0.6010	0.8747
4	0.9897	-0.0729	-0.6954	-0.6969	4	0.9897	-0.0729	-0.6954	-0.6969
5	0.9856	-0.0933	-0.7260	-0.7003	5	0.9856	-0.0933	-0.7260	-0.7003
6	1.0074	-0.1033	-0.6837	-0.6602	6	1.0074	-0.1033	-0.6837	-0.6602

Tabla 5.5.- Continuación

Prueba de Hipótesis					Prueba de Hipótesis				
Factor J		Valor Xi2			Factor J		Valor Xi2		
217.4497		79.8052			41.1890		77.3633		
Porcentaje de la diferencia de medidos y estimados fuera de $1.2\sigma$ 15.6250%					Porcentaje de la diferencia de medidos y estimados fuera de $1.2\sigma$ 12.9032%				
	Per	Pre	Qer	Qre		Per	Pre	Qer	Qre
1-2	0.2844	-0.2756	-0.1532	0.1268	1-2	0.2844	-0.2756	-0.1532	0.1268
1-4	0.4339	-0.4231	0.1999	-0.1984	1-4	0.4339	-0.4231	0.1999	-0.1984
1-5	0.3599	-0.3490	0.1114	-0.1327	1-5	0.3599	-0.3490	0.1114	-0.1327
2-3	0.0294	-0.0290	-0.1252	0.0599	2-3	0.0294	-0.0290	-0.1252	0.0599
2-4	0.3312	-0.3163	0.4570	-0.4480	2-4	0.3312	-0.3163	0.4570	-0.4480
2-5	0.1605	-0.1554	0.1515	-0.1777	2-5	0.1605	-0.1554	0.1515	-0.1777
2-6	0.2582	-0.2528	0.1101	-0.1475	2-6	0.2582	-0.2528	0.1101	-0.1475
3-5	0.1974	-0.1863	0.2311	-0.2599	3-5	0.1974	-0.1863	0.2311	-0.2599
3-6	0.4326	-0.4232	0.5837	-0.5581	3-6	0.4326	-0.4232	0.5837	-0.5581
4-5	0.0441	-0.0436	-0.0505	-0.0267	4-5	0.0441	-0.0436	-0.0505	-0.0267
5-6	0.0083	-0.0077	-0.1033	0.0454	5-6	0.0083	-0.0077	-0.1033	0.0454

Se observa que en el caso (2) el índice  $J(x)$  y el porcentaje de mediciones fuera del rango  $x \pm 1.2\sigma$  queda fuera de los límites establecidos para aceptar la estimación de las variables de estado.

En el caso (3) el índice  $J(x)$  es mayor que el valor  $t_{\alpha}$ , lo que indicaría que la estimación se rechaza, sin embargo, al contar con mediciones fasoriales sincronizadas el porcentaje fuera del rango  $x \pm 1.2\sigma$  es menor que el 23%, lo que indica que la estimación se acepta, ya que al eliminar las mediciones convencionales de potencia activa y potencia reactiva (caso (4)) la estimación es exactamente la misma.

En todos los casos cuando se cuenta con mediciones fasoriales sincronizadas correctas la estimación de las variables de estado se mejora.

#### 5.4 Identificación de errores

En el desarrollo de éste trabajo se ha establecido la importancia de emplear técnicas que permitan identificar la medición errónea, eliminarla del proceso de estimación y repetir el proceso de estimación hasta cumplir con las condiciones para aceptar el estimado.

A continuación se resumen las técnicas de identificación que se han venido aplicando a través de los años en el proceso de estimación.

#### 5.4.1 Residuales

En la figura 5.2 se tiene la función de densidad de probabilidad de la medición  $z_i$ , se asumirá que el error de  $z_i$  es normalmente distribuido con valor esperado cero. La función de densidad de probabilidad está centrada en el valor verdadero de  $z_i$ , y los errores de todas las mediciones se suponen con distribución normal [11].

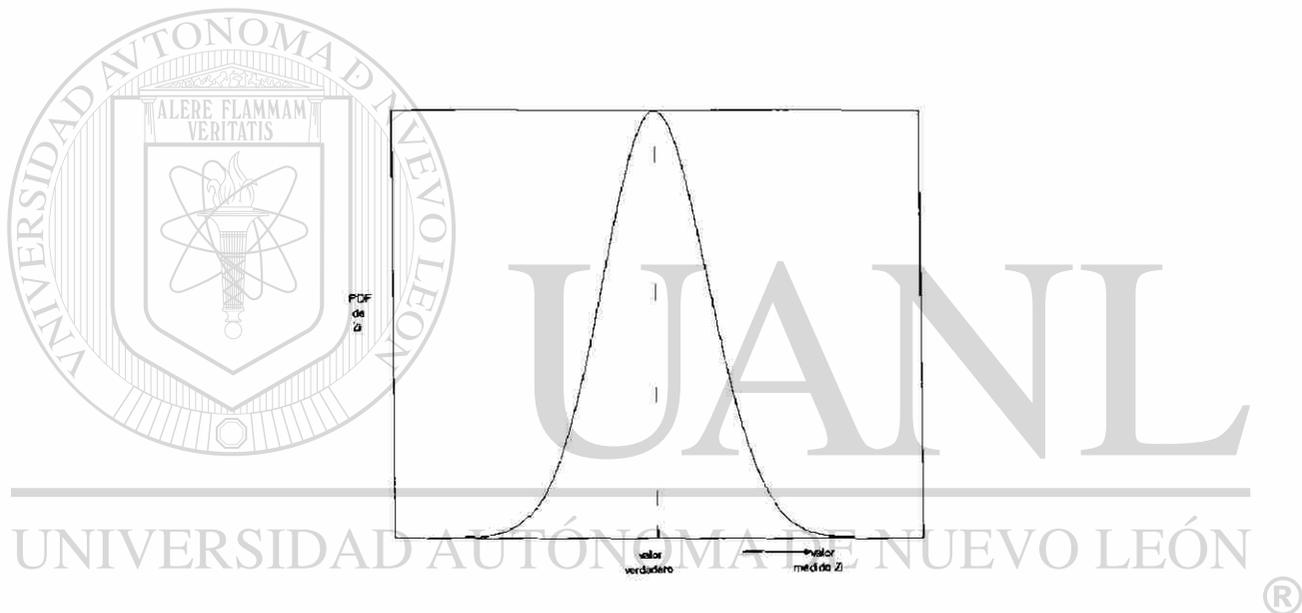


Figura 5.2.- Función de distribución normal de la medición  $z_i$ .

Además se supondrá que las variables de estado  $x$  son normalmente distribuidas y que cualquier función lineal de  $x$  tiene una distribución normal. En la figura 5.3 se muestra la función de densidad de probabilidad del valor estimado de la medición  $z_i$ , que se denota  $f_i$ , y tiene una variancia menor que la establecida para la medición  $z_i$ , debido a la redundancia de mediciones, de esta forma el estimado está más cerca del valor verdadero que el valor medido.

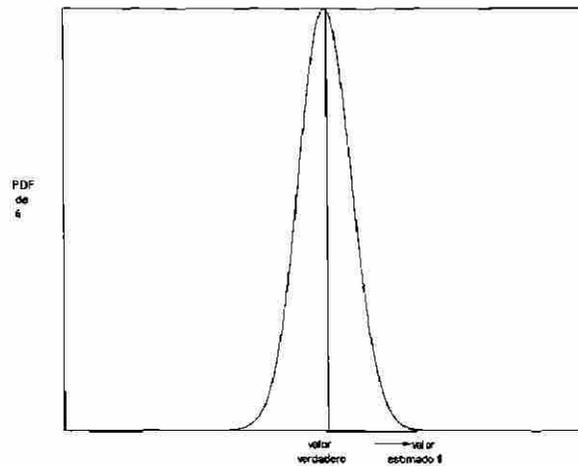


Figura 5.3.- Función de distribución normal del estimado  $f_i$ .

A la diferencia entre valor medido  $z_i$  y el valor estimado  $f_i$  se le llama residual y se denota como  $r_i$ . La función de densidad de probabilidad normal para  $r_i$  se muestra en la figura 5.4, la cual está centrada en el valor cero y con variancia  $\sigma_{r_i}$ .

$$r_i = z_i - f_i \quad (5.7)$$

En condiciones normales el residual para la medición  $z_i$  debe estar en el rango  $\pm 3\sigma$ , debido a su función de densidad de probabilidad normal, si el residual está fuera de éste rango se tendrá una buena razón para sospechar que la medición  $z_i$  es incorrecta.

A cada una de las mediciones se aplica éste procedimiento y se obtiene el vector de residuales. Cada residual es comparado con su variancia  $\sigma_{r_i}$  respectiva, de ésta manera se identificarían probables mediciones erróneas.

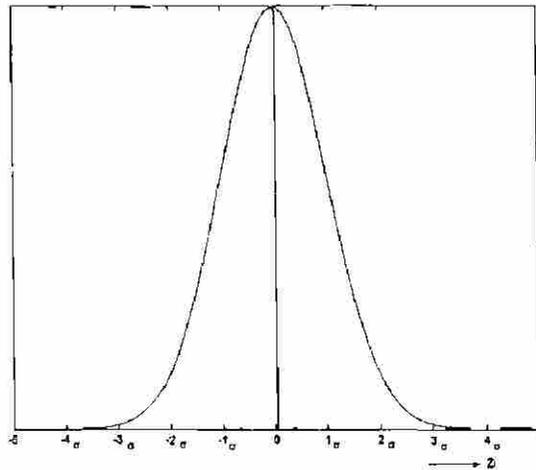


Figura 5.4.- Función de distribución normal del residual  $r_i$ .

#### 5.4.2 Residuales ponderados

Aplicando los conceptos anteriores y dividiendo la diferencia entre el valor medido  $z_i$  y el valor estimado  $f_i$  por su respectiva variancia  $\sigma_{r_i}$ , se obtendrá el residual ponderado, cuyo residual es designado por  $r_i''$ , su función de densidad de probabilidad normal se muestra en la figura 5.5. Así se llega a establecer que si el valor absoluto de

$r_i''$  es mayor que 3 existe una alta probabilidad para considerar que la medición  $z_i$  tiene un error anormal.

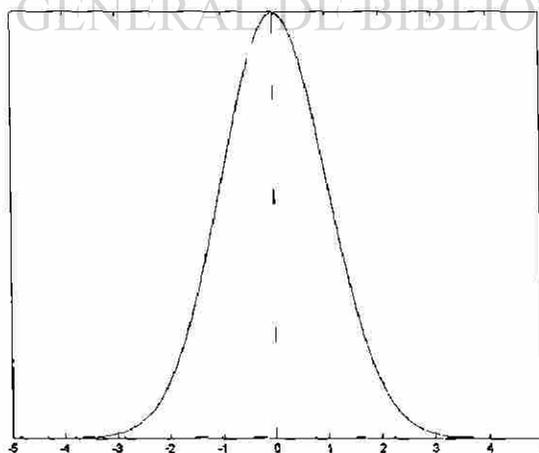


Figura 5.5.- Función de distribución normal para residual ponderado.

Una desventaja de aplicar éstas dos técnicas en el proceso de estimación se presenta cuando se emplean mediciones de alta precisión, ya sea con inyección cero o el caso de mediciones fasoriales. Por ser de muy alta precisión el valor medido y el valor estimado son casi idénticos, esto implica que el residual es cero y que el residual ponderado también es cero, siendo prácticamente imposible detectar si son correctas o contienen un error que afecta el estimado.

Con el fin de corregir este problema se desarrolló una técnica capaz de identificar la medición que es realmente errónea en sistemas de medición que contienen mediciones convencionales y mediciones de alta precisión. A ésta técnica se le conoce como residuales normalizados o  $r^n$  [12].

#### 5.4.3 Residuales normalizados

Se aplican conceptos de matrices de covariancia a ecuaciones del capítulo III y se obtiene una matriz de covariancia del vector  $x$  de estados estimados [12]:

$$R_x = (G^{-1}HR^{-1})R(G^{-1}HR^{-1})^T \quad (5.8)$$

se simplifica y se obtiene:

$$R_x = G^{-1} \quad (5.9)$$

la matriz de covariancia del vector de mediciones estimadas  $z^{est}$  está dada por:

$$R_{z^{est}} = HR_xH^T = HG^{-1}H^T \quad (5.10)$$

de igual manera se obtiene la matriz de covariancia del vector de residuales:

$$R_r = (I - HG^{-1}H^T R^{-1})R(I - HG^{-1}H^T R^{-1})^T \quad (5.11)$$

reduciendo se obtiene:

$$R_r = R - HG^{-1}H^T \quad (5.12)$$

la matriz de covariancia de los residuales resulta de la diferencia entre la matriz de covariancia de las mediciones ( $R$ ) y de la matriz de covariancia de las mediciones estimadas ( $R_{z^{est}}$ ):

$$R_r = R - R_{z^{est}} \quad (5.13)$$

finalmente los residuales normalizados que se emplean en la identificación de errores están dados por:

$$r^n = (diag(R_r))^{-1/2} r \quad (5.14)$$

donde  $diag(R_r)$  son los elementos de la diagonal de la matriz ( $R_r$ ), y  $r$  es el vector de residuales.

#### 5.4.4 Análisis de la prueba de detección e identificación de errores y el porcentaje fuera del rango $\pm 1.2\sigma$

Es importante al momento de aplicar éstas pruebas, considerar la ponderación que se otorgó a cada una de las mediciones en el proceso de estimación de estado.

En el algoritmo de estimación de estado convencional la ponderación debe ser mayor a  $\left(\frac{1}{\sigma} > 1 \times 10^8\right)$  para evitar problemas de convergencia. La ponderación mínima

$\left(\frac{1}{\sigma} = 1 \times 10^7\right)$  no afecta la prueba de detección e identificación de errores, así como al porcentaje fuera del rango  $\pm 1.2\sigma$ .

El estimador por descomposición ortogonal emplea ponderaciones menores a  $\left(\frac{1}{\sigma} \leq 1 \times 10^7\right)$  cuando se utilizan mediciones muy precisas, como son las mediciones en nodos con inyección cero y magnitud de voltaje en medición fasorial. Las mediciones precisas producen ciertas características en la prueba de detección e identificación de errores, así como en el porcentaje de residuales fuera del rango  $\pm 1.2\sigma$ . En base al análisis que se realizó se obtuvieron las siguientes conclusiones:

a) **Detección de errores:** Al obtener el índice  $J(x)$  (Ec. (2.2)) la covariancia que depende del cuadrado de la ponderación no afecta el computo del índice  $J(x)$ , ya que la medición precisa se ajusta correctamente al valor de medición. Por lo que el residual es pequeño y al multiplicarse por la covariancia resulta un valor bajo que se suma al de todas las demás mediciones.

b) **Identificación de errores:** La ponderación de las mediciones precisas (mediciones fasoriales y nodos con inyección), no afecta la Ec. (5.10) en la técnica de residuales normalizados para identificación de errores.

