

Mediciones más afectadas		No. Medición	Nodo Envío	Nodo Recepción
		3	B1	E2
		14	E2	B1
		2	B1	D1
No. Repeticiones nodo envío más afectado	No. Repeticiones nodo recepción más afectado	Flujo P por Nodo envío		Flujo P por Nodo recepción
9	12	< 1e-4		< 1e-4
Valor de la Mediana del Espectro: 1.13				

En primera instancia se tiene que el valor del índice J es mucho mayor que el límite de la prueba Xi-cuadrada, por lo que se rechaza el estimado. El siguiente paso de acuerdo al diagrama de la Figura 4.9, es la identificación del error con base en la forma de impactar a los residuales.

Para identificar si el error corresponde a uno de topología el algoritmo verifica las magnitudes de flujo de potencia estimados correspondientes a los nodos de la medición con residual normalizado más alto:

Tabla 5.17 Flujos de potencia estimada y medida

Nodo envío	Nodo Recepción	Flujo Potencia Activa		Nodo Envío	Nodo Recepción	Flujo Potencia Reactiva	
		Medido	Estimado			Medido	Estimado
B1	E2	0.870175	0.0000321	B1	E2	-0.10822	-0.103262
E2	B1	-0.858932	-0.0000095	E2	B1	0.046607	0.000001

Donde los valores de la izquierda corresponden a los flujos de *potencia activa* medidos y estimados, siendo estos últimos igual a cero. *Una vez que se ha verificado que los valores estimados de potencia activa son cero, se sabrá que se trata de un error de topología tipo 1*, para identificar al nodo erróneo es necesario verificar los valores estimados flujos de *potencia reactiva*, de la Tabla 5.17 se observa que uno de ellos es diferente de cero (debido a los efectos capacitivos propios de la línea) y el otro igual a cero, por lo que el **algoritmo identifica como nodo erróneo aquel donde la medición correspondiente tenga un valor estimado de potencia activa y reactiva igual a cero.**

De la tabla 5.17 y con base a la lógica anterior el algoritmo identifica al nodo E2 como el sospechoso de contener al error en topología, una vez identificado se procede a expandir el modelo de la subestación E para así estimar los flujos de potencia a través de los interruptores.

La identificación del interruptor con estado erróneo consiste en encontrar a los interruptores que comparten alguno de los nodos de la medición con mayor residual, donde una vez identificados se verifican los valores de flujo de potencia activa y reactiva estimados que pasan a través de cada uno de ellos.

A continuación se muestra la corrida del algoritmo con el nodo eléctrico E expandido:

Tabla 5.18 Resultados

FACTOR		VALOR			
Número de Iteraciones		4			
Grados de Libertad		79			
Valor $\alpha$ para Xi-cuadrada		0.05			
Indice J		988			
Límite de la prueba Xi-cuadrada		100			
Límite de la prueba t-student		1.66			
Valor del máximo error normalizado		17.4			
Número de mediciones afectadas		21			
Mediciones más afectadas		No. Medición	Nodo Envío	Nodo Recepción	
		3	<b>B1</b>	<b>bin-1E1</b>	
		14	bin-1E1	B1-	
		2	B1	D1	
No. Repeticiones nodo envío más afectado	No. Repeticiones nodo recepción más afectado	Flujo P por Nodo envío	Flujo P por Nodo recepción		
9	12	< 1e-4	< 1e-4		
		Valor de la Mediana del Espectro: 1.1			
Interruptores asociados a nodos de medición con mayor residual, flujos a través de él y estado del mismo.		Interruptor	Flujo P	Flujo Q	Estado
		1	0	0	Abierto

En esta simulación se observa un incremento en los grados de libertad debido a la expansión en el modelo de la subestación E, donde la medición 3 corresponde a un medidor de flujo de *potencia activa* siendo esta la más afectada, su ubicación es entre los nodos **B1** y **bin-1E1**, en la Tabla 5.18 se muestra que el interruptor 1 ubicado entre los nodos internos **bin-1E1** y **bin-1E2**, fue el único asociado a alguno de los nodos de la medición con mayor residual y se observa que su estado es abierto.

En la Tabla 5.19 se muestran los valores estimados de los flujos de potencia a través de los interruptores de la subestación E.

Tabla 5.19 Potencias estimadas por interruptores

Número de Interruptor	Nodo envío	Nodo recep	Flujo P	Edo en base datos	Nodo envío	Nodo recep	Flujo Q
1	bin-1E1	bin-1E2	0.0000112	0	bin-1E1	bin-1E2	-0.000000
2	bin-1E2	bin-1E3	0.0000127	1	bin-1E2	bin-1E3	-0.000000
3	bin-1E2	bin-1E4	0.0000000	0	bin-1E2	bin-1E4	0.0000000
4	bin-1E5	bin-1E6	1.8308220	1	bin-1E5	bin-1E6	1.1138687
5	bin-1E6	bin-1E3	1.0872788	1	bin-1E6	bin-1E3	0.6808728
6	bin-1E6	bin-1E4	0.7435447	1	bin-1E6	bin-1E4	0.4329957
7	bin-1E7	bin-E11	0.1092542	1	bin-1E7	bin-E11	-0.110505
8	bin-1E4	bin-1E7	-0.000000	0	bin-1E4	bin-1E7	0.0000000
9	bin-1E3	bin-1E7	0.1092526	1	bin-1E3	bin-1E7	-0.110505
10	bin-1E8	bin-E12	0.5922663	1	bin-1E8	bin-E12	0.5046329
11	bin-1E4	bin-1E8	0.0000000	0	bin-1E4	bin-1E8	0.0000000
12	bin-1E3	bin-1E8	0.5922647	1	bin-1E3	bin-1E8	0.5046331
13	bin-E13	bin-1E9	-0.385777	1	bin-E13	bin-1E9	-0.286743
14	bin-1E4	bin-1E9	-0.000000	0	bin-1E4	bin-1E9	-0.000000
15	bin-1E3	bin-1E9	0.3857758	1	bin-1E3	bin-1E9	0.2867440
16	bin-E14	bin-E10	-0.743547	1	bin-E14	bin-E10	-0.432995
17	bin-1E4	bin-E10	0.7435463	1	bin-1E4	bin-E10	0.4329956
18	bin-1E3	bin-E10	0.0000000	0	bin-1E3	bin-E10	0.0000000

*Al verificar los valores estimados de potencia correspondientes al interruptor 1 y su estado, se encuentra que estos valores estimados son prácticamente cero y el estado del mismo es abierto, por lo que al ser el único interruptor asociado y tener su estado abierto se deduce que es el causante del error en topología.*

Una vez identificado el interruptor se procede a modificar su estado en la base de datos, teniéndose con esto que actualizar la topología del sistema y utilizar la configuración resultante para obtener el nuevo estimado del sistema, los resultados de haber modificado el estado al interruptor 1 se muestran a continuación.

Tabla 5.20 Resultados

FACTOR		VALOR	
Número de Iteraciones		4	
Grados de Libertad		66	
Valor $\alpha$ para Xi-cuadrada		0.05	
Indice J		1.5	
Límite de la prueba Xi-cuadrada		86	
Límite de la prueba t-student		1.66	
Valor del máximo error normalizado		0	
Número de mediciones afectadas		0	
Mediciones más afectadas		No. Medición	Nodo Envío
		-	-
No. Repeticiones nodo envío más afectado	No. Repeticiones nodo recepción más afectado	Flujo P por Nodo envío	Flujo P por Nodo recepción
-	-	> 1e-4	> 1e-4
Valor de la Mediana del Espectro: 0			

Donde no hay ninguna medición afectada y por tanto se obtiene un estimado libre de errores anormales.

### 5.2.3.2 Error en línea 1 y línea 10

Este caso es con el fin de mostrar que el algoritmo es capaz de detectar más de un error en topología. En este caso se abrirán las líneas 1 y 10 en uno de sus extremos; la Línea 1 será abierta por el lado de la subestación C y la línea 10 del lado de la subestación E.

El modelo del sistema con errores topológicos sería el mostrado en la Figura 5.7.

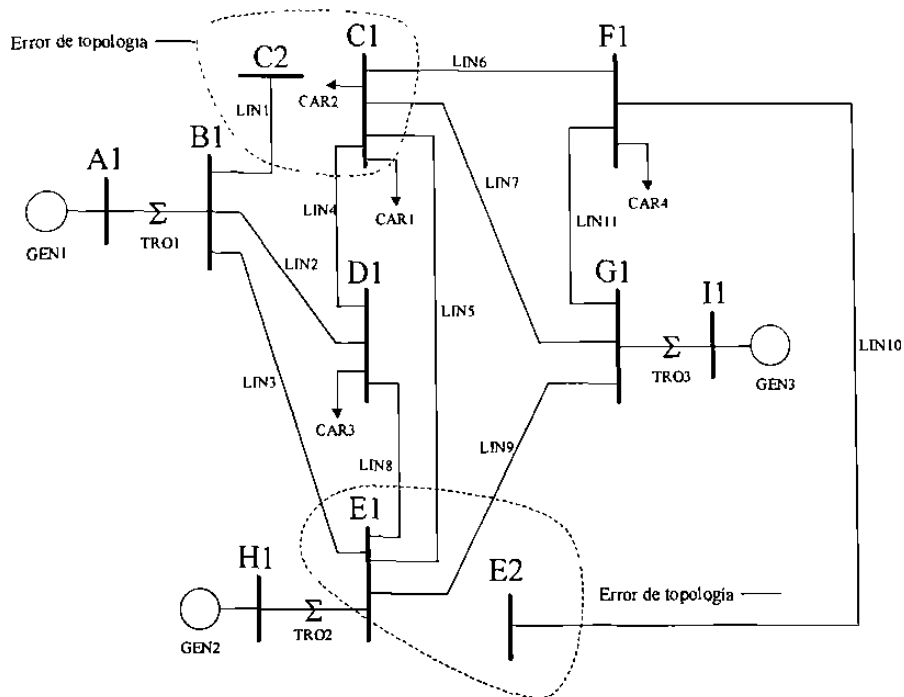


Fig. 5.7 Errores de topología en línea 1 y línea 10

A continuación se presentan los resultados del algoritmo de estimación de estado:

Tabla 5.21 Resultados

FACTOR	VALOR		
Número de Iteraciones	4		
Grados de Libertad	68		
Valor $\alpha$ para Xi-cuadrada	0.05		
Índice J	3290		
Límite de la prueba Xi-cuadrada	88		
Límite de la prueba t-student	1.66		
Valor del máximo error normalizado	23.9		
Número de mediciones afectadas	45		
Mediciones más afectadas	No. Medición	Nodo Envío	Nodo Recepción
	12	C2	B1
	1	B1	C2
	10	E2	F1
	21	F1	E2

No. Repeticiones nodo envío más afectado	No. Repeticiones nodo recepción más afectado	Flujo P por Nodo envío	Flujo P por Nodo recepción	
17	14	$< 1e-4$	$< 1e-4$	
Valor de la Mediana del Espectro: 2.6				
Interruptores asociados a nodos de medición con mayor residual. flujos a través de él y estado del mismo.	Interruptor	Flujo P, Flujo Q		Estado
	1	0	0	Abierto

Algo que se debe notar es que dos errores topológicos provocan que demasiadas mediciones sean afectadas (45), provocando que el valor de la mediana del espectro sea alto, en la Figura 5.8 se muestra las gráficas de residuales.

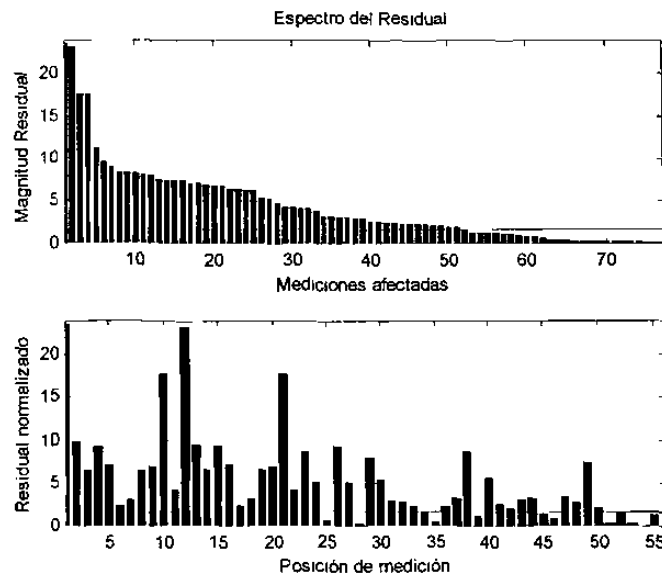


Fig. 5.8 Espectro y residuales normalizados

En este caso las mediciones 12 y 1 fueron las más afectadas, las cuales corresponden a medidores de potencia activa de envío y recepción respectivamente de la *línea uno*, la cual está ubicada entre los nodos B y C. Las mediciones 10 y 21 fueron las siguientes dos mediciones con mayor residual, correspondiendo a medidores de potencia activa de envío y recepción respectivamente de la línea 10, la cual está ubicada entre los nodos E y F.