El punto importante que se debe tomar en cuenta es: (1) la transformación ortogonal se aplica solamente a la ecuación de estimación de estado y no a la prueba de detección e identificación de errores. Por lo cual se debe tener un manejo especial en la matriz de covariancia que se aplica en la prueba de detección e identificación de errores que es diferente a la matriz de variancia que se aplica en la transformación ortogonal, y (2) este fenómeno generalmente se presenta cuando se utilizan mediciones de inyección cero, ya que la ponderación de mediciones fasoriales de ángulo y magnitud de voltaje

$\left(\frac{1}{\sigma} = 1 \times 10^5 \text{ y } \frac{1}{\sigma} = 1 \times 10^7\right)$  respectivamente, no afectan esta prueba por ser mayores a la ponderación de un nodo con inyección cero  $\left(\frac{1}{\sigma} = 1 \times 10^9\right)$ .

c) **Porcentaje fuera del rango  $\pm 1.2\sigma$** : los residuales que se encuentran fuera del rango  $\pm 1.2\sigma$  se toman en cuenta para calcular este porcentaje. El residual que se obtiene de la diferencia entre valor medido y valor estimado de mediciones convencionales no presenta ningún problema. Y es fácil establecer que medición se toma o no en cuenta para el cálculo del porcentaje. En cambio los residuales de mediciones precisas no son fáciles de establecer si se toman en cuenta o no para calcular el porcentaje. Por ejemplo: un nodo con inyección cero tiene un valor medido de  $S_{i0} = 0MW$ , con una ponderación de  $\left(\frac{1}{\sigma} = 1 \times 10^9\right)$ , entonces se espera que el valor estimado este en el rango  $S_{i0} = \pm 3 \times 10^{-9}$ . Cuando el residual se encuentra en el rango  $r = \pm 1.2 \times 10^{-9}$  no se toma en cuenta para calcular el porcentaje. Sin embargo si el residual esta en el rango  $r \leq 1 \times 10^{-6}$  se sabe que hay una inyección de  $100watts$  o menor, considerando que este valor está bien estimado. Pero al compararlo con la ponderación correspondiente se toma en cuenta para calcular el porcentaje, ya que está fuera del rango. Para evitar este tipo de problemas se tomaron las siguientes consideraciones: (1) si el residual de una medición precisa es  $r \leq 1e-6$ , se considera bien estimado y no se toma en cuenta para el cálculo del porcentaje, y (2) si el residual de una medición precisa es  $r \geq 1e-6$ , se considera una estimación que se debe tomar en cuenta para el cálculo del porcentaje.

### 5.5 Estimación de estado con mediciones fasoriales erróneas.

Ahora se analiza el efecto que tiene una medición fasorial sincronizada errónea en el proceso de estimación de estado, en especial el efecto sobre el índice  $J(x)$  y los porcentajes de mediciones fuera del rango  $\pm 1.2\sigma$ , adicionalmente se avalúan las diferentes técnicas para identificar errores anormales en mediciones convencionales y mediciones fasoriales.

### 5.5.1 Resultados con el Método Newton-Raphson

Se realizan pruebas con el estimador para el sistema de la figura 2.1 con el método Newton-Raphson por descomposición ortogonal para los siguientes casos: (1) con mediciones convencionales con error aleatorio dentro del rango  $\pm 3\sigma$  incluyendo mediciones fasoriales sincronizadas con errores anormales en los nodos 3 y 5; (2) similar a (1) pero con la medición de potencia activa y potencia reactiva de 3-5 invertida; (3) similar a (1) pero con error anormal en la medición del ángulo de la medición fasorial en los nodos 3 y 5; (4) similar a (1) pero con mediciones fasoriales en los nodos 3 y 5 correctas.

Tabla 5.6.- Resultados para caso (1) y caso (2) por Método Newton-Raphson.

Caso 1					Caso 2				
Valores estimados de las Variables de estado					Valores estimados de las Variables de estado				
N	V	A	Pne	Qne	N	V	A	Pne	Qne
1	1.0310	0.0000	1.0571	0.2029	1	1.0310	-0.0000	1.0571	0.2029
2	1.0305	-0.0681	0.4755	0.7168	2	1.0305	-0.0681	0.4755	0.7168
3	<b>1.0590</b>	<b>-0.0855</b>	<b>0.5186</b>	<b>1.0287</b>	3	<b>1.0590</b>	<b>-0.0855</b>	<b>0.5186</b>	<b>1.0287</b>
4	0.9681	-0.0757	-0.6971	-0.6879	4	0.9681	-0.0757	-0.6971	-0.6879
5	<b>0.9565</b>	<b>-0.0850</b>	<b>-0.5635</b>	<b>-0.9222</b>	5	<b>0.9565</b>	<b>-0.0850</b>	<b>-0.5635</b>	<b>-0.9222</b>
6	0.9926	-0.1127	-0.7035	-0.5964	6	0.9926	-0.1127	-0.7035	-0.5964
Prueba de Hipótesis					Prueba de Hipótesis				
Factor J		Valor Xi2			Factor J		Valor Xi2		
103.1075		79.8052			268.8387		79.8052		
Porcentaje de la diferencia de medidos y estimados fuera de $1.2\sigma$					Porcentaje de la diferencia de medidos y estimados fuera de $1.2\sigma$				
28.1250%					29.6875%				
	Per	Pre	Qer	Qre		Per	Pre	Qer	Qre
1-2	0.2950	-0.2851	-0.1539	0.1311	1-2	0.2950	-0.2851	-0.1539	0.1311
1-4	0.4348	-0.4234	0.2083	-0.2028	1-4	0.4348	-0.4234	0.2083	-0.2028
1-5	0.3273	-0.3168	0.1485	-0.1684	1-5	0.3273	-0.3168	0.1485	-0.1684
2-3	0.0506	-0.0497	-0.1590	0.0980	2-3	0.0506	-0.0497	-0.1590	0.0980
2-4	0.3180	-0.3022	0.4731	-0.4615	2-4	0.3180	-0.3022	0.4731	-0.4615
2-5	0.1265	-0.1208	0.1910	-0.2133	2-5	0.1265	-0.1208	0.1910	-0.2133
2-6	0.2655	-0.2601	0.0807	-0.1164	2-6	0.2655	-0.2601	0.0807	-0.1164
3-5	0.1575	-0.1421	0.3168	-0.3344	3-5	0.1575	-0.1421	0.3168	-0.3344
3-6	0.4108	-0.4008	0.6140	-0.5852	3-6	0.4108	-0.4008	0.6140	-0.5852
4-5	0.0286	-0.0284	-0.0236	-0.0500	4-5	0.0286	-0.0284	-0.0236	-0.0500
5-6	0.0445	-0.0425	-0.1561	0.1052	5-6	0.0445	-0.0425	-0.1561	0.1052

En la tabla 5.6 los resultados son idénticos, lo cual significa que aunque la medición fasorial tiene un error anormal, no permite que una medición convencional anormal afecte a otras mediciones cercanas al nodo. Sin embargo la estimación se rechaza. En el caso (1) se detecta el error en las mediciones fasoriales de los nodos 3 y 5, el caso (2) es

similar pero la medición con mayor error son los flujos de potencia activa y potencia reactiva.

Tabla 5.7.- Resultados para caso (3) y caso (4) por Método Newton-Raphson.

Caso 3					Caso 4				
Valores estimados de las Variables de estado					Valores estimados de las Variables de estado				
N	V	A	Pne	Qne	N	V	A	Pne	Qne
1	1.0523	0.0000	1.0878	0.1927	1	1.0521	0.0000	1.0954	0.1914
2	1.0486	-0.0671	0.4721	0.7035	2	1.0487	-0.0644	0.4732	0.6984
3	<b>1.0700</b>	<b>-0.0855</b>	<b>0.4743</b>	<b>0.9207</b>	3	<b>1.0700</b>	<b>-0.0746</b>	<b>0.5985</b>	<b>0.8802</b>
4	0.9893	-0.0740	-0.6979	-0.7017	4	0.9891	-0.0735	-0.7009	-0.7024
5	<b>0.9854</b>	<b>-0.0850</b>	<b>-0.5298</b>	<b>-0.7780</b>	5	<b>0.9854</b>	<b>-0.0921</b>	<b>-0.7011</b>	<b>-0.7088</b>
6	1.0064	-0.1119	-0.7290	-0.6425	6	1.0065	-0.1037	-0.6872	-0.6620
Prueba de Hipótesis					Prueba de Hipótesis				
Factor J		Valor Xi2			Factor J		Valor Xi2		
74.9685		79.8052			40.1616		79.8052		
Porcentaje de la diferencia de medidos y estimados fuera de $1.2\sigma$ 23.4375%					Porcentaje de la diferencia de medidos y estimados fuera de $1.2\sigma$ 14.0625%				
	Per	Pre	Qer	Qre		Per	Pre	Qer	Qre
1-2	0.3088	-0.2988	-0.1445	0.1203	1-2	0.2958	-0.2867	-0.1410	0.1152
1-4	0.4434	-0.4320	0.2128	-0.2091	1-4	0.4410	-0.4297	0.2128	-0.2094
1-5	0.3357	-0.3257	0.1244	-0.1495	1-5	0.3585	-0.3476	0.1195	-0.1407
2-3	0.0622	-0.0615	-0.1344	0.0702	2-3	0.0267	-0.0262	-0.1273	0.0621
2-4	0.3057	-0.2914	0.4582	-0.4505	2-4	0.3257	-0.3111	0.4517	-0.4434
2-5	0.1220	-0.1177	0.1587	-0.1871	2-5	0.1525	-0.1477	0.1498	-0.1768
2-6	0.2810	-0.2750	0.1006	-0.1361	2-6	0.2551	-0.2498	0.1090	-0.1466
3-5	0.1310	-0.1205	0.2589	-0.2891	3-5	0.1912	-0.1802	0.2317	-0.2610
3-6	0.4049	-0.3957	0.5916	-0.5671	3-6	0.4335	-0.4240	0.5863	-0.5603
4-5	0.0255	-0.0254	-0.0422	-0.0355	4-5	0.0400	-0.0396	-0.0496	-0.0277
5-6	0.0595	-0.0584	-0.1167	0.0606	5-6	0.0140	-0.0134	-0.1026	0.0448

Para los resultados de la tabla 5.7, el error anormal en la medición del ángulo afecta a los porcentajes de residuales fuera del rango de  $\pm 1.2\sigma$ , pero el índice  $J(x)$  es menor que  $t$ , sin embargo la prueba de identificación de errores anormales dice que la medición de ángulo de la medición fasorial en los nodos 3 y 5 tiene un error anormal, y aunque el primer criterio dice que el estimado se acepta, el segundo criterio lo rechaza, ya que se tiene un porcentaje mayor del establecido. En los 3 primeros casos se observa cómo se afecta el índice  $J(x)$  y los porcentajes de residuales fuera del rango de  $\pm 1.2\sigma$ , por las mediciones fasoriales erróneas, en el caso 4 el efecto es mucho menor ya que las mediciones fasoriales son correctas.

Ahora se considera un sistema de potencia con baja redundancia. Se considera el sistema de la figura 2.1, con las mediciones de flujo de potencia activa y potencia

reactiva, inyección de potencia activa y potencia reactiva y medición de magnitud de voltaje, detalladas en el apéndice C.

Se analizan los casos: (5) todas las mediciones con un error aleatorio dentro del rango de  $\pm 3\sigma$  y medición fasorial errónea en los nodos 3 y 5 y; (6) similar a (5) pero con mediciones fasoriales erróneas en los nodos 1 y 2. Se aplica la prueba de detección e identificación de errores así como el porcentaje de residuales fuera del rango  $\pm 1.2\sigma$ .

Tabla 5.8.- Resultados para caso (5) y caso (6) por Método Newton-Raphson.

Caso 5					Caso 6				
Valores estimados de las Variables de estado					Valores estimados de las Variables de estado				
N	V	A	Pne	Qne	N	V	A	Pne	Qne
1	1.0386	0.0000	1.0905	0.2197	1	1.0612	0.0000	1.1454	0.3117
2	1.0348	-0.0667	0.4709	0.7184	2	1.0422	-0.0635	0.4642	0.6676
3	1.0590	-0.0855	0.4035	1.1107	3	1.0458	-0.0894	0.1787	0.7763
4	0.9800	-0.0793	-0.7261	-0.5647	4	0.9920	-0.0728	-0.6707	-0.6615
5	0.9565	-0.0850	-0.6116	-0.9490	5	0.9889	-0.0927	-0.6212	-0.5400
6	0.9851	-0.1009	-0.5410	-0.7929	6	0.9825	-0.0953	-0.4279	-0.8736
Prueba de Hipótesis					Prueba de Hipótesis				
Factor J		Valor $\chi^2$			Factor J		Valor $\chi^2$		
8.6059		30.5830			19.5744		27.6893		
Porcentaje de la diferencia de medidos y estimados fuera de $1.2\sigma$ 11.5385%					Porcentaje de la diferencia de medidos y estimados fuera de $1.2\sigma$ 25.0000%				
	Per	Pre	Qer	Qre		Per	Pre	Qer	Qre
1-2	0.2993	-0.2898	-0.1394	0.1156	1-2	0.3258	-0.3161	-0.0731	0.0482
1-4	0.4549	-0.4433	0.1851	-0.1796	1-4	0.4499	-0.4377	0.2463	-0.2397
1-5	0.3363	-0.3248	0.1740	-0.1905	1-5	0.3697	-0.3579	0.1385	-0.1573
2-3	0.0599	-0.0591	-0.1438	0.0818	2-3	0.1058	-0.1052	-0.0676	0.0051
2-4	0.3292	-0.3166	0.3923	-0.3873	2-4	0.2857	-0.2753	0.3696	-0.3694
2-5	0.1355	-0.1291	0.2038	-0.2241	2-5	0.1461	-0.1423	0.1161	-0.1463
2-6	0.2361	-0.2304	0.1506	-0.1853	2-6	0.2428	-0.2356	0.2014	-0.2322
3-5	0.1575	-0.1421	0.3168	-0.3344	3-5	0.0979	-0.0931	0.1566	-0.1981
3-6	0.3052	-0.2942	0.7121	-0.6781	3-6	0.1860	-0.1783	0.6146	-0.5962
4-5	0.0337	-0.0332	0.0022	-0.0760	4-5	0.0423	-0.0419	-0.0523	-0.0254
5-6	0.0175	-0.0165	-0.1239	0.0705	5-6	0.0141	-0.0140	-0.0130	-0.0452

En el caso de tener menor redundancia se tiene un efecto similar al caso de error en parámetros de líneas de transmisión o transformadores. Cuando hay una medición fasorial errónea en un nodo con pocas mediciones convencionales no se afecta tanto el estimado, como es el caso cuando hay presentes muchas mediciones convencionales.