Una vez identificados los residuales con mayor valor, se verifican los valores estimados de flujo de potencia activa y reactiva a través de los medidores asociados a los nodos de la medición 12 (C2, B1)

Los valores estimados de las mediciones asociadas a los nodos C2 y B1 se presentan a continuación:

Tabla 5.22 Flujos de potencia estimada y medida

Nodo envío	Nodo Recepción	Flujo Potencia Activa		Nodo Envío	Nodo Recepción	Flujo Potencia Reactiva	
		Medido	Estimado			Medido	Estimado
B1	C2	1.198371	0.0000680	B1	C2	0.265627	-0.138115
C2	B1	-1.149931	-0.0000141	C2	B1	-0.275977	0.000001

Se encuentra de la Tabla 5.22 que el valor estimado de *potencia activa* para ambas mediciones es cero, por lo que el algoritmo identifica al error como de topología. Al verificar los valores estimados de *potencia reactiva*, se observa que el valor correspondiente al medidor colocado de los nodos C2 a B1 es igual a cero, por lo que al ser cero la potencia estimada activa y reactiva se considerará como erróneo al nodo eléctrico C.

Una vez identificado al nodo sospechoso (C) se expande a nivel nodo-interruptor, a partir de lo cual se estimarán los valores de flujo de potencia a través de interruptores. Una vez expandido el nodo el estimador arroja los siguientes resultados:

Tabla 5.23 Resultados

FACTOR	VALOR		
Número de Iteraciones	4		
Grados de Libertad	76		
Valor $\alpha$ para Xi-cuadrada	0.05		
Indice J	3303		
Límite de la prueba Xi-cuadrada	97		
Límite de la prueba t-student	1.66		
Valor del máximo error normalizado	23		
Número de mediciones afectadas	48		
Mediciones más afectadas	No. Medición	Nodo Envío	Nodo Recepción
	12	bin-1C2	B1
	1	E1	bin-1C2-

		10	E2	F1	
		21	F1	E2	
No. Repeticiones nodo envío más afectado	No Repeticiones nodo recepción más afectado	Flujo P por Nodo envío		Flujo P por Nodo recepción	
18	14	< 1e-4		< 1e-4	
Valor de la Mediana del Espectro: 2.45					
Interruptores asociados a nodos de medición con mayor residual, flujos a través de él y estado del mismo.		Interruptor	Flujo P, Flujo Q		Estado
		1	0	0	Abierto
		4	0	0	Abierto

Se tiene que la medición 12 es la más afectada, la cual está ubicada entre los nodos bin-1C2 y B1. Una vez identificada la medición con mayor residual se verifica que interruptores comparten alguno de los nodos de la medición con mayor residual, dando como resultado que los interruptores 1 y 4 sean los únicos que comparten un nodo en común (bin-1C2).

A continuación se muestran los valores de flujo estimados a través de los interruptores involucrados (1 y 4):

Tabla 5.24 Potencias estimadas por interruptores 1 y 4

Interruptor	Envío	Recepción	Flujo P		Envío	Recepción	Flujo Q
1	bin-1C1	bin-1C2	0.000011		bin-1C1	bin-1C2	0.000011
4	bin-1C2	bin-1C3	0.000012		Bin-1C2	bin-1C3	0.000012

Se observa que los valores de flujo de potencia activa y reactiva son prácticamente cero, donde sus estados son abiertos.

Al momento de encontrar más de un interruptor asociado al nodo de la medición con mayor residual y la subestación no cuente con medición interna, el operador deberá verificar la configuración de la subestación involucrada (Apéndice E) para identificar al interruptor con estado erróneo. En caso de que la subestación cuente con medición será a través de verificar los valores medidos y estimados de dicha medición, junto con su estado que será posible identificar al interruptor erróneo.



Una vez identificado al interruptor con el estado erróneo se procede a cambiar su estado y generar la nueva topología que será utilizada en el algoritmo de estimación de estado.

Para este caso, una vez actualizada la topología se ejecuta nuevamente el algoritmo de estimación de estado, como se comentó en el Cap. IV se ocupa la topología compacta del sistema para esta nueva estimación de estado.

Tabla 5.25 Resultados

FACTOR		VALOR	
Número de Iteraciones		4	
Grados de Libertad		67	
Valor $\alpha$ para Xi-cuadrada		0.05	
Índice J		1120	
Límite de la prueba Xi-cuadrada		87	
Límite de la prueba t-student		1.66	
Valor del máximo error normalizado		17	
Número de mediciones afectadas		26	
Mediciones más afectadas		No. Medición	Nodo Envío
		21	F1
		10	E2
		38	E2
No. Repeticiones nodo envío más afectado	No. Repeticiones nodo recepción más afectado	Flujo P por Nodo envío	Flujo P por Nodo recepción
11	18	< 1e-4	< 1e-4
Valor de la Mediana del Espectro: 1.3			

En primera instancia se observa que el índice J ha disminuido al eliminar el error de topología de la línea 1, pero aún y habiendo eliminado el error el índice J sigue teniendo un valor muy elevado con respecto a la prueba límite Xi-cuadrada, por lo que el algoritmo tratará con base a la forma de impactar del error los residuales de identificar al error presente.

En este caso el residual de la medición 21 fue la más afectada, donde el algoritmo en primera instancia verifica los valores estimados de flujo de potencia activa y reactiva de aquellas mediciones ubicadas entre los nodos correspondientes a la medición con mayor residual.

Tabla 5.26 Flujos de potencia estimada y medida

Nodo Envío	Nodo Recepción	Flujo Potencia Activa		Nodo Envío	Nodo Recepción	Flujo Potencia Reactiva	
		Medido	Estimado			Medido	Estimado
F1	E2	-0.8719217	0.0000235	F1	E2	-0.4700235	-0.1084383
E2	F1	0.8965731	0.0000088	E2	F1	0.4318506	0.000001

En la Tabla 5.26 se observa que los valores medidos y estimados de flujo de *potencia activa* son cero en ambos medidores, por lo que el algoritmo identifica al error como de topología. Una vez identificado el error como de topología se verifican los valores estimados de *potencia reactiva*, donde siguiendo la misma lógica que para los casos anteriores se concluye que el nodo sospechoso de contener al error de topología es el nodo E.

Una vez identificado el extremo erróneo se procede a expandir la subestación correspondiente (E) para estimar los flujos de potencia a través de los interruptores. Una vez expandida la subestación se realiza la estimación de estado dando como resultado:

Tabla 5.27 Resultados

FACTOR	VALOR
Número de Iteraciones	4
Grados de Libertad	79
Valor $\alpha$ para Xi-cuadrada	0.05
Indice J	1126
Límite de la prueba Xi-cuadrada	100
Límite de la prueba t-student	1.66
Valor del máximo error normalizado	17
Número de mediciones afectadas	26

		No. Medición	Nodo Envío	Nodo Recepción	
Mediciones más afectadas		21	F1	<b>bin-1E4</b>	
		10	bin-E14	F1	
		38	bin-E14	F1	
No. Repeticiones nodo envío más afectado	No. Repeticiones nodo recepción más afectado	Flujo P por Nodo envío		Flujo P por Nodo recepción	
11	18	< 1e-4		< 1e-4	
Valor de la Mediana del Espectro: 1.47					
Interruptores asociados a nodos de medición con mayor residual, flujos a través de él y estado del mismo.		Interruptor	Flujo P	Flujo Q	Estado
		16	0	0	Abierto

En esta nueva corrida el estimador encontró al interruptor 16 como el único asociado a alguno de los nodos correspondientes a la medición con mayor residual (bin-E14). Una vez identificado al interruptor asociado a la medición con mayor residual se verifican los valores estimados de potencia activa y reactiva que pasan a través de ellos, así como su estado.

Tabla 5.28 Potencia estimada por interruptor 16

Interruptor	Envío	Recepción	Flujo P		Envío	Recepción	Flujo Q
16	<b>bin-E14</b>	<b>bin-E10</b>	0.000011		<b>Bin-E14</b>	<b>bin-E10</b>	0.000011

Se observa que los valores estimados de flujo de potencia son cero y el estado abierto. Al ser el *único* interruptor asociado a la medición con mayor residual y ser su estado *abierto* no hay más posibilidad mas que considerar a este interruptor como el erróneo. Una vez identificado al interruptor erróneo se procede a modificar su estado y actualizar la topología del sistema.

A continuación se muestra el resultado del estimador sin el segundo error de topología:

Tabla 5.29 Resultados

FACTOR		VALOR	
Número de Iteraciones		4	
Grados de Libertad		66	
Valor $\alpha$ para Xi-cuadrada		0.05	
Índice J		1.7	
Límite de la prueba Xi-cuadrada		86	
Límite de la prueba t-student		1.66	
Valor del máximo error normalizado		0	
Número de mediciones afectadas		0	
Mediciones más afectadas		No. Medición	Nodo Envío
		-	-
No. Repeticiones nodo envío más afectado	No. Repeticiones nodo recepción más afectado	Flujo P por Nodo envío	Flujo P por Nodo recepción
-	-	-	-
Valor de la Mediana del Espectro: 0			

Este resultado muestra que ninguna medición ha sido afectada y por tanto el sistema está libre de errores anormales.

En resumen, ante la presencia de dos errores de topología el algoritmo fue capaz de detectar los errores, identificarlos como de topología para posteriormente expandir el nodo erróneo y estimar los flujos de potencia activa y reactiva a través de los interruptores, donde se identifica al interruptor erróneo modificando su estado en la base de datos y actualizando la topología del sistema; con la nueva topología se lleva a cabo una nueva estimación del sistema en donde al final se encontró al sistema libre de cualquier error anormal.

Al momento de existir un solo interruptor asociado a la medición con mayor residual y su estado sea abierto se sabrá que este interruptor es el erróneo; en caso de existir más de un interruptor asociado y no contar con mediciones en la subestación, el operador deberá verificar la configuración de la subestación (Apéndice E) y modificar aquel interruptor con estado erróneo, en caso de existir medición dentro de la subestación se verificarán los valores medidos y estimados del medidor junto con el estado del

interruptor asociado a dicha medición, si es *abierto* el estado se habrá identificado al interruptor erróneo, en caso de ser cerrado el estado del interruptor el operador deberá verificar la configuración de la subestación y modificar el estado del interruptor con estado erróneo.

### 5.3 Errores de topología y de medición anormales

En esta parte se probará el funcionamiento del algoritmo de detección e identificación de errores ante la presencia de errores de diferente tipo.

#### 5.3.1 Error de $20\sigma$ en medidor 2 y error de topología en Línea 7

En este caso el error de medición consta colocar un error de  $20\sigma$  al medidor 2 de potencia activa, dicha medición está ubicada entre los nodos B1 y D1 correspondientes a la línea 2. El error de topología consta de abrir la línea 7 por el extremo G. La Figura 5.9 muestra la topología del sistema con el error en topología.