En el caso (5) la estimación es buena y el porcentaje de residuales fuera del rango  $\pm 1.2\sigma$  no es afectado por las mediciones fasoriales con error anormal que se encuentran

en los nodos 3 y 5, esto es debido a que en estos nodos no existen mediciones convencionales. Sin embargo en el caso (6) el índice  $J(x)$  es mayor y el porcentaje  $\pm 1.2\sigma$  excede el valor mínimo, por lo que se rechaza el estimado.

En el caso (5) la prueba de identificación de errores no logra detectar el error en las mediciones fasoriales de los nodos 3 y 5, esto es debido a la baja redundancia en mediciones disponibles en el sistema, en cambio en el caso (6) se logra identificar correctamente el error en las mediciones fasoriales de los nodos 1 y 2.

Los resultados que se presentan justifican la necesidad de aplicar otro criterio en la prueba de detección de errores para aceptar o rechazar el estimado.

### 5.5.2 Resultados con el Método Desacoplado Rápido

Ahora se utiliza el estimador desacoplado rápido y se analizan los casos que se mencionan en el punto anterior. Igualmente se aplica la prueba de detección e identificación de errores, así como el porcentaje de residuales fuera del rango  $\pm 1.2\sigma$ .

Tabla 5.9.- Resultados para caso (1) y caso (2) por Método Desacoplado Rápido.

Caso 1					Caso 2				
Valores estimados de las Variables de estado					Valores estimados de las Variables de estado				
N	V	A	Pne	Qne	N	V	A	Pne	Qne
1	1.0255	0.0000	1.0414	0.1647	1	1.0255	0.0000	1.0414	0.1647
2	1.0279	-0.0686	0.4701	0.7138	2	1.0279	-0.0686	0.4701	0.7138
3	1.0590	-0.0855	0.5267	1.0458	3	1.0590	-0.0855	0.5267	1.0458
4	0.9642	-0.0761	-0.7011	-0.6956	4	0.9642	-0.0761	-0.7011	-0.6956
5	0.9565	-0.0850	-0.5477	-0.8906	5	0.9565	-0.0850	-0.5477	-0.8906
6	0.9919	-0.1129	-0.7028	-0.5969	6	0.9919	-0.1129	-0.7028	-0.5969
Prueba de Hipótesis					Prueba de Hipótesis				
Factor J		Valor $\chi^2$			Factor J		Valor $\chi^2$		
105.5370		79.8052			271.2678		79.8052		
Porcentaje de la diferencia de medidos y estimados fuera de $1.2\sigma$ 26.5625%					Porcentaje de la diferencia de medidos y estimados fuera de $1.2\sigma$ 28.1250%				
	Per	Pre	Qer	Qre		Per	Pre	Qer	Qre
1-2	0.2892	-0.2793	-0.1654	0.1431	1-2	0.2892	-0.2793	-0.1654	0.1431
1-4	0.4312	-0.4201	0.1997	-0.1947	1-4	0.4312	-0.4201	0.1997	-0.1947
1-5	0.3209	-0.3111	0.1304	-0.1525	1-5	0.3209	-0.3111	0.1304	-0.1525
2-3	0.0460	-0.0450	-0.1684	0.1080	2-3	0.0460	-0.0450	-0.1684	0.1080
2-4	0.3214	-0.3049	0.4834	-0.4704	2-4	0.3214	-0.3049	0.4834	-0.4704
2-5	0.1219	-0.1165	0.1831	-0.2065	2-5	0.1219	-0.1165	0.1831	-0.2065
2-6	0.2601	-0.2550	0.0725	-0.1089	2-6	0.2601	-0.2550	0.0725	-0.1089

Tabla 5.9.- Continuación

3-5	0.1575	-0.1421	0.3168	-0.3344	3-5	0.1575	-0.1421	0.3168	-0.3344
3-6	0.4142	-0.4041	0.6211	-0.5912	3-6	0.4142	-0.4041	0.6211	-0.5912
4-5	0.0239	-0.0237	-0.0305	-0.0430	4-5	0.0239	-0.0237	-0.0305	-0.0430
5-6	0.0458	-0.0438	-0.1542	0.1032	5-6	0.0458	-0.0438	-0.1542	0.1032

Tabla 5.10.- Resultados para caso (3) y caso (4) por Método Desacoplado Rápido.

Caso 3					Caso 4				
Valores estimados de las Variables de estado					Valores estimados de las Variables de estado				
N	V	A	Pne	Qne	N	V	A	Pne	Qne
1	1.0488	0.0000	1.0734	0.1673	1	1.0504	0.0000	1.0903	0.1771
2	1.0470	-0.0671	0.4731	0.6998	2	1.0482	-0.0647	0.4713	0.7003
3	<b>1.0700</b>	<b>-0.0855</b>	<b>0.4735</b>	<b>0.9314</b>	3	<b>1.0700</b>	<b>-0.0746</b>	<b>0.6006</b>	<b>0.8819</b>
4	0.9870	-0.0738	-0.6974	-0.7060	4	0.9882	-0.0737	-0.7016	-0.7032
5	<b>0.9854</b>	<b>-0.0850</b>	<b>-0.5228</b>	<b>-0.7567</b>	5	<b>0.9854</b>	<b>-0.0921</b>	<b>-0.6965</b>	<b>-0.7008</b>
6	1.0061	-0.1116	-0.7230	-0.6424	6	1.0065	-0.1038	-0.6864	-0.6591
Prueba de Hipótesis					Prueba de Hipótesis				
Factor J		Valor Xi2			Factor J		Valor Xi2		
76.0469		79.8052			40.3998		79.8052		
Porcentaje de la diferencia de medidos y estimados fuera de $1.2\sigma$ 23.4375%					Porcentaje de la diferencia de medidos y estimados fuera de $1.2\sigma$ 28.1250%				
	Per	Pre	Qer	Qre		Per	Pre	Qer	Qre
1-2	0.3030	-0.2931	-0.1518	0.1277	1-2	0.2939	-0.2847	-0.1457	0.1201
1-4	0.4389	-0.4278	0.2066	-0.2036	1-4	0.4398	-0.4287	0.2089	-0.2058
1-5	0.3314	-0.3219	0.1125	-0.1389	1-5	0.3565	-0.3457	0.1140	-0.1358
2-3	0.0610	-0.0603	-0.1406	0.0769	2-3	0.0252	-0.0248	-0.1293	0.0642
2-4	0.3076	-0.2930	0.4643	-0.4557	2-4	0.3264	-0.3117	0.4550	-0.4462
2-5	0.1203	-0.1162	0.1534	-0.1824	2-5	0.1511	-0.1464	0.1481	-0.1754
2-6	0.2774	-0.2716	0.0950	-0.1309	2-6	0.2533	-0.2481	0.1064	-0.1442
3-5	0.1310	-0.1205	0.2589	-0.2891	3-5	0.1912	-0.1802	0.2317	-0.2610
3-6	0.4028	-0.3935	0.5956	-0.5708	3-6	0.4342	-0.4247	0.5859	-0.5599
4-5	0.0234	-0.0232	-0.0468	-0.0308	4-5	0.0387	-0.0384	-0.0512	-0.0260
5-6	0.0590	-0.0579	-0.1154	0.0593	5-6	0.0142	-0.0136	-0.1028	0.0450

Las condiciones y resultados mencionados para el Método Newton-Raphson son aplicables al Método Desacoplado Rápido. En la tabla 5.9 los resultados son idénticos, sin embargo las mediciones fasoriales contienen un error anormal que afecta la estimación de estado, por lo que deben ser eliminadas.

En la tabla 5.10 se presenta la desventaja de contar con mediciones fasoriales erróneas en el proceso de estimación y también se resalta la ventaja que se tiene cuando estas mediciones precisas son correctas.

También se analiza el caso de sistemas con baja redundancia que tienen mediciones fasoriales sincronizadas con error anormal.

Tabla 5.11.- Resultados para caso (5) y caso (6) por Método Desacoplado Rápido.

Caso 5					Caso 6				
Valores estimados de las Variables de estado					Valores estimados de las Variables de estado				
N	V	A	Pne	Qne	N	V	A	Pne	Qne
1	1.0357	0.0000	1.0883	0.2060	1	1.0612	0.0000	1.1560	0.3094
2	1.0326	-0.0674	0.4677	0.7167	2	1.0422	-0.0635	0.4690	0.6644
3	1.0590	-0.0855	0.4274	1.1447	3	1.0453	-0.0882	0.1904	0.7673
4	0.9769	-0.0800	-0.7342	-0.5747	4	0.9925	-0.0744	-0.6901	-0.6418
5	0.9565	-0.0850	-0.5936	-0.9231	5	0.9881	-0.0934	-0.6390	-0.5424
6	0.9823	-0.1022	-0.5687	-0.8222	6	0.9822	-0.0942	-0.4175	-0.8749
Prueba de Hipótesis					Prueba de Hipótesis				
Factor J		Valor $\chi^2$			Factor J		Valor $\chi^2$		
8.8783		30.5830			19.8057		27.6893		
Porcentaje de la diferencia de medidos y estimados fuera de $1.2\sigma$ 11.5385%					Porcentaje de la diferencia de medidos y estimados fuera de $1.2\sigma$ 25.0000%				
	Per	Pre	Qer	Qre		Per	Pre	Qer	Qre
1-2	0.2994	-0.2896	-0.1431	0.1198	1-2	0.3258	-0.3161	-0.0731	0.0482
1-4	0.4561	-0.4444	0.1849	-0.1787	1-4	0.4576	-0.4452	0.2420	-0.2346
1-5	0.3329	-0.3217	0.1642	-0.1820	1-5	0.3726	-0.3606	0.1406	-0.1586
2-3	0.0551	-0.0543	-0.1515	0.0900	2-3	0.1010	-0.1005	-0.0644	0.0016
2-4	0.3321	-0.3191	0.3989	-0.3930	2-4	0.2970	-0.2867	0.3582	-0.3583
2-5	0.1309	-0.1248	0.1973	-0.2187	2-5	0.1491	-0.1453	0.1177	-0.1475
2-6	0.2392	-0.2334	0.1523	-0.1863	2-6	0.2380	-0.2309	0.2046	-0.2356
3-5	0.1575	-0.1421	0.3168	-0.3344	3-5	0.1046	-0.0998	0.1541	-0.1954
3-6	0.3242	-0.3123	0.7380	-0.6994	3-6	0.1863	-0.1785	0.6116	-0.5935
4-5	0.0293	-0.0288	-0.0030	-0.0709	4-5	0.0419	-0.0415	-0.0490	-0.0287
5-6	0.0239	-0.0230	-0.1171	0.0636	5-6	0.0081	-0.0081	-0.0123	-0.0459

De igual manera, en el caso (5) la prueba de identificación de errores no logra identificar el error en mediciones fasoriales que se encuentran en los nodos 3 y 5, ya que dichos nodos no incluyen mediciones convencionales, provocando que exista baja redundancia en el estimador y no se afecten mediciones cercanas.

En el caso (6) los nodos 1 y 2 cuentan con mediciones convencionales que son afectadas, y esto ayuda a detectar el error en mediciones fasoriales.

La tabla 5.12 muestra un comparativo entre las diferentes técnicas aplicadas para identificar la medición fasorial errónea dentro del proceso de estimación de estado. Los resultados se obtuvieron del caso (1) y caso (4) por el método Newton-Raphson y el método Desacoplado Rápido.

Tabla 5.12.- Comparativo de las 3 técnicas para identificar errores.

Método Newton-Raphson				Método Desacoplado Rápido			
Caso 1				Caso 1			
Nodo	$r_i$	$r_i''$	$r''$	Nodo	$r_i$	$r_i''$	$r''$
Para Voltajes				Para Voltajes			
3	0.0000	0.0001	4.7457	3	0.0000	0.0002	6.4675
5	-0.0000	-0.0002	-5.3688	5	-0.0000	-0.0002	-6.8504
Para Angulos				Para Angulos			
3	-0.0000	-0.0151	-5.0902	3	-0.0000	-0.0101	-3.2174
5	0.0000	0.0228	6.3037	5	0.0000	0.0191	4.8665
Caso 4				Caso 4			
Nodo	$r_i$	$r_i''$	$r''$	Nodo	$r_i$	$r_i''$	$r''$
Para Voltajes				Para Voltajes			
3	0.0000	0.0000	0.5719	3	0.0000	0.0000	0.7324
5	-0.0000	-0.0000	-0.0895	5	-0.0000	-0.0000	-0.1029
Para Angulos				Para Angulos			
3	-0.0000	-0.0001	-0.0445	3	-0.0000	-0.0000	-0.0067
5	0.0000	0.0026	0.6764	5	0.0000	0.0029	0.7339

Los resultados muestran que la técnica de residuales y residuales ponderados trabaja correctamente cuando solamente se emplean mediciones convencionales en el proceso de estimación de estado. La técnica de residuales y residuales ponderados tienen el problema de que, cuando se aplican mediciones precisas en el proceso de estimación de estado, el valor estimado se ajusta al valor medido por la alta ponderación que se otorga a ese tipo de mediciones. Por lo que el residual que se obtiene de la diferencia entre valor medido y valor estimado es muy pequeño y no es tan fácil identificar el error. De igual manera en la técnica de residuales ponderados, al multiplicarse el residual por  $\left(\frac{1}{\sigma}\right)$  el valor obtenido en la mayoría de las veces es menor a 1, perdiendo la posibilidad de detectar algún error en la medición precisa.

Cuando hay combinación de mediciones convencionales y mediciones de alta precisión, la técnica que mejor trabaja es la de residuales normalizados. Esta técnica al relacionar las ponderaciones de todas las mediciones a través de matrices de covariancia logra detectar adecuadamente que medición contiene el error anormal, ya sea medición convencional o medición precisa. Al ser más exacta que las otras dos técnicas, se convierte en la técnica más recomendable para aplicarse de manera práctica.