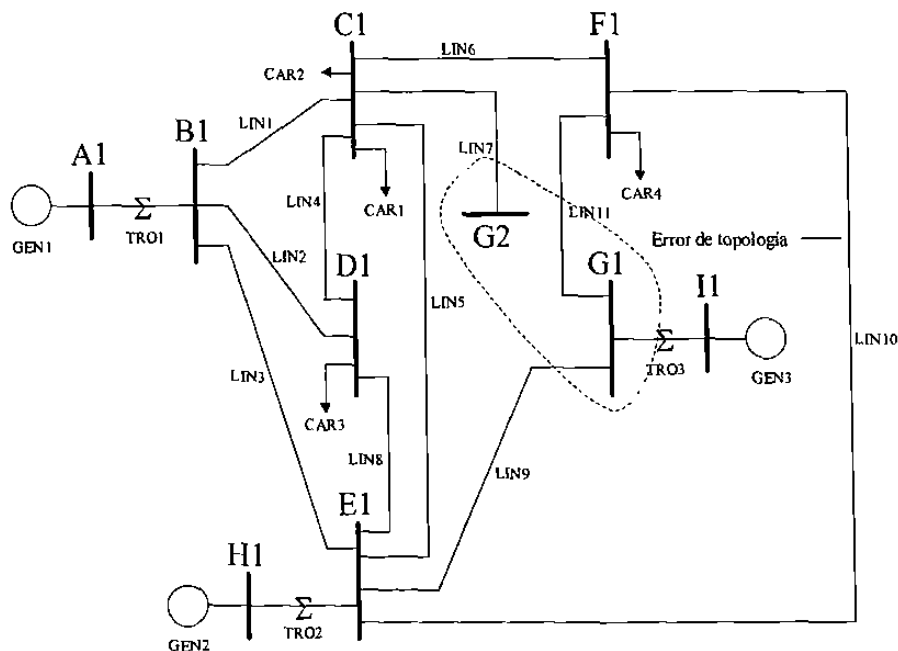


Figura 5.9 Línea 7 abierta de lado G

A continuación se presentan los resultados obtenidos:

Tabla 5.30 Resultados

FACTOR		VALOR	
Número de Iteraciones		4	
Grados de Libertad		67	
Valor $\alpha$ para Xi-cuadrada		0.05	
Índice J		1226	
Límite de la prueba Xi-cuadrada		87	
Límite de la prueba t-student		1.66	
Valor del máximo error normalizado		19	
Número de mediciones afectadas		32	
Mediciones más afectadas		No. Medición	Nodo Envío
		2	B1
		7	C1
		46	G2
No. Repeticiones nodo envío más afectado	No. Repeticiones nodo recepción más afectado	Flujo P por Nodo envío	Flujo P por Nodo recepción
3	7	> 1e-4	> 1e-4
Valor de la Mediana del Espectro: 1.8			

En primera instancia el algoritmo identifica la presencia de mediciones erróneas, indicando con esto la presencia de errores anormales en el proceso de estimación. Se detecta que la medición 2 fue la más afectada, la cual se ubica de los nodos B1 a D1. Al verificar los estimados de flujo de potencia a través de los medidores asociados a la medición con mayor residual se detecta que en todos ellos existe flujo de potencia, con lo cual el error presente no puede ser de topología del primer tipo, adicionalmente el algoritmo verifica el contador asociado a la medición con mayor residual, donde el contador correspondiente al nodo de envío fue menor a 4, por lo que del diagrama de la Figura 4.9 se concluye que el error no es de topología del segundo tipo. Una vez que se ha verificado que el error no corresponde a un error en topología, el algoritmo verifica si corresponde a un error en medición. Se observa de la tabla 5.30 que los valores de flujo de potencia estimados a través de la medición con mayor residual son diferentes de cero, por lo que al ser el índice J mayor al límite de la prueba Xi-cuadrada el algoritmo identifica al error como de medición.

En la Figura 5.10 se muestran las gráficas de residuales para ver en detalle la forma en que los errores de medición y topológicos afectaron los residuales.

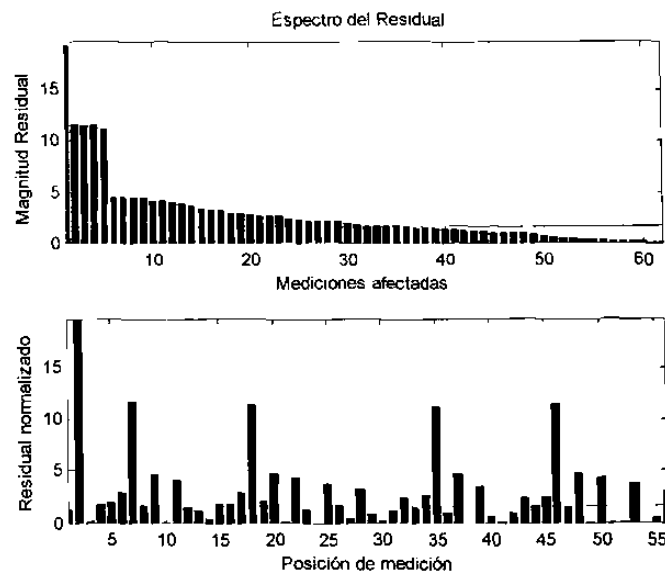


Fig. 5.10 Espectro y residuales normalizados

Una característica común entre un error de topología y uno de parámetro es que afectan casi en la misma magnitud a los residuales de los medidores conectados a la línea errónea. En la Figura 5.10 se muestra esta característica con los medidores 7, 18, 35 y 46 correspondientes a la línea 7.

Al identificar al error como de medición, se elimina la medición con mayor residual donde en este caso es la medición 2. Una vez eliminada la medición 2 se lleva a cabo un nuevo estudio de estimación de estado, donde los grados de libertad disminuyeron en uno debido a la medición errónea.

A continuación se muestran los resultados de haber eliminado el error de medición.

Tabla 5.31 Resultados

FACTOR		VALOR		
Número de Iteraciones		4		
Grados de Libertad		66		
Valor $\alpha$ para Xi-cuadrada		0.05		
Indice J		843		
Limite de la prueba Xi-cuadrada		86		
Limite de la prueba t-student		1.66		
Valor del máximo error normalizado		11		
Número de mediciones afectadas		26		
Mediciones más afectadas		No. Medición	Nodo Envío	Nodo Recepción
		6	C1	G2
		45	G2	C1
		17	G2	C1-
No. Repeticiones nodo envío más afectado	No. Repeticiones nodo recepción más afectado	Flujo P por Nodo envío	Flujo P por Nodo recepción	
14	16	< 1e-4	< 1e-4	
Valor de la Mediana del Espectro: 1.4				

El algoritmo en esta nueva estimación detectó a la medición 6 como la más afectada, ésta medición corresponde a un medidor de potencia activa ubicada de los nodos C1 a G2. Una vez identificada la medición con mayor residual se verifican los valores estimados de flujos de potencia a través de los medidores conectados entre estos dos nodos.