Tabla 5.13.- Tabla de comparación entre Método Newton-Raphson y Método Desacoplado Rápido.

	Newton-Raphson			Desacoplado Rápido		
	Iteraciones	$\sum P_{Nodales}$	$\sum Q_{Nodales}$	Iteraciones	$\sum P_{Nodales}$	$\sum Q_{Nodales}$
Caso 1	3	0.0871	-0.2582	4	0.0865	-0.2588
Caso 2	3	0.0871	-0.2582	4	0.0865	-0.2588
Caso 3	3	0.0775	-0.3054	4	0.0768	-0.3068
Caso 4	3	0.0779	-0.3032	4	0.0777	-0.3039
Caso 5	3	0.0863	-0.2578	4	0.0870	-0.2526
Caso 6	3	0.0685	-0.3195	4	0.0688	-0.3181

## 5.6 Estimación de estado por descomposición ortogonal con error de parámetros en líneas de transmisión y transformadores de potencia

En esta sección se analiza el problema con un estimador de estado por descomposición ortogonal por el Método Newton-Raphson y el Método Desacoplado Rápido cuando existe un error en el parámetro de líneas de transmisión o transformadores de potencia. Se verá el impacto que tiene sobre el índice  $J(x)$  y el efecto en la prueba de identificación de errores anormales.

### 5.6.1 Método Newton-Raphson

Para el sistema de la Fig. 3.5, se cuenta con mediciones de flujo de potencia activa y potencia reactiva en líneas, inyecciones de potencia activa y potencia reactiva en los nodos y mediciones de magnitud de voltaje en los nodos. Se corre el estimador para los casos: (1) error en mediciones dentro del rango  $\pm 3\sigma$  y error de parámetro en las líneas 4-12 y 10-11 del 15% superior a su valor de impedancia original; (2) similar a (1) pero con el 30% superior a su valor de impedancia original; (3) similar a (1) pero con el 20% inferior a su valor de impedancia original; (4) similar a (1) pero solo con error de parámetro en la línea 4-12 del 30% inferior a su valor de impedancia original. En cada caso se presenta la prueba de detección e identificación de errores.

Tabla 5.14.- Resultados para caso (1) y caso (2) por Método Newton-Raphson.

Caso 1					Caso 2				
Valores estimados de las Variables de estado					Valores estimados de las Variables de estado				
N	V	A	Pne	Qne	N	V	A	Pne	Qne
1	1.0278	0.0000	2.0335	0.1291	1	1.0271	0.0000	2.0341	0.1281
2	1.0278	-0.0008	2.0114	0.1274	2	1.0271	-0.0008	2.0120	0.1265
3	1.0258	-0.0772	-0.3095	-0.1195	3	1.0251	-0.0774	-0.3082	-0.1230
4	1.0164	-0.2723	-4.4899	-0.7950	4	1.0180	-0.2693	-4.4952	-0.8044
5	1.0314	-0.2346	0.9874	0.4065	5	1.0329	-0.2318	0.9858	0.4032
6	1.0314	-0.2346	0.9874	0.4065	6	1.0329	-0.2318	0.9858	0.4032
7	1.0314	-0.2346	0.9874	0.4065	7	1.0329	-0.2318	0.9858	0.4032
8	1.0295	-0.0971	1.2354	0.2587	8	1.0281	-0.0957	1.2345	0.2539
9	1.0287	-0.0963	1.2548	0.2378	9	1.0273	-0.0949	1.2538	0.2330
10	1.0206	-0.1442	0.0000	0.0000	10	1.0194	-0.1428	0.0000	0.0000
11	0.9626	-0.2849	-1.9900	-0.5116	11	0.9586	-0.2927	-1.9815	-0.5186
12	0.9407	-0.4325	-2.4844	-0.4686	12	0.9356	-0.4406	-2.4775	-0.4758
Prueba de Hipótesis					Prueba de Hipótesis				
Factor J		Valor $\chi^2$			Factor J		Valor $\chi^2$		
80.7238		92.8025			110.4554		92.8025		
	Per	Pre	Qer	Qre		Per	Pre	Qer	Qre
1-3	2.0335	-2.0335	0.1291	0.0281	1-3	2.0341	-2.0341	0.1281	0.0294
2-3	2.0114	-2.0114	0.1274	0.0264	2-3	2.0120	-2.0120	0.1265	0.0277
5-4	0.9874	-0.9874	0.4065	-0.3637	5-4	0.9858	-0.9858	0.4032	-0.3606
6-4	0.9874	-0.9874	0.4065	-0.3637	6-4	0.9858	-0.9858	0.4032	-0.3606
7-4	0.9874	-0.9874	0.4065	-0.3637	7-4	0.9858	-0.9858	0.4032	-0.3606
8-10	1.2354	-1.2354	0.2587	-0.1986	8-10	1.2345	-1.2345	0.2539	-0.1938
9-10	1.2548	-1.2548	0.2378	-0.1762	9-10	1.2538	-1.2538	0.2330	-0.1714
3-4	1.2258	-1.1914	-0.1696	0.0705	3-4	1.2057	-1.1723	-0.1843	0.0776
3-4	1.2258	-1.1914	-0.1696	0.0705	3-4	1.2057	-1.1723	-0.1843	0.0776
3-11	1.2839	-1.2436	0.1652	-0.2069	3-11	1.3264	-1.2831	0.1886	-0.2086
4-12	0.8551	-0.8323	0.1550	-0.3527	4-12	0.8070	-0.7838	0.1222	-0.3626
10-11	0.7636	-0.7464	0.0593	-0.3047	10-11	0.7156	-0.6984	0.0187	-0.3099
10-12	1.7266	-1.6521	0.3155	-0.1159	10-12	1.7727	-1.6937	0.3465	-0.1133

Se observa en la tabla 5.14 que un error de parámetro pequeño es suficiente para afectar al índice  $J(x)$  y a mediciones. El efecto del error de parámetro en la estimación de estado es diferente para distintas condiciones de carga en el sistema: carga mínima, mediana carga y carga máxima. En las pruebas realizadas se encontró que el efecto depende de la cantidad de flujo que transporte la línea de transmisión o el transformador de potencia.

Un error de parámetro es detectado como un error de medición, por lo que se debe contar con herramientas alternas que permitan identificar cada uno de los errores que se presentan en estimación de estado. Se debe señalar que al eliminar mediciones con error normal cuando se tiene un error de parámetro se pierde redundancia en la estimación, que puede llegar a causar problemas de observabilidad en el proceso de solución.

Tabla 5.15.- Resultados para caso (3) y caso (4) por Método Newton-Raphson.

Caso 3					Caso 4				
Valores estimados de las Variables de estado					Valores estimados de las Variables de estado				
N	V	A	Pne	Qne	N	V	A	Pne	Qne
1	1.0287	0.0000	2.0321	0.1311	1	1.0252	0.0000	2.0317	0.1332
2	1.0287	-0.0008	2.0100	0.1295	2	1.0252	-0.0008	2.0095	0.1316
3	1.0266	-0.0770	-0.3131	-0.1127	3	1.0231	-0.0776	-0.3139	-0.1086
4	1.0105	-0.2827	-4.4898	-0.7780	4	1.0077	-0.2825	-4.4901	-0.7730
5	1.0258	-0.2446	0.9872	0.4130	5	1.0232	-0.2442	0.9870	0.4150
6	1.0258	-0.2446	0.9872	0.4130	6	1.0232	-0.2442	0.9870	0.4150
7	1.0258	-0.2446	0.9872	0.4130	7	1.0232	-0.2442	0.9870	0.4150
8	1.0320	-0.1013	1.2313	0.2649	8	1.0376	-0.0817	1.2360	0.2563
9	1.0311	-0.1005	1.2507	0.2440	9	1.0368	-0.0809	1.2554	0.2354
10	1.0228	-0.1480	-0.0000	0.0000	10	1.0288	-0.1280	-0.0000	0.0000
11	0.9748	-0.2606	-1.9903	-0.4941	11	0.9695	-0.2665	-1.9959	-0.5088
12	0.9532	-0.4099	-2.4856	-0.4544	12	0.9579	-0.3907	-2.4853	-0.4577
Prueba de Hipótesis					Prueba de Hipótesis				
Factor J		Valor Xi2			Factor J		Valor Xi2		
97.7825		92.8025			86.7939		92.8025		
	Per	Pre	Qer	Qre		Per	Pre	Qer	Qre
1-3	2.0321	-2.0321	0.1311	0.0256	1-3	2.0317	-2.0317	0.1332	0.0245
2-3	2.0100	-2.0100	0.1295	0.0239	2-3	2.0095	-2.0095	0.1316	0.0228
5-4	0.9872	-0.9872	0.4130	-0.3695	5-4	0.9870	-0.9870	0.4150	-0.3712
6-4	0.9872	-0.9872	0.4130	-0.3695	6-4	0.9870	-0.9870	0.4150	-0.3712
7-4	0.9872	-0.9872	0.4130	-0.3695	7-4	0.9870	-0.9870	0.4150	-0.3712
8-10	1.2313	-1.2313	0.2649	-0.2053	8-10	1.2360	-1.2360	0.2563	-0.1971
9-10	1.2507	-1.2507	0.2440	-0.1829	9-10	1.2554	-1.2554	0.2354	-0.1747
3-4	1.2915	-1.2533	-0.1250	0.0534	3-4	1.2788	-1.2411	-0.1283	0.0554
3-4	1.2915	-1.2533	-0.1250	0.0534	3-4	1.2788	-1.2411	-0.1283	0.0554
3-11	1.1459	-1.1144	0.0878	-0.1935	3-11	1.1696	-1.1364	0.1008	-0.1927
4-12	0.9783	-0.9578	0.2236	-0.3314	4-12	0.9531	-0.9360	0.2298	-0.3302
10-11	0.8922	-0.8760	0.1552	-0.3005	10-11	0.8791	-0.8594	0.1299	-0.3161
10-12	1.5898	-1.5278	0.2330	-0.1230	10-12	1.6124	-1.5493	0.2418	-0.1275

Con base en el análisis realizado para diferentes casos de estudio, se concluye que el efecto de un error de parámetro en la estimación de estado depende de varios factores, entre ellos: redundancia del sistema de medición, conectividad de la red eléctrica, condición de carga y la magnitud del error de parámetro.

### 5.6.2 Método Desacoplado Rápido

También se probó el estimador de estado desacoplado rápido por descomposición ortogonal para los casos mencionados en el punto anterior. Aplicando en cada uno de ellos la prueba de detección e identificación de errores, como medio para validar la información del sistema de medición.

El comportamiento del estimador desacoplado rápido que utiliza la técnica de descomposición ortogonal es similar al Método Newton-Raphson. Se concluye que ambos estimadores son eficientes para presentar una solución aceptable de la ecuación de estimación de estado.

Tabla 5.16.- Resultados para caso (1) y caso (2) por Método Desacoplado Rápido.

Caso 1					Caso 2				
Valores estimados de las Variables de estado					Valores estimados de las Variables de estado				
N	V	A	Pne	Qne	N	V	A	Pne	Qne
1	1.0267	0.0000	2.0286	0.1300	1	1.0258	0.0000	2.0283	0.1288
2	1.0266	-0.0006	2.0121	0.1287	2	1.0258	-0.0006	2.0121	0.1275
3	1.0246	-0.0772	-0.3033	-0.1168	3	1.0239	-0.0773	-0.3033	-0.1210
4	1.0149	-0.2724	-4.4823	-0.7958	4	1.0162	-0.2692	-4.4861	-0.8101
5	1.0299	-0.2346	0.9880	0.4054	5	1.0310	-0.2316	0.9867	0.4004
6	1.0299	-0.2346	0.9880	0.4054	6	1.0310	-0.2316	0.9867	0.4004
7	1.0299	-0.2346	0.9880	0.4054	7	1.0310	-0.2316	0.9867	0.4004
8	1.0291	-0.0979	1.2359	0.2621	8	1.0288	-0.0972	1.2342	0.2580
9	1.0283	-0.0970	1.2594	0.2425	9	1.0280	-0.0962	1.2577	0.2383
10	1.0200	-0.1450	-0.0000	0.0000	10	1.0199	-0.1442	-0.0000	0.0000
11	0.9615	-0.2863	-1.9972	-0.5094	11	0.9581	-0.2943	-1.9887	-0.5153
12	0.9395	-0.4343	-2.4921	-0.4654	12	0.9355	-0.4422	-2.4842	-0.4697
Prueba de Hipótesis					Prueba de Hipótesis				
Factor J		Valor Xi2			Factor J		Valor Xi2		
81.0708		92.8025			110.9912		92.8025		
	Per	Pre	Qer	Qre		Per	Pre	Qer	Qre
1-3	2.0286	-2.0286	0.1300	0.0268	1-3	2.0283	-2.0283	0.1288	0.0282
2-3	2.0121	-2.0121	0.1287	0.0256	2-3	2.0121	-2.0121	0.1275	0.0271
5-4	0.9880	-0.9880	0.4054	-0.3624	5-4	0.9867	-0.9867	0.4004	-0.3577
6-4	0.9880	-0.9880	0.4054	-0.3624	6-4	0.9867	-0.9867	0.4004	-0.3577
7-4	0.9880	-0.9880	0.4054	-0.3624	7-4	0.9867	-0.9867	0.4004	-0.3577
8-10	1.2359	-1.2359	0.2621	-0.2018	8-10	1.2342	-1.2342	0.2580	-0.1979
9-10	1.2594	-1.2594	0.2425	-0.1802	9-10	1.2577	-1.2577	0.2383	-0.1763
3-4	1.2240	-1.1895	-0.1672	0.0688	3-4	1.2022	-1.1689	-0.1805	0.0740
3-4	1.2240	-1.1895	-0.1672	0.0688	3-4	1.2022	-1.1689	-0.1805	0.0740
3-11	1.2895	-1.2487	0.1653	-0.2034	3-11	1.3328	-1.2890	0.1848	-0.2013
4-12	0.8607	-0.8375	0.1537	-0.3484	4-12	0.8118	-0.7885	0.1150	-0.3534
10-11	0.7658	-0.7485	0.0622	-0.3060	10-11	0.7169	-0.6997	0.0234	-0.3139
10-12	1.7294	-1.6545	0.3199	-0.1170	10-12	1.7750	-1.6957	0.3508	-0.1162

Como se mencionó en un capítulo anterior un error de parámetro en una línea de transmisión o transformador de potencia con impedancia casi cero produce problemas de convergencia en el estimador convencional. En este caso, el estimador por descomposición ortogonal converge, aunque se detecta error en mediciones y el índice  $J(x)$  es mayor que el valor de la distribución  $x_i^2$ .