Tabla 5.32 Flujos de potencia estimada y medida

Nodo Envío	Nodo Recepción	Flujo Potencia Activa		Nodo Envío	Nodo Recepción	Flujo Potencia Reactiva	
		Medido	Estimado			Medido	Estimado
C1	G2	-0.570799	0.0000660	C1	G2	-0.623285	-0.0794563
G2	C1	0.575697	-0.000054	G2	C1	0.575944	0.000001

De la tabla 5.32 se observa que para ambos medidores el valor estimado de potencia activa es cero, por lo cual el algoritmo identifica al error como de topología, donde una vez identificado el error como de topología se procede a determinar el nodo sospechoso



de contener al error. al verificar los valores de potencia reactiva correspondientes a las mediciones ubicadas entre los nodos de la medición con mayor residual, se observa que la medición ubicada del nodo G2 a C1 tiene valor cero, y la ubicada del nodo C1 a G2 tiene un valor diferente de cero, por lo que *el algoritmo considera como nodo sospechoso de contener al error en topología al nodo de envío de la medición en donde se tengan valores estimados de flujo de potencia activa y reactiva iguales a cero*. A través de esta lógica se deduce que el nodo G es el nodo afectado.

Una vez expandido el nodo G2 se procede a realizar la estimación de los flujos a través de los interruptores.

Tabla 5.33 Resultados

FACTOR		VALOR		
Número de Iteraciones		4		
Grados de Libertad		74		
Valor $\alpha$ para Xi-cuadrada		0.05		
Indice J		844		
Límite de la prueba Xi-cuadrada		95		
Límite de la prueba t-student		1.66		
Valor del máximo error normalizado		11		
Número de mediciones afectadas		26		
Mediciones más afectadas		No. Medición	Nodo Envío	Nodo Recepción
		6	C1	bin-1G5
		45	bin-1G5	C1
		17	bin-1G5	C1
No. Repeticiones nodo envío más afectado	No. Repeticiones nodo recepción más afectado	Flujo P por Nodo envío	Flujo P por Nodo recepción	
14	16	< 1e-4	< 1e-4	
		Valor de la Mediana del Espectro: 1.2		
Interruptores asociados a nodos de medición con mayor residual, flujos a través de él y estado del mismo.		Interruptor	Flujo P, Flujo Q	Estado
		4	0 0	Abierto

En este caso se tiene que la medición 6 ubicada entre el nodo C1 y bin-1G5 fue la más afectada, el interruptor 4 fue el único asociado con alguno de los dos nodos de la

medición con mayor residual (bin-1G5). Una vez identificado el interruptor asociado se verifica el valor estimado de los flujos de potencia activa y reactiva, así como su estado (abierto).

Al ser el único interruptor asociado a la medición con mayor residual y ser su estado abierto, el algoritmo concluye que este interruptor (6) tiene su estado erróneo. Una vez modificado su estado se lleva a cabo una nueva estimación de estado.

Tabla 5.34 Resultados

FACTOR		VALOR	
Número de Iteraciones		4	
Grados de Libertad		65	
Valor $\alpha$ para Xi-cuadrada		0.05	
Indice J		1	
Límite de la prueba Xi-cuadrada		85	
Límite de la prueba t-student		1.66	
Valor del máximo error normalizado		0	
Número de mediciones afectadas		0	
Mediciones más afectadas		No. Medición	Nodo Envío
		-	-
No. Repeticiones nodo envío más afectado	No. Repeticiones nodo recepción más afectado	Flujo P por Nodo envío	Flujo P por Nodo recepción
-	-	-	-
Valor de la Mediana del Espectro: 0			

Donde el algoritmo no detecta ninguna medición con residual mayor a la prueba límite t-student y por tanto el estimado está libre de errores anormales.

En resumen el algoritmo fue capaz de detectar en primera instancia el error de medición debido a que este afectó en mayor medida al residual, una vez eliminada la medición el algoritmo detectó la presencia del error en topología, se identificó el nodo erróneo y posteriormente se estimaron los flujos internos de la subestación donde se identificó al interruptor fallado, al corregir su estado se encontró al sistema libre de cualquier error.

### 5.3.2 Separación en dos islas de la subestación C

En este caso se supondrá un error en topología, el cual tiene como consecuencia la separación en dos nodos de la subestación 3 donde cada una de ellas cuenta con carga.

La Figura 5.11 muestra al sistema una vez separada la subestación C.

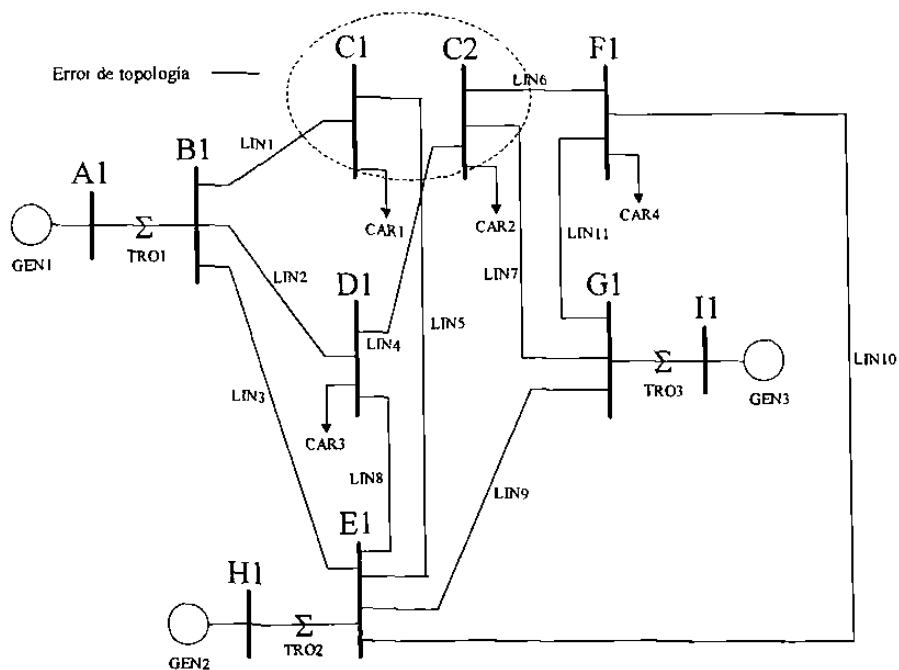


Fig. 5.11 Separación en dos de subestación C

Una vez llevada a cabo la estimación de estado con este sistema se tiene:

Tabla 5.35 Resultados

FACTOR	VALOR
Número de Iteraciones	4
Grados de Libertad	67
Valor $\alpha$ para Xi-cuadrada	0.05
Índice J	326
Límite de la prueba Xi-cuadrada	87
Límite de la prueba t-student	1.66
Valor del máximo error normalizado	9
Número de mediciones afectadas	14

Mediciones más afectadas		No. Medición	Nodo Envío	Nodo Recepción
		4	C2	D1
		15	D1	C2
		16	E1	C1
No. Repeticiones nodo envío más afectado	No. Repeticiones nodo recepción más afectado	Flujo P por Nodo envío	Flujo P por Nodo recepción	
10	5	> 1e-4	> 1e-4	
Valor de la Mediana del Espectro: 0.7				

El algoritmo en primera instancia detecta mediciones afectadas de manera anormal, por lo que intenta identificar al error presente en el proceso de estimación.. De la tabla 5.35 se observa que la medición 4 fue la más afectada donde al verificar los flujos de potencia activa a través de los medidores asociados a los nodos C2 y D1 se tiene:

**Tabla 5.36 Flujos de potencia estimada y medida**

Nodo envío	Nodo Recepción	Flujo Potencia Activa		Nodo Envío	Nodo Recepción	Flujo Potencia Reactiva	
		Medido	Estimado			Medido	Estimado
C2	D1	0.251645	0.0409621	C2	D1	0.214012	0.175082
D1	G2	-0.252386	-0.0408459	D1	G2	-0.244398	-0.205928

De la tabla 5.36 se observa que los flujos estimados de potencia activa son diferentes de cero, por lo que el error no puede ser de topología del primer tipo. Del diagrama de la Figura 4.9 se tiene que el algoritmo intenta identificar ahora al error como de topología del segundo tipo; *La forma de identificarlos está basada en el número de residuales con magnitud mayor al límite de la prueba t-student, y a los contadores de los nodos correspondientes a la medición con mayor residual.*

La Figura 5.12 muestra el espectro y residuales normalizados para este tipo de error.

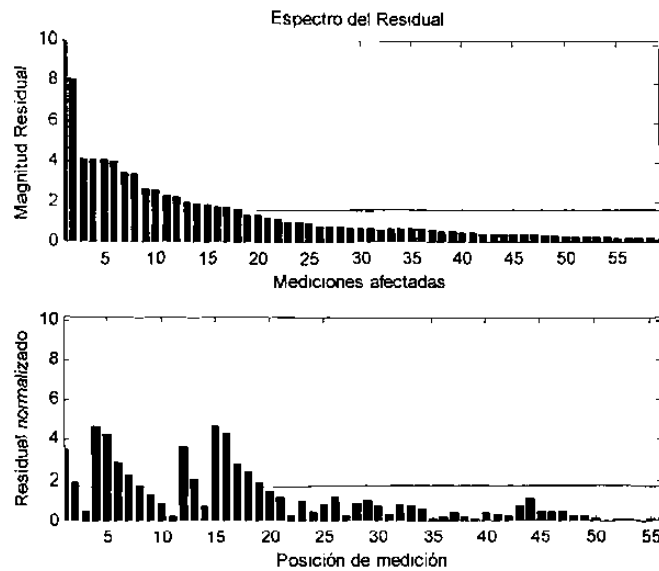


Fig. 5.12 Espectro y residuales normalizados

A través de llevar a cabo diversas simulaciones con este tipo de error, se encontró que para su identificación se deben tomar en consideración los valores de los contadores asociados a la medición con mayor residual y el número de mediciones afectadas.

De la Tabla 5.35 se observa que el número de mediciones afectadas durante el proceso de estimación fue mayor a 10 (14), el valor acumulado en los contadores de los nodos asociados a la medición con mayor residual fue para el caso del nodo de envío (C2) 10, y para el nodo de recepción (D1) 5.

El algoritmo verifica si estos valores corresponden a las características propias de un error de topología del segundo tipo:

- *Número de mediciones afectadas mayor o igual a 10*
- *Contador de mediciones afectadas correspondiente al nodo de envío de la medición con mayor residual debe ser mayor o igual a 4*
- *Contador de mediciones afectadas correspondiente al nodo de recepción de la medición con mayor residual debe ser mayor o igual a 4*

Una vez identificado el error como de topología el algoritmo intenta identificar al nodo sospechoso de contener al error. *La forma de identificar al nodo sospechoso de contener al error en topología, es a través de verificar los valores en cada uno de los contadores correspondientes a los nodos de la medición con mayor residual, el nodo sospechoso será aquel donde el contador tenga el valor mayor.*

Para el caso presentado el contador con mayor valor fue el correspondiente al nodo de envío (C2) con un valor de 10, el contador del nodo de recepción (D1) tuvo un valor de 5, por lo que el algoritmo identifica al nodo C como el sospechoso de contener al error en topología.

Una vez identificado al nodo sospechoso de contener el error en topología se procede a expandir dicho nodo a un nivel nodo-interruptor, con lo cual se estimarán los valores de flujo de potencia a través de interruptores.

*En este paso son posibles dos situaciones: La primera corresponde a la inexistencia de medidores de flujo de potencia dentro de la subestación y la segunda al caso donde sí existan medidores internos de flujo de potencia activa y reactiva.*

Al existir dos posibles situaciones se hicieron simulaciones para ambos utilizando el mismo error en topología. A continuación se presentan los resultados para el primer caso (sin mediciones internas).