Tabla 5.17.- Resultados para caso (3) y caso (4) por Método Desacoplado Rápido.

Caso 3					Caso 4				
Valores estimados de las Variables de estado					Valores estimados de las Variables de estado				
N	V	A	Pne	Qne	N	V	A	Pne	Qne
1	1.0277	0.0000	2.0281	0.1330	1	1.0243	0.0000	2.0276	0.1348
2	1.0277	-0.0006	2.0120	0.1316	2	1.0243	-0.0006	2.0116	0.1334
3	1.0256	-0.0770	-0.3035	-0.1073	3	1.0221	-0.0775	-0.3047	-0.1042
4	1.0097	-0.2835	-4.4863	-0.7670	4	1.0068	-0.2832	-4.4867	-0.7651
5	1.0252	-0.2453	0.9866	0.4159	5	1.0224	-0.2449	0.9865	0.4170
6	1.0252	-0.2453	0.9866	0.4159	6	1.0224	-0.2449	0.9865	0.4170
7	1.0252	-0.2453	0.9866	0.4159	7	1.0224	-0.2449	0.9865	0.4170
8	1.0292	-0.1008	1.2326	0.2647	8	1.0354	-0.0815	1.2362	0.2562
9	1.0284	-0.0999	1.2561	0.2451	9	1.0346	-0.0806	1.2597	0.2366
10	1.0200	-0.1478	-0.0000	0.0000	10	1.0266	-0.1280	-0.0000	0.0000
11	0.9720	-0.2616	-1.9967	-0.4988	11	0.9673	-0.2676	-2.0020	-0.5110
12	0.9507	-0.4116	-2.4935	-0.4583	12	0.9559	-0.3921	-2.4910	-0.4606
Prueba de Hipótesis					Prueba de Hipótesis				
Factor J		Valor Xi2			Factor J		Valor Xi2		
98.4621		92.8025			87.2145		92.8025		
	Per	Pre	Qer	Qre		Per	Pre	Qer	Qre
1-3	2.0281	-2.0281	0.1330	0.0235	1-3	2.0276	-2.0276	0.1348	0.0227
2-3	2.0120	-2.0120	0.1316	0.0224	2-3	2.0116	-2.0116	0.1334	0.0216
5-4	0.9866	-0.9866	0.4159	-0.3723	5-4	0.9865	-0.9865	0.4170	-0.3731
6-4	0.9866	-0.9866	0.4159	-0.3723	6-4	0.9865	-0.9865	0.4170	-0.3731
7-4	0.9866	-0.9866	0.4159	-0.3723	7-4	0.9865	-0.9865	0.4170	-0.3731
8-10	1.2326	-1.2326	0.2647	-0.2047	8-10	1.2362	-1.2362	0.2562	-0.1967
9-10	1.2561	-1.2561	0.2451	-0.1831	9-10	1.2597	-1.2597	0.2366	-0.1752
3-4	1.2938	-1.2554	-0.1261	0.0564	3-4	1.2805	-1.2426	-0.1286	0.0574
3-4	1.2938	-1.2554	-0.1261	0.0564	3-4	1.2805	-1.2426	-0.1286	0.0574
3-11	1.1491	-1.1171	0.0990	-0.2012	3-11	1.1735	-1.1399	0.1088	-0.1971
4-12	0.9843	-0.9634	0.2370	-0.3409	4-12	0.9579	-0.9406	0.2394	-0.3371
10-11	0.8960	-0.8796	0.1552	-0.2976	10-11	0.8820	-0.8621	0.1304	-0.3138
10-12	1.5926	-1.5301	0.2326	-0.1174	10-12	1.6139	-1.5504	0.2415	-0.1234

En la aplicación del estimador con descomposición ortogonal se analizan los casos siguientes: (1) error en mediciones dentro del rango  $\pm 3\sigma$  y error de parámetro en la línea 4-12 con una impedancia de  $(Z = 1 \times 10^{-13})$ , por el Método Newton-Raphson y el Método Desacoplado Rápido.

En este caso el estimador converge con la transformación ortogonal utilizada en el problema. Sin embargo en la prueba de identificación de errores se debe tener cuidado al momento de interpretar los resultados, ya que existe una premultiplicación y postmultiplicación de la matriz jacobiana sobre la matriz de ganancia  $(H^T [H^T R^{-1} H^T]^{-1} H^T)$ , y en esta ecuación no se aplica la transformación y puede hacerla casi singular y no se podrá identificar errores en mediciones.

Tabla 5.18.- Resultados para caso (1).

Método Newton-Raphson					Método Desacoplado Rápido				
Valores estimados de las Variables de estado					Valores estimados de las Variables de estado				
N	V	A	Pne	Qne	N	V	A	Pne	Qne
1	1.0154	0.0000	2.0249	0.1390	1	1.0146	0.0000	2.0155	0.1407
2	1.0154	-0.0009	2.0028	0.1373	2	1.0146	-0.0004	2.0056	0.1397
3	1.0130	-0.0788	-0.3327	-0.0968	3	1.0122	-0.0786	-0.3228	-0.0910
4	0.9904	-0.3014	-4.5449	-0.7572	4	0.9893	-0.3014	-4.5420	-0.7569
5	1.0065	-0.2625	0.9683	0.4223	5	1.0054	-0.2625	0.9678	0.4221
6	1.0065	-0.2625	0.9683	0.4223	6	1.0054	-0.2625	0.9678	0.4221
7	1.0065	-0.2625	0.9683	0.4223	7	1.0054	-0.2625	0.9678	0.4221
8	1.0553	-0.0309	1.2471	0.2441	8	1.0534	-0.0304	1.2460	0.2416
9	1.0545	-0.0301	1.2666	0.2231	9	1.0526	-0.0295	1.2695	0.2220
10	1.0472	-0.0760	-0.0000	0.0000	10	1.0453	-0.0756	-0.0000	0.0000
11	0.9735	-0.2392	-1.9924	-0.5216	11	0.9716	-0.2402	-2.0017	-0.5221
12	0.9904	-0.3014	-2.3893	-0.4151	12	0.9893	-0.3014	-2.3862	-0.4100
Prueba de Hipótesis					Prueba de Hipótesis				
Factor J		Valor Xi2			Factor J		Valor Xi2		
291.8974		92.8025			292.5991		92.8025		
	Per	Pre	Qer	Qre		Per	Pre	Qer	Qre
1-3	2.0249	-2.0249	0.1390	0.0208	1-3	2.0155	-2.0155	0.1407	0.0179
2-3	2.0028	-2.0028	0.1373	0.0190	2-3	2.0056	-2.0056	0.1397	0.0174
5-4	0.9683	-0.9683	0.4223	-0.3782	5-4	0.9678	-0.9678	0.4221	-0.3780
6-4	0.9683	-0.9683	0.4223	-0.3782	6-4	0.9678	-0.9678	0.4221	-0.3780
7-4	0.9683	-0.9683	0.4223	-0.3782	7-4	0.9678	-0.9678	0.4221	-0.3780
8-10	1.2471	-1.2471	0.2441	-0.1861	8-10	1.2460	-1.2460	0.2416	-0.1836
9-10	1.2666	-1.2666	0.2231	-0.1637	9-10	1.2695	-1.2695	0.2220	-0.1620
3-4	1.3568	-1.3133	-0.0740	0.0491	3-4	1.3558	-1.3123	-0.0722	0.0480
3-4	1.3568	-1.3133	-0.0740	0.0491	3-4	1.3558	-1.3123	-0.0722	0.0480
3-11	0.9814	-0.9580	0.0114	-0.1683	3-11	0.9868	-0.9631	0.0181	-0.1718
4-12	0.9867	-0.9867	0.2793	-0.2813	4-12	0.9861	-0.9861	0.2813	-0.2813
10-11	1.0627	-1.0344	0.2184	-0.3532	10-11	1.0671	-1.0386	0.2189	-0.3503
10-12	1.4509	-1.4026	0.1313	-0.1338	10-12	1.4484	-1.4001	0.1267	-0.1287

Por lo tanto siempre se deberá verificar la base de datos que da la conectividad de la red eléctrica para que no haya presencia de error en parámetros con impedancia igual o casi cero. Además se debe contar con herramientas alternas que permitan detectar error en parámetros de líneas o transformadores para no depender exclusivamente de las pruebas de detección e identificación de errores.

# CAPITULO VI

## CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

### 6.1 Introducción

El proceso de estimación de estado es una aplicación indispensable para validar la información en los centros de control de energía eléctrica. La información validada permite a los operadores del sistema determinar con un alto nivel de confiabilidad las condiciones de operación del sistema eléctrico de potencia.

El objetivo de validar los resultados del estimador es disponer de una base de datos confiable para el desarrollo de diversos estudios de operación económica y de seguridad operativa.

En la validación es necesario contar con herramientas que permitan detectar e identificar errores anormales en mediciones, parámetros y topología de la red. Esta fase es la más importante del proceso de estimación de estado.

### 6.2 Conclusiones

Del análisis realizado en este trabajo se obtuvieron las siguientes conclusiones.

### 6.2.1 Estimación de estado convencional

Los algoritmos de estimación de estado generalmente no presentan problemas de convergencia cuando se emplean solamente mediciones convencionales con un nivel de precisión similar.

Los métodos de estimación de estado más aplicados en los centros de control son el Newton-Raphson y la variante conocida como Desacoplado Rápido. El método Desacoplado Rápido es el más eficiente desde el punto de vista computacional por su rapidez de ejecución y menores requerimientos computacionales.

La utilización de inyecciones cero como mediciones en un algoritmo de estimación convencional produce problemas de convergencia. Para evitar estos problemas se debe reducir la ponderación de estas mediciones, pero al hacerlo se pierde la precisión de las mismas.

Al combinar mediciones convencionales con mediciones fasoriales sincronizadas en el estimador de estado convencional no se presentan problemas de convergencia. Lo anterior debido a que la ponderación de la medición fasorial no es lo suficientemente pequeña para hacer singular la matriz de ganancia ya que afecta solamente al término de la diagonal principal del nodo al que está conectada.

En muchos casos los problemas de convergencia son provocados por la utilización de inyecciones cero, ya que éstas mediciones afectan diversos términos de la matriz de ganancia, haciéndola singular.

### 6.2.2 Estimación de estado con descomposición ortogonal

Para resolver los problemas de convergencia por la combinación de mediciones convencionales con mediciones precisas se analizó una técnica de descomposición ortogonal. Con ésta transformación se mantiene la precisión de la medición exacta y no

hay necesidad de reducir su ponderación, además se elimina el problema de convergencia y no se afecta la opción de detectar e identificar errores anormales.

Los métodos de solución utilizados en éste trabajo para la estimación de estado con descomposición ortogonal, permitieron combinar sin problemas mediciones convencionales y mediciones con alta precisión (nodos con inyección cero y mediciones fasoriales) aunque la ponderación fuera muy pequeña.

Al aplicar la técnica de estimación de estado con descomposición ortogonal la carga computacional crece ya que se realiza una gran cantidad de operaciones para obtener la matriz cuadrada  $[Q]$  ortogonal y la matriz rectangular  $[U]$  en comparación con obtener la matriz inversa en los algoritmos de estimación convencional.

### 6.2.3 Mediciones fasoriales

La inclusión de mediciones fasoriales sincronizadas permite aumentar la redundancia del sistema de información con mediciones muy precisas de las variables de estado.

Si se dispone de mediciones fasoriales en todos los nodos sería posible utilizar una formulación lineal para la solución del problema, como se muestra en los resultados del capítulo IV, en éste caso la estimación de las variables de estado se obtiene al multiplicar una matriz constante por el vector de mediciones.

Para identificar un error anormal en la medición fasorial es necesario utilizar mediciones de diferencias angulares nodales para dar redundancia al estimador. De lo contrario, el valor estimado se ajusta al valor medido y no hay posibilidad de identificar un error anormal en la medición fasorial.

#### 6.2.4 Detección e identificación de errores

Con la inclusión de mediciones fasoriales precisas, el proceso de estimación de estado siempre se mejora aún ante la presencia de mediciones convencionales anormales. Esto significa que un estimado se podría aceptar aún cuando el índice  $J(x) > t_j$ , en la tesis se propone un criterio para la aceptación de la estimación de variables de estado.

Un error anormal de una medición convencional provoca que el índice  $J(x)$  sea grande, y un alto porcentaje de los residuales ponderados están fuera de un rango especificado. La medición fasorial precisa no evita que el índice  $J(x)$  sea grande, pero mantiene el porcentaje de los residuales ponderados dentro del rango especificado.

La medición fasorial es más efectiva cuando se localiza en nodos relacionados con una medición convencional anormal. La medición fasorial precisa reduce el efecto de un error anormal en una medición convencional en otras mediciones cercanas, debido a su alta ponderación en el proceso de estimación.

Cuando se utilizan únicamente mediciones convencionales en el proceso de estimación de estado, las técnicas que se utilizan para identificar una medición anormal, residuales ponderados y residuales normalizados son efectivas y trabajan satisfactoriamente si existe una redundancia adecuada.

Cuando se combinan mediciones convencionales con mediciones fasoriales en el proceso de estimación, la mejor técnica para identificar las mediciones con error anormal (convencionales y fasoriales) es la de residuales normalizados.

El proceso de identificación de errores anormales en mediciones convencionales y fasoriales no presentó modificaciones cuando se utilizó tanto el estimador convencional como el estimador con descomposición ortogonal.

### 6.3 Recomendaciones para trabajos futuros

Se recomienda aplicar la metodología utilizada en éste trabajo en el diseño de algoritmos de estimación de estado en variables de fase (estimador trifásico). El objetivo es extender el estudio al caso desbalanceado y considerar de manera completa las características reales de un sistema eléctrico de potencia.

Incluir en los algoritmos de estimación de estado trifásica mediciones precisas (inyecciones cero y mediciones fasoriales) y analizar los problemas que se pudieran presentar al momento de combinarlas con mediciones convencionales.

Analizar técnicas que permitan detectar errores de parámetros en líneas de transmisión y transformadores de potencia en los algoritmos de estimación de estado trifásica, así como técnicas para detectar posibles errores en el estado de interruptores que producen errores de topología en una red eléctrica.

Para analizar en forma real las ventajas y desventajas que se pudieran presentar en estimación de estado se recomienda utilizar el algoritmo de estimación de estado que se presenta en este trabajo de tesis con datos de un sistema de potencia real con mediciones fasoriales sincronizadas.

### 6.4 Aportaciones del trabajo

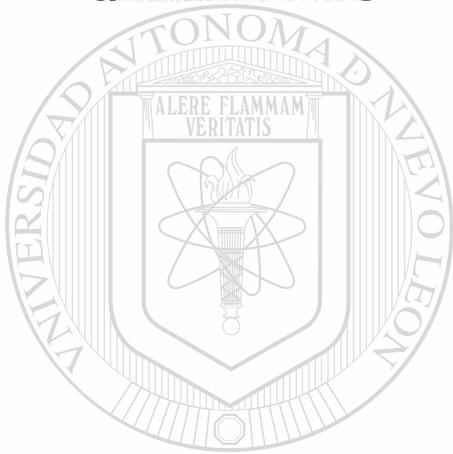
Se presentó un análisis completo de aplicación de la descomposición ortogonal en la estimación de estado y se probó que ésta técnica es adecuada para la modelación de mediciones precisas (mediciones fasoriales e inyecciones cero).

Se verificó la efectividad del algoritmo de estimación de estado con descomposición ortogonal para evitar problemas de convergencia cuando se combinan mediciones convencionales y mediciones precisas (mediciones fasoriales e inyecciones cero).

Se demostró que las mediciones fasoriales siempre ayudan a mejorar la estimación de las variables de estado aun en presencia de mediciones convencionales con error anormal.

Se presentó una formulación lineal para la estimación cuando se cuenta con mediciones fasoriales en todos los nodos de la red eléctrica.

Se presentó un nuevo criterio para la aceptación de la estimación y la detección de errores anormales cuando se emplean mediciones fasoriales. Este nuevo criterio cambia lo establecido en las pruebas de hipótesis tradicionales.



# UANL

---

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN

DIRECCIÓN GENERAL DE BIBLIOTECAS

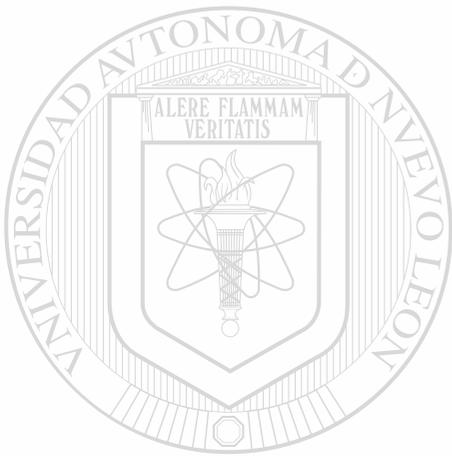


## REFERENCIAS

- [1] F. Wu Felix, 'Power system state estimation: a survey', Department of Electrical Engineering and computer Sciences, University of California, Berkeley, USA, January 1990.
- [2] F.C. Schweppe and E.J. Handschin, 'Static state estimation in electric power system', Proc. IEEE, vol 62, pp. 972-983, July 1974.
- [3] Larson, R. Tinney, W. And Peschon, J., 'State estimation in power system: Part I-Theory and feasibility' IEEE trans. On PAS, vol 89, pp 345-352, March 1970.
- [4] Larson, R. Tinney, W. And Peschon, J., 'State estimation in power system: Part II-Implementation applications' IEEE trans. On PAS, vol 89, pp 353-363, March 1970.
- [5] F.C. Aschmoneit, N.M. Peterson, and E.C. Adrian, 'State estimation with equality constrains', 10<sup>th</sup> PICA Conf. Proc., pp. 427-430, May 1977.
- [6] J.J. Allemong, L. Radu, A.M. Sasson, 'A fast and reliable state estimation algorithm for AEP's new control center', IEEE Trans. vol PAS-101, No. 4, pp. 933-944, April 1982.
- [7] A. Monticelli, A. Garcia, 'Fast decoupled state estimators', IEEE Trans. vol 5, No. 2, pp. 556-564, May 1990.
- [8] A. Monticelli, A. Garcia, and P. Abreu, 'Fast decoupled state estimation and bad data processing', IEEE Trans. on PAS, vol 98, pp. 1645-1652, September 1979.
- [9] A. Simoes Costa and V. H. Quintana. 'A robust numerical technique for power system state estimation', IEEE Trans. on PAS, vol 100, pp. 691-698, February 1981.

- [10] A. Simoes Costa and V. H. Quintana. 'An orthogonal row processing algorithm for power system sequential state estimation', IEEE Trans. on PAS, vol 100, pp. 3791-3800, August 1981.
- [11] N. Vempati, I.W. Slutsker, W.F. Tinney, 'Enhancements to givens rotations for power system state estimation', IEEE Trans. vol 6, pp. 842-849, May 1991.
- [12] A. Monticelli, C.A.F. Murari, and F.F. Wu, 'A hybrid state estimator: Solving normal equations by orthogonal transformations', IEEE Trans. on PAS vol 104, pp. 3460-3468, December 1985.
- [13] F. Broussolle, 'State estimation in power system: Detecting bad data through the sparse inverse matrix method', IEEE Trans. On PAS, vol 97, pp. 678-682, May 1978.
- [14] F. Aboytes, and B.J. Cory, 'Identification of measurement parameter and configurations errors in static state estimation and bad data processing', PICA Conf. Proc., May 1975.
- [15] L. Mili, Th. Van Custem, and M. Ribbens-Pavell, 'Hypothesis testing identification: A new method for bad data analysis in power system state estimation', IEEE Trans. On PAS, vol 103, pp. 3239-3252, November 1984.
- [16] F. Aboytes, F. Betancourt, 'Conceptos básicos para la aplicación de técnicas de estimación de estado', Simposium IEEE, Septiembre 1988, Monterrey, N.L.
- [17] F. Betancourt, F. Aboytes, 'Procesador de información generalizado para la supervisión en tiempo real de sistemas de potencia débiles', Tesis Doctoral F. Betancourt, Monterrey, N.L., Diciembre 1993.
- [18] A.G. Phadke, 'Synchronized phasor measurements in power system', IEEE Computers Applications in power, pp. 10-15, April 1993.
- [19] B. Fardanesh, S. Zelingher, 'Multifunctional synchronized measurement network', IEEE Computers Applications in power, pp. 26-30, January 1998.
- [20] R.O. Burnett, M.M. Butts, and P.S. Sterlina, 'Power system applications for phasor measurement units', IEEE Computers Applications in power, pp. 8-13, January 1994.
- [21] K.E. Martin, A.G. Phadke, J.S. Thorp, and others, 'IEEE standard for synchrophasors for power systems', IEEE Trans. Vol 13, January 1998.

- [22] A. Monticelli, 'State estimation in electric power system: A generalized approach', primera edición, Kluwer Academic Publishers, 1999.
- [23] Allen J. Wood and Bruce F. Wollenberg, 'Power Generation, operation and control', second edition, John Wiley & Sons, Inc., 1992.
- [24] Walpole and Myers, 'Probabilidad y Estadística', cuarta edición, Mc. Graw Hill, 1992.
- [25] F. Aboytes Gacía, 'Análisis de sistemas de potencia', FIME-AUNL, 1993.



# UANL

---

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN



DIRECCIÓN GENERAL DE BIBLIOTECAS

## INDICE DE TABLAS

Tabla	Página	
2.1	Tabla de resultados caso (1), caso (2) y caso (3).	11
2.2	Tabla de resultados caso (1) y caso (2) por Método Newton-Raphson.	19
2.3	Tabla de resultados caso (3) y caso (4) por Método Newton-Raphson.	19
2.4	Tabla de convergencia para el Método Newton-Raphson.	20
2.5	Tabla de resultados caso (1) y caso (2) por Método Desacoplado Rápido.	21
2.6	Tabla de resultados caso (3) y caso (4) por Método Desacoplado Rápido.	21
2.7	Tabla de convergencia para el Método Desacoplado Rápido.	22
2.8	Tabla de resultados caso (1) y caso (2) por Método Newton-Raphson.	23
2.9	Tabla de resultados caso (3) y caso (4) por Método Newton-Raphson.	24
<del>2.10</del>	<del>Tabla de resultados caso (1) y caso (2) por Método Desacoplado Rápido.</del>	<del>25</del>
2.11	Tabla de resultados caso (3) y caso (4) por Método Desacoplado Rápido.	26
3.1	Comparación de resultados del estimador con restricciones de igualdad y el estimador por descomposición ortogonal.	40
3.2	Resultados para caso (1) y caso (2) por Método Newton-Raphson.	45
3.3	Resultados para caso (3) y caso (4) por Método Newton-Raphson.	46
3.4	Tabla de convergencia para el Método Newton-Raphson.	46
3.5	Resultados para caso (1) y caso (2) por Método Desacoplado Rápido.	47
3.6	Resultados para caso (3) y caso (4) por Método Desacoplado Rápido.	48
3.7	Tabla de convergencia para el Método Desacoplado Rápido.	48
3.8	Tabla de ajuste de inyección de potencia, en nodo con inyección cero caso (2) por el Método Newton-Raphson.	49
3.9	Tabla de ajuste de inyección de potencia, en nodo con inyección cero	49

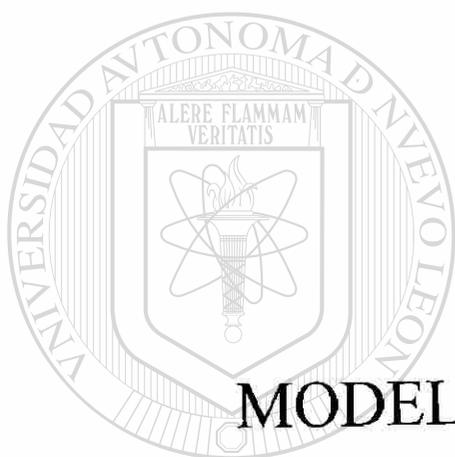
caso (2) por el Método Desacoplado Rápido.

3.10	Resultados estimación convencional para sistema con inyección cero.	50
4.1	Fasores calculados para las señales de voltaje.	54
4.2	Resultados del caso (1) y caso (2) con el Método de Newton-Raphson.	58
4.3	Resultados caso (3) y caso (4) por Método Newton-Raphson.	60
4.4	Resultados caso (1) y caso (2) por Método Desacoplado Rápido.	61
4.5	Resultados caso (3) y caso (4) por Método Desacoplado Rápido.	61
4.6	Tabla de comparación entre Método Newton-Raphson y Método Desacoplado Rápido.	62
4.7	Resultados para caso (1) y caso (2) por Método Newton-Raphson.	63
4.8	Resultados para caso (3) y caso (4) por Método Newton-Raphson.	64
4.9	Resultados para caso (5) y caso (6) por Método Newton-Raphson.	66
4.10	Resultados para caso (1) y caso (2) por Método Desacoplado Rápido.	67
4.11	Resultados para caso (3) y caso (4) por Método Desacoplado Rápido.	68
4.12	Resultados para caso (5) y caso (6) por Método Desacoplado Rápido.	69
4.13	Tabla de comparación entre Método Newton-Raphson y Método Desacoplado Rápido.	71
4.14	Resultados para caso con MFS en todos los nodos.	71
5.1	Valores de área bajo la curva de una distribución normal para diferentes $\sigma$	78
5.2	Tabla de resultados para caso (1) y caso (2).	79
5.3	Tabla de resultados para caso (3) y caso (4).	79
5.4	Tabla de resultados para caso (1) y caso (2).	81
5.5	Tabla de resultados para caso (3) y caso (4).	82
5.6	Resultados para caso (1) y caso (2) por Método Newton-Raphson.	90
5.7	Resultados para caso (3) y caso (4) por Método Newton-Raphson.	91
5.8	Resultados para caso (5) y caso (6) por Método Newton-Raphson.	92
5.9	Resultados para caso (1) y caso (2) por Método Desacoplado Rápido.	94
5.10	Resultados para caso (3) y caso (4) por Método Desacoplado Rápido.	94
5.11	Resultados para caso (5) y caso (6) por Método Desacoplado Rápido.	95
5.12	Comparativo de las 3 técnicas para identificar errores.	96

5.13	Tabla de comparación entre Método Newton-Raphson y Método Desacoplado Rápido.	96
5.14	Resultados para caso (1) y caso (2) por Método Newton-Raphson.	97
5.15	Resultados para caso (3) y caso (4) por Método Newton-Raphson.	98
5.16	Resultados para caso (1) y caso (2) por Método Desacoplado Rápido.	100
5.17	Resultados para caso (3) y caso (4) por Método Desacoplado Rápido.	100
5.18	Resultados para caso (1).	101
C.1a	Mediciones en generación y carga, sistema de prueba 1, caso lineal.	127
C.1b	Conexión y medición entre nodos, sistema de prueba 1, caso lineal.	127
C.2a	Medición en generación y carga, sistema de prueba 1, caso no lineal.	128
C.2b	Conexión entre nodos, sistema de prueba 1, caso no lineal.	128
C.2c	Medición entre nodos, sistema de prueba 1, caso no lineal.	128
C.3a	Mediciones en generación y carga, sistema de prueba 2, caso lineal.	128
C.3b	Conexión y medición entre nodos, sistema de prueba 2, caso lineal.	129
C.4a	Medición en generación y carga, sistema de prueba 3, caso no lineal.	129
C.4b	Conexión entre nodos, sistema de prueba 3, caso no lineal.	129
C.4c	Medición entre nodos, sistema de prueba 3, caso no lineal.	130
C.5a	Medición en generación y carga, sistema de prueba 4, caso no lineal.	130
C.5b	Conexión entre nodos, sistema de prueba 4, caso no lineal.	130
C.5c	Medición entre nodos, sistema de prueba 4, caso no lineal.	131

# INDICE DE FIGURAS

Tabla	Página
2.1	Sistema de prueba 1 para estimación lineal. 11
3.1	Sistema con inyección cero. 29
3.2	Valores estimados para sistema con inyección cero (estimador convencional). 29
3.3	Valores estimados para sistema con inyección cero (estimador con restricciones de igualdad). 39
3.4	Sistema de prueba 2 para estimación lineal. 39
3.5	Sistema de prueba 3 para estimación de estado. 45
4.1	Representación fasorial de una forma de onda sinusoidal 53
4.2	Señales de voltaje. 54
4.3	Ventana de datos e incertidumbre en la estimación del fasor 55
4.4	Unidad de Medición Fasorial. 57
4.5	Sistema de prueba 4 para estimación de estado. 63
5.1	Función de distribución de probabilidad normal. 77
5.2	Función de distribución normal de la medición $z_i$ . 83
5.3	Función de distribución normal del estimado $f_i$ . 84
5.4	Función de distribución normal del residual $r_i$ . 85
5.5	Función de distribución normal para residual normalizado ponderado. 85
A.1	Modelo de la Línea de Transmisión ( $\pi$ ) y Transformador. 117



## APENDICE A

# MODELADO DE ECUACIONES

---

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN

DIRECCIÓN GENERAL DE BIBLIOTECAS



## APENDICE A

### MODELADO DE ECUACIONES

El modelo de ecuación de potencia compleja empleada en el algoritmo de estimación de estado no lineal se obtiene a partir de la Figura A.1:

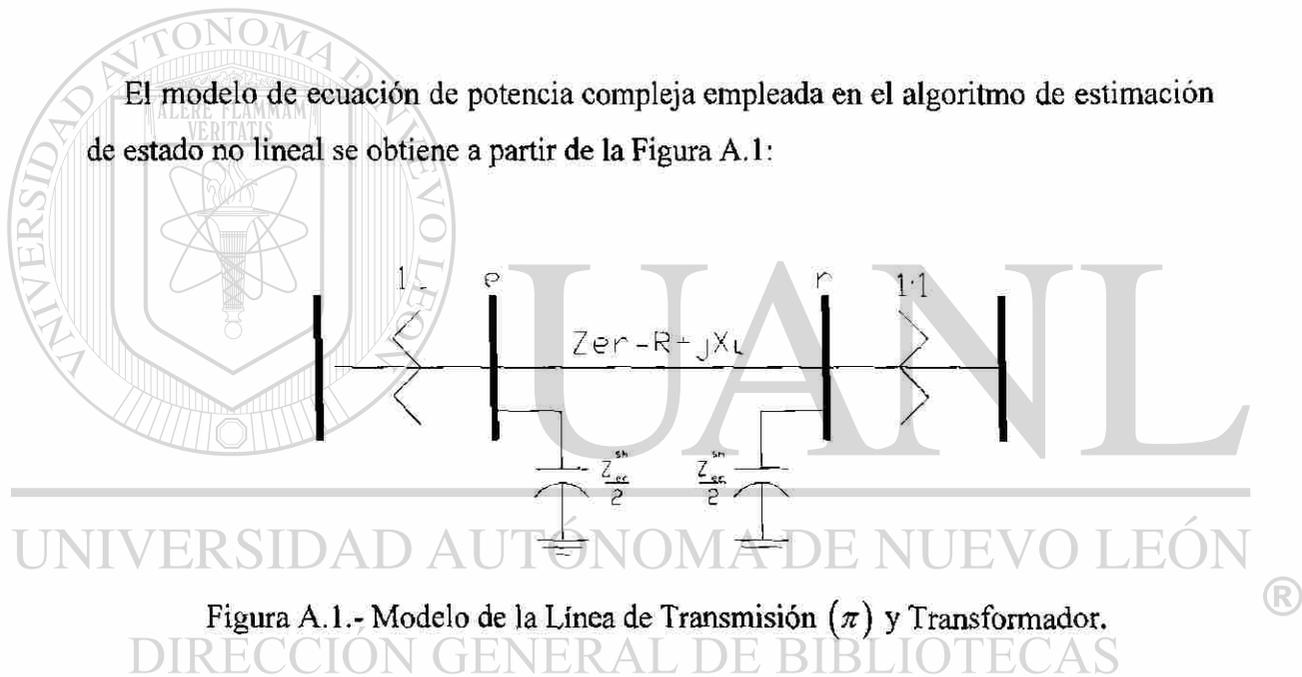


Figura A.1.- Modelo de la Línea de Transmisión ( $\pi$ ) y Transformador.  
DIRECCIÓN GENERAL DE BIBLIOTECAS

La ecuación de potencia esta dada por:

$$S = VI^* \quad (A.1)$$

la impedancia serie de la línea de transmisión es representada por:

$$z_{er} = R_{er} + jX_{er} \quad (A.2)$$

y la impedancia en derivación:

$$Z_{er}^{sh} = -\frac{1}{jX_c} \quad (\text{A.3})$$

la Ec. (A.2) y la Ec. (A.3) en función de admitancias quedan:

$$y_{er} = G_{er} + jB_{er} \quad (\text{A.4})$$

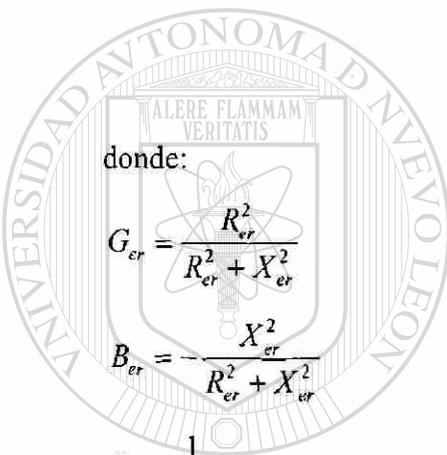
$$y_{er}^{sh} = B_c \quad (\text{A.5})$$

donde:

$$G_{er} = \frac{R_{er}^2}{R_{er}^2 + X_{er}^2}$$

$$B_{er} = -\frac{X_{er}^2}{R_{er}^2 + X_{er}^2}$$

$$B_c = \frac{1}{X_c}$$



# UANL

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN

la corriente que fluye del nodo  $e$  al nodo  $r$  esta dada por la diferencia de potencial entre los nodos multiplicada por su admitancia, quedando expresada por:

$$I_{er} = \left( jB_c V_e \underline{\theta}_e + \left[ (G_{er} + jB_{er}) (V_e \underline{\theta}_e - V_r \underline{\theta}_r) \right] \right) \quad (\text{A.6})$$

para obtener la expresión de potencia compleja que va del nodo  $e$  al nodo  $r$  se aplica la Ec. (A.1) y se obtiene:

$$S_{er} = \left( V_e \underline{\theta}_e \right) \left( jB_c V_e \underline{\theta}_e + \left[ (G_{er} + jB_{er}) (V_e \underline{\theta}_e - V_r \underline{\theta}_r) \right] \right)^* \quad (\text{A.7})$$

al aplicar el complejo conjugado a la corriente queda:

$$S_{er} = (V_e | \underline{\theta}_e) \left( -jB_c V_e | \underline{-\theta}_e + \left[ (G_{er} - jB_{er}) (V_e | \underline{-\theta}_e - V_r | \underline{-\theta}_r) \right] \right) \quad (\text{A.8})$$

se expande la ecuación anterior:

$$S_{er} = -jB_c V_e^2 + G_{er} V_e^2 - jB_{er} V_e^2 - G_{er} V_e V_r | \underline{\theta}_e - \underline{\theta}_r + jB_{er} V_e V_r | \underline{\theta}_e - \underline{\theta}_r \quad (\text{A.9})$$

empleando la identidad de euler dada por:

$$a | \underline{\phi} = a \cos \phi + ja \sin \phi \quad (\text{A.10})$$

se aplica en la Ec. (A.9) y se obtiene:

$$S_{er} = -jB_c V_e^2 + G_{er} V_e^2 - jB_{er} V_e^2 - G_{er} V_e V_r \cos | \underline{\theta}_e - \underline{\theta}_r - jG_{er} V_e V_r \sin | \underline{\theta}_e - \underline{\theta}_r + jB_{er} V_e V_r \cos | \underline{\theta}_e - \underline{\theta}_r + jB_{er} V_e V_r \sin | \underline{\theta}_e - \underline{\theta}_r \quad (\text{A.11})$$

finalmente la ecuación de potencia activa se obtiene separando la parte real de  $S_{er}$  y

para la potencia reactiva la parte imaginaria de  $S_{er}$ .

$$P_{er} = G_{er} V_e^2 - G_{er} V_e V_r \cos | \underline{\theta}_e - \underline{\theta}_r - B_{er} V_e V_r \sin | \underline{\theta}_e - \underline{\theta}_r \quad (\text{A.12})$$

$$Q_{er} = -(B_{er} + B_c) V_e^2 - G_{er} V_e V_r \sin | \underline{\theta}_e - \underline{\theta}_r + B_{er} V_e V_r \cos | \underline{\theta}_e - \underline{\theta}_r \quad (\text{A.13})$$

las dos ecuaciones anteriores se utilizan en el cálculo de valores estimados de flujos de potencia entre líneas, transformadores e inyecciones de potencia, tanto activa como reactiva, dentro del algoritmo de estimación.

Pasa su aplicación en la formación del jacobiano es necesario derivar la ecuación de potencia activa y potencia reactiva con respecto a cada una de las variables de estado, y quedan expresadas por:

Derivadas parciales de potencia activa con respecto a  $(\theta_e, \theta_r, V_e, V_r)$

$$\frac{\partial P_{er}}{\partial \theta_e} = G_{er} V_e V_r \sin|\theta_e - \theta_r| - B_{er} V_e V_r \cos|\theta_e - \theta_r| \quad (\text{A.14})$$

$$\frac{\partial P_{er}}{\partial \theta_r} = -G_{er} V_e V_r \sin|\theta_e - \theta_r| + B_{er} V_e V_r \cos|\theta_e - \theta_r| \quad (\text{A.15})$$

$$\frac{\partial P_{er}}{\partial V_e} = 2G_{er} V_e - G_{er} V_r \cos|\theta_e - \theta_r| - B_{er} V_r \sin|\theta_e - \theta_r| \quad (\text{A.16})$$

$$\frac{\partial P_{er}}{\partial V_r} = -G_{er} V_e \cos|\theta_e - \theta_r| - B_{er} V_e \sin|\theta_e - \theta_r| \quad (\text{A.17})$$

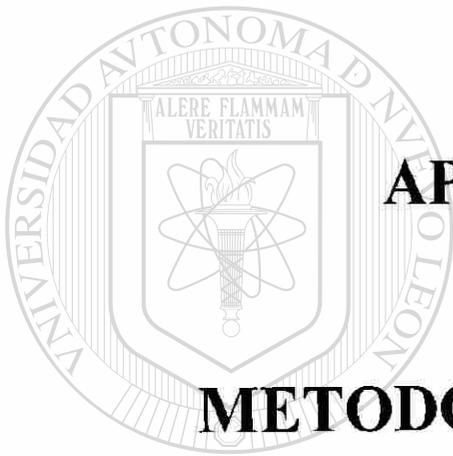
Derivadas parciales de potencia reactiva con respecto a  $(\theta_e, \theta_r, V_e, V_r)$

$$\frac{\partial Q_{er}}{\partial \theta_e} = -G_{er} V_e V_r \cos|\theta_e - \theta_r| - B_{er} V_e V_r \sin|\theta_e - \theta_r| \quad (\text{A.18}) \quad \textcircled{R}$$

$$\frac{\partial Q_{er}}{\partial \theta_r} = G_{er} V_e V_r \cos|\theta_e - \theta_r| + B_{er} V_e V_r \sin|\theta_e - \theta_r| \quad (\text{A.19})$$

$$\frac{\partial Q_{er}}{\partial V_e} = -2(B_{er} + B_c) V_e - G_{er} V_r \sin|\theta_e - \theta_r| + B_{er} V_r \cos|\theta_e - \theta_r| \quad (\text{A.20})$$

$$\frac{\partial Q_{er}}{\partial V_r} = -G_{er} V_e \sin|\theta_e - \theta_r| + B_{er} V_e \cos|\theta_e - \theta_r| \quad (\text{A.21})$$



## **APENDICE B**

# **METODO DE ROTACION**

---

## **DE GIVENS**

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN



DIRECCIÓN GENERAL DE BIBLIOTECAS

## APENDICE B

# METODO DE ROTACION DE GIVENS

El objetivo principal del método de rotación de Givens es resolver la Ec. (3.7), obtener una matriz  $[Q]$  que sea ortogonal y una matriz  $[U]$  que sea triangular superior. La transformación se da sobre la matriz  $[H]$  mediante la Ec. (3.17) y la Ec. (3.18), cuyos valores se colocan en la Ec. (3.16) y esta multiplica a  $[H]$ , teniendo la siguiente relación:

$$[Q^T][H]=[U] \quad (\text{B.1})$$

Considere la matriz  $A$ , como ejemplo para presentar el procedimiento de las rotaciones de Givens y obtener la matriz  $[Q^T]$  y  $[U]$

$$A = \begin{bmatrix} 2 & 1 & 4 \\ 5 & 6 & 3 \\ 2 & 4 & 3 \\ 8 & 2 & 5 \end{bmatrix}$$

se observa en la matriz  $[A]$  que son necesarias 6 rotaciones de Givens.

La primera rotación es para hacer cero el elemento  $A(2,1)$ :

$$\begin{bmatrix} c & s & 0 & 0 \\ -s & c & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 2 & 1 & 4 \\ 5 & 6 & 3 \\ 2 & 4 & 3 \\ 8 & 2 & 5 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 5.385 & 5.942 & 4.271 \\ -0.000 & 1.299 & -2.599 \\ 2.000 & 4.000 & 3.000 \\ 8.000 & 2.000 & 5.000 \end{bmatrix}$$

donde:

$$c = \frac{A(1,1)}{\sqrt{A(1,1)^2 + A(2,1)^2}} = 0.3714$$

$$s = \frac{A(2,1)}{\sqrt{A(1,1)^2 + A(2,1)^2}} = 0.9285$$

la segunda rotación se define:

$$\begin{bmatrix} c^1 & 0 & s^1 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ -s^1 & 0 & c^1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 5.385 & 5.942 & 4.271 \\ -0.000 & 1.299 & -2.599 \\ 2.000 & 4.000 & 3.000 \\ 8.000 & 2.000 & 5.000 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 5.744 & 6.963 & 5.048 \\ -0.000 & 1.299 & -2.599 \\ -0.000 & 1.680 & 1.325 \\ 8.000 & 2.000 & 5.000 \end{bmatrix}$$

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN

donde:

$$c^1 = \frac{A^1(1,1)}{\sqrt{A^1(1,1)^2 + A^1(3,1)^2}} = 0.9374$$

$$s^1 = \frac{A^1(3,1)}{\sqrt{A^1(1,1)^2 + A^1(3,1)^2}} = 0.3482$$

la tercera rotación es dada por:

$$\begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & c^2 & s^2 & 0 \\ 0 & -s^2 & c^2 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 5.744 & 6.963 & 5.048 \\ -0.000 & 1.299 & -2.599 \\ -0.000 & 1.680 & 1.325 \\ 8.000 & 2.000 & 5.000 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 5.744 & 6.963 & 5.048 \\ -0.000 & 2.124 & -0.541 \\ 0.000 & 0.000 & 2.867 \\ 8.000 & 2.000 & 5.000 \end{bmatrix}$$

donde:

$$c^2 = \frac{A^2(2,2)}{\sqrt{A^2(2,2)^2 + A^2(3,2)^2}} = -0.4798 \quad s^2 = \frac{A^2(3,2)}{\sqrt{A^2(2,2)^2 + A^2(3,2)^2}} = 0.8774$$

la cuarta rotación se define:

$$\begin{bmatrix} c^3 & 0 & 0 & s^3 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ -s^3 & 0 & 0 & c^3 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 5.744 & 6.963 & 5.048 \\ -0.000 & 2.124 & -0.541 \\ 0.000 & 0.000 & 2.867 \\ 8.000 & 2.000 & 5.000 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 9.848 & 5.685 & 7.005 \\ -0.000 & 2.124 & -0.541 \\ 0.000 & 0.000 & 2.867 \\ 0.000 & -4.489 & -1.184 \end{bmatrix}$$

donde:

$$c^3 = \frac{A^3(1,1)}{\sqrt{A^3(1,1)^2 + A^3(4,1)^2}} = 0.5833 \quad s^3 = \frac{A^3(4,1)}{\sqrt{A^3(1,1)^2 + A^3(4,1)^2}} = 0.8123$$

la quinta rotación esta dada por:

$$\begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & c^4 & 0 & s^4 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & -s^4 & 0 & c^4 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 9.848 & 5.685 & 7.005 \\ -0.000 & 2.124 & -0.541 \\ 0.000 & 0.000 & 2.867 \\ 0.000 & -4.489 & -1.184 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 9.848 & 5.685 & 7.005 \\ -0.000 & 4.966 & 0.838 \\ 0.000 & 0.000 & 2.867 \\ -0.000 & 0.000 & -0.996 \end{bmatrix}$$

donde:

$$c^4 = \frac{A^4(2,2)}{\sqrt{A^4(2,2)^2 + A^4(4,2)^2}} = 0.4278 \quad s^4 = \frac{A^4(4,2)}{\sqrt{A^4(2,2)^2 + A^4(4,2)^2}} = -0.9039$$

finalmente la sexta rotación hace cero el elemento  $A^s(4,3)$ , esa matriz resultante es la matriz  $[U]$  triangular superior:

$$\begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & c^s & s^s \\ 0 & 0 & -s^s & c^s \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 9.848 & 5.685 & 7.005 \\ -0.000 & 4.966 & 0.838 \\ 0.000 & 0.000 & 2.867 \\ -0.000 & 0.000 & -0.996 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 9.848 & 5.685 & 7.005 \\ -0.000 & 4.966 & 0.838 \\ 0.000 & 0.000 & 3.035 \\ -0.000 & 0.000 & 0.000 \end{bmatrix}$$

donde:

$$c^s = \frac{A^s(3,3)}{\sqrt{A^s(3,3)^2 + A^s(4,3)^2}} = 0.9446 \quad s^s = \frac{A^s(4,3)}{\sqrt{A^s(3,3)^2 + A^s(4,3)^2}} = -0.3283$$

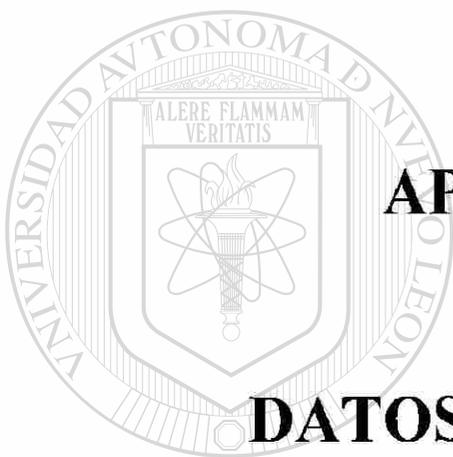
con este procedimiento se establece como obtener la matriz  $[U]$  triangular superior, ahora se muestra el procedimiento para obtener la matriz  $[Q^T]$ .

A la matriz que se encuentra multiplicando al lado izquierdo de la Ec.(B.1) definida por los valores  $c$  y  $s$  se le llamará  $[N_1]$ , y así para cada rotación se nombra una matriz, la matriz  $[Q^T]$  ortogonal se obtiene multiplicando las matrices  $[N]$  y se define:

$$[Q^T] = [N_5][N_4][N_3][N_2][N_1][N] \quad (\text{B.2})$$

para este ejemplo en particular la matriz  $[Q^T]$  ortogonal es:

$$[Q^T] = \begin{bmatrix} 0.203 & 0.507 & 0.203 & 0.812 \\ -0.031 & 0.626 & 0.572 & -0.527 \\ 0.857 & -0.356 & 0.361 & -0.081 \\ -0.471 & -0.471 & 0.707 & 0.235 \end{bmatrix}$$



## **APENDICE C**

### **DATOS DE SISTEMAS**

---

### **DE PRUEBA**

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN



DIRECCIÓN GENERAL DE BIBLIOTECAS

## APENDICE C

### DATOS DE SISTEMAS DE PRUEBA

En las siguientes tablas se presentan los datos empleados para cada uno de los sistemas de prueba, tanto en estimación de estado lineal como estimación no lineal.

Tabla C.1a.- Mediciones en generación y carga, sistema de prueba 1, caso lineal.

Nodo	Inyección
1	1.0212
2	0.4834
3	0.6015
4	-0.6975
5	-0.7123
6	-0.7209

Tabla C.1b.- Conexión y medición entre nodos, sistema de prueba 1, caso lineal.

Nodo envío	Nodo recepción	Impedancia	Medición
1	2	0.2000i	0.2869
1	4	0.2000i	0.4358
1	5	0.3000i	0.3560
2	3	0.2500i	0.0293
2	4	0.1000i	0.3309
2	5	0.3000i	0.1551
2	6	0.2000i	0.2625
3	5	0.2600i	0.1912
3	6	0.1000i	0.4377
4	5	0.4000i	0.0408
5	6	0.3000i	0.0161

Tabla C.2a.- Medición en generación y carga, sistema de prueba 1, caso no lineal.

Nodo	Potencia Activa	Potencia Reactiva
1	1.1310	0.2020
2	0.4840	0.7190
3	0.5510	0.9060
4	-0.7180	-0.7190
5	-0.7200	-0.6770
6	-0.7230	-0.6090

Tabla C.2b.- Conexión entre nodos, sistema de prueba 1, caso no lineal.

Nodo envío	Nodo recepción	Impedancia	Y/2
1	2	0.1000 + 0.2000i	0.0200i
1	4	0.0500 + 0.2000i	0.0200i
1	5	0.0800 + 0.3000i	0.0300i
2	3	0.0500 + 0.2500i	0.0300i
2	4	0.0500 + 0.1000i	0.0100i
2	5	0.1000 + 0.3000i	0.0200i
2	6	0.0700 + 0.2000i	0.0250i
3	5	0.1200 + 0.2600i	0.0250i
3	6	0.0200 + 0.1000i	0.0100i
4	5	0.2000 + 0.4000i	0.0400i
5	6	0.1000 + 0.3000i	0.0300i

Tabla C.2c.- Medición entre nodos, sistema de prueba 1, caso no lineal.

Nodo e	Nodo r	Per	Pre	Qer	Qre
1	2	0.3150	-0.3490	-0.1320	0.0970
1	4	0.3890	-0.4010	0.2120	-0.1430
1	5	0.3570	-0.3660	0.0940	-0.1750
2	3	0.0860	-0.0210	-0.1190	0.1020
2	4	0.3280	-0.2980	0.3830	-0.4430
2	5	0.1740	-0.1170	0.2200	-0.2220
2	6	0.2230	-0.1960	0.1500	-0.2230
3	5	0.1770	-0.2510	0.2390	-0.2990
3	6	0.4330	-0.4680	0.5830	-0.5110
4	5	0.0700	-0.0210	-0.1740	-0.0150
5	6	-0.0210	0.0100	-0.0080	0.0290

Tabla C.3a.- Mediciones en generación y carga, sistema de prueba 2, caso lineal.

Nodo	Inyección
1	1.0300
2	1.5210
3	0.0000
4	0.7900
5	-2.0300
6	0.0000
7	1.0100
8	-2.3100

Tabla C.3b.- Conexión y medición entre nodos, sistema de prueba 2, caso lineal.

Nodo envío	Nodo recepción	Impedancia	Medición
1	2	0.2000i	0.1930
1	3	0.1000i	0.6443
1	6	0.2000i	0.6590
2	3	0.1429i	-0.5460
2	6	0.2500i	-0.8210
3	4	0.3333i	2.0120
3	5	0.1000i	-0.6342
6	7	0.3333i	-1.0200
6	8	0.1000i	2.2960

Tabla C.4a.- Medición en generación y carga, sistema de prueba 3, caso no lineal.

Nodo	Potencia Activa	Potencia Reactiva
1	1.9838	0.3592
2	2.0420	0.3637
3	-4.6080	-0.9360
4	-4.6080	-0.9360
5	0.9490	0.3212
6	0.9490	0.3212
7	0.9490	0.3212
8	1.1990	-0.1172
9	1.2970	-0.1832
10	0.0000	0.0000
11	0.0000	0.0000
12	0.0000	0.0000

Tabla C.4b.- Conexión entre nodos, sistema de prueba 3, caso no lineal.

Nodo envío	Nodo recepción	Impedancia	Y/2
1	3	0.0000 + 0.0400i	0.0000i
2	3	0.0000 + 0.0400i	0.0000i
5	4	0.0000 + 0.0400i	0.0000i
6	4	0.0000 + 0.0400i	0.0000i
7	4	0.0000 + 0.0400i	0.0000i
8	10	0.0000 + 0.0400i	0.0000i
9	10	0.0000 + 0.0400i	0.0000i
3	4	0.0241 + 0.1648i	0.1604i
3	4	0.0241 + 0.1648i	0.1604i
3	11	0.0241 + 0.1648i	0.1604i
4	12	0.0241 + 0.1648i	0.1604i
10	11	0.0241 + 0.1648i	0.1604i
10	12	0.0241 + 0.1648i	0.1604i

Tabla C.4c.- Medición entre nodos, sistema de prueba 3, caso no lineal.

Nodo e	Nodo r	Per	Pre	Qer	Qre
1	3	2.0218	-1.9018	0.4352	-0.1932
2	3	2.0800	-1.9600	0.4397	-0.1887
5	4	1.0800	-0.9600	0.3232	-0.1906
6	4	1.0800	-0.9600	0.3232	-0.1906
7	4	1.0800	-0.9600	0.3232	-0.1906
8	10	1.3300	-1.2100	-0.1152	0.2672
9	10	1.2200	-1.2920	-0.2202	0.1662
3	4	0.1813	-0.2522	-0.2688	-0.1650
3	4	0.1813	-0.2522	-0.2688	-0.1650
3	11	-1.1609	1.1199	-0.0735	-0.1617
4	12	-1.2595	1.2244	-0.0101	-0.1846
10	11	1.1646	-1.2039	-0.2916	0.0617
10	12	1.2754	-1.3084	-0.2707	0.0846

Tabla C.5a.- Medición en generación y carga, sistema de prueba 4, caso no lineal.

Nodo	Potencia Activa	Potencia Reactiva
1	2.0641	0.1027
2	2.0420	0.1010
3	-0.2580	-0.1360
4	-4.4580	-0.7860
5	0.9490	0.4409
6	0.9490	0.4409
7	0.9490	0.4409
8	1.1990	0.2976
9	1.2970	0.2316
10	0.0000	0.0000
11	-1.9530	-0.5280
12	-2.4530	-0.4780

Tabla C.5b.- Conexión entre nodos, sistema de prueba 4, caso no lineal.

Nodo envío	Nodo recepción	Impedancia	Y/2
1	3	0.0000 + 0.0400i	0.0000
2	3	0.0000 + 0.0400i	0.0000
5	4	0.0000 + 0.0400i	0.0000
6	4	0.0000 + 0.0400i	0.0000
7	4	0.0000 + 0.0400i	0.0000
8	10	0.0000 + 0.0400i	0.0000
9	10	0.0000 + 0.0400i	0.0000
3	4	0.0241 + 0.1648i	0.1604
3	4	0.0241 + 0.1648i	0.1604
3	11	0.0241 + 0.1648i	0.1604
4	12	0.0241 + 0.1648i	0.1604
10	11	0.0241 + 0.1648i	0.1604
10	12	0.0241 + 0.1648i	0.1604

Tabla C.5c.- Medición entre nodos, sistema de prueba 4, caso no lineal.

Nodo e	Nodo r	Per	Pre	Qer	Qre
1	3	2.1021	-1.9821	0.1787	0.0703
2	3	2.0800	-1.9600	0.1770	0.0685
5	4	1.0800	-0.9600	0.4429	-0.3072
6	4	1.0800	-0.9600	0.4429	-0.3072
7	4	1.0800	-0.9600	0.4429	-0.3072
8	10	1.3300	-1.2100	0.2996	-0.1459
9	10	1.2200	-1.2920	0.1946	-0.2469
3	4	1.2143	-1.2502	-0.2094	0.0128
3	4	1.2143	-1.2502	-0.2094	0.0128
3	11	1.2035	-1.2377	0.0871	-0.2566
4	12	0.8864	-0.9352	0.1340	-0.3928
10	11	0.8519	-0.8463	0.1682	-0.3434
10	12	1.6481	-1.6488	0.2256	-0.1572

Todos los datos están en valores por unidad (p.u). las variancias utilizadas en la matriz de covariancia son:

Para mediciones de potencia activa y potencia reactiva:

100 MW escala

$\pm 15$  MW exactitud

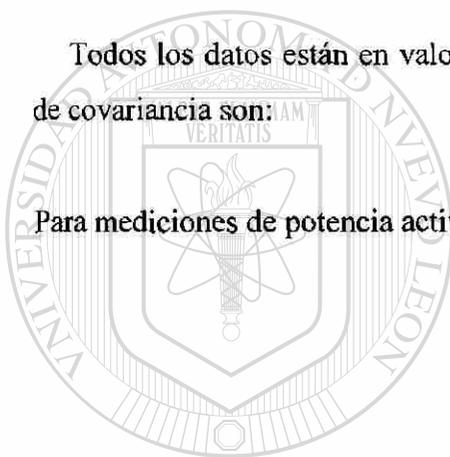
$\sigma = 5$  MW = 0.05 p.u.

Para mediciones de Voltajes:

230 KV escala

$\pm 11.5$  KV exactitud

$\sigma = 3.83$  MW = 0.0167 p.u.



UANL

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN

DIRECCIÓN GENERAL DE BIBLIOTECAS