Tabla 5.37 Resultados

FACTOR	VALOR
Número de Iteraciones en converger	4
Grados de Libertad	76
Valor $\alpha$ para Xi-cuadrada	0.05
Indice J	326
Límite de la prueba Xi-cuadrada	97
Límite de la prueba t-student	1.66
Valor del máximo error normalizado	9
Número de mediciones afectadas	14

Mediciones más afectadas		No. Medición	Nodo Envío	Nodo Recepción	
		4	bin-C10	D1	
		15	D1	bin-C10	
		16	E1	bin-1C5	
No Repeticiones nodo envío más afectado	No. Repeticiones nodo recepción más afectado	Flujo P por Nodo envío	Flujo P por Nodo recepción		
10	5	> 1e-4	> 1e-4		
		Valor de la Mediana del Espectro: 0.7			
Interruptores asociados a nodos de medición más afectada. Flujos a través de él y estado del mismo.		Interruptor	Flujo P	Flujo Q	Estado
		11	≈ 0	≈ 0	Cerrado

De la tabla 5.37 se observa que el único interruptor asociado a algún nodo de la medición con mayor residual fue el número 11, donde los valores de flujo de potencia activa y reactiva son diferentes de cero y el estado del interruptor es cerrado. *Al detectarse un solo interruptor asociado, ser los flujos de potencia diferente de cero y ser su estado cerrado, se tendrá la seguridad de que este interruptor **no** es el causante del error en topología*, debido a lo anterior y a que el algoritmo no cuenta más información éste no tiene la capacidad de identificar al interruptor con estado erróneo, por lo que es necesario verificar la configuración y estado de los interruptores de la subestación afectada, (Apéndice E).

El algoritmo muestra en un listado los interruptores de la subestación junto con su estado. Al verificar la configuración y estado de los interruptores de la subestación C, se concluye que el interruptor 5 tiene un estado *abierto en la base de datos* y un estado *cerrado en la configuración de la subestación*, por lo que este interruptor es el causante del error en topología.

Al modificar el estado del interruptor 5 y llevar a cabo el proceso de estimación se tiene:

Tabla 5.38 Resultados

FACTOR		VALOR	
Número de Iteraciones en converger		4	
Grados de Libertad		66	
Valor $\alpha$ para Xi-cuadrada		0.05	
Indice J		2.13	
Limite de la prueba Xi-cuadrada		86	
Limite de la prueba t-student		1.66	
Valor del máximo error normalizado		0	
Número de mediciones afectadas		0	
Mediciones más afectadas		No. Medición	Nodo Envío
		-	-
No. Repeticiones nodo envío más afectado	No. Repeticiones nodo recepción más afectado	Flujo P por Nodo envío	Flujo P por Nodo recepción
-	-	-	-
Valor de la Mediana del Espectro -			

En donde ya no se encontró ninguna medición afectada por errores anormales, por lo que el algoritmo fue capaz de detectar el error, identificarlo como de topología e identificar la subestación con el interruptor erróneo, donde al modificar su estado se obtuvo un estimado libre de errores anormales.

Para el caso donde existieran medidores de flujo de potencia en la subestación:

En este caso se colocaron los medidores de flujo de potencia activa y reactiva entre los nodos internos 5 y 6 de la subestación C, el interruptor relacionado con estos nodos es el 5. Este interruptor se eligió al analizar la configuración de la subestación y observar que es el encargado de “*unir*” a la subestación, Fig. 5.12.



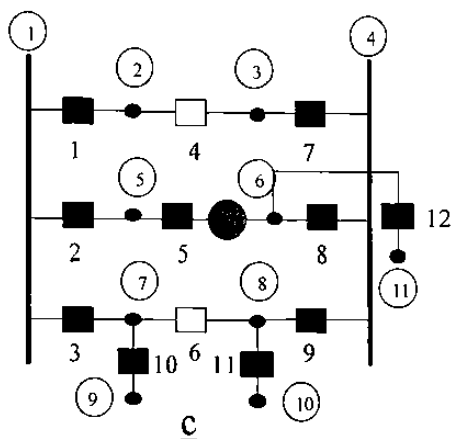


Fig. 5.13 Subestación C con medición interna

A continuación se muestran los resultados una vez identificada la subestación errónea y expandido el nodo sospechoso a nivel nodo-interruptor:

Tabla 5.39 Resultados

FACTOR		VALOR				
Número de Iteraciones en converger		4				
Grados de Libertad		78				
Valor $\alpha$ para Xi-cuadrada		0.05				
Indice J		635				
Limite de la prueba Xi-cuadrada		99				
Limite de la prueba t-student		1.66				
Valor del máximo error normalizado		17				
Número de mediciones afectadas		14				
Mediciones más afectadas		No. Medición	Nodo Envío	Nodo Recepción		
		15	D1	bin-C10		
		4	bin-C10	D1		
		16	E1	bin-1C5		
No. Repeticiones nodo envío más afectado	No. Repeticiones nodo recepción más afectado	Flujo P por Nodo envío		Flujo P por Nodo recepción		
5	10	>1e-4		>1e-4		
Valor de la Mediana del Espectro: 0.92						
Interruptor con medición interna en subestación:	Interruptor	Flujo P Estimados	Flujo Q Estimados	Flujo P Medidos	Flujo Q Medidos	Estado
	5	<1e-4	<1e-4	$\approx 0$	$\approx 0$	Cerrado

Para casos donde existen mediciones de flujo de potencia activa y reactiva dentro de la subestación, el algoritmo identifica estas mediciones verificando los valores estimados de flujo de dichas mediciones. Una vez que se cuenta con los valores estimados y medidos éstos se comparan y se verifica si existen incongruencias entre los valores.

En este caso los valores medidos y estimados de flujo de potencia activa y reactiva para la medición dentro de la subestación se presentan a continuación:

Tabla 5.40 Potencias estimadas por medidor dentro de subestación

Nodo envío	Nodo Recepción	Flujo Potencia Activa		Nodo Envío	Nodo Recepción	Flujo Potencia Reactiva	
		Medido	Estimado			Medido	Estimado
bin-1C5	bin-1C6	0.8699331	0.0000071	bin-1C5	bin-1C6	0.1567391	0.0000013

De la Tabla 5.40 se observa que *el valor medido de potencia activa y reactiva del medidor interno diferente de cero, y el valor estimado de potencia activa y potencia reactiva para medidor es igual a cero*. Lo anterior implica forzosamente que el estado del interruptor (5) asociado a esta medición es *abierto* (valores estimados cero) en la base de datos, por otro lado, la magnitud de la medición implica que el estado del interruptor **físicamente es cerrado**, ya que ésta es diferente de cero.

La posición de la medición dentro de la subestación es de crucial importancia ya que de esto dependerá la capacidad del algoritmo para identificar al interruptor con estado erróneo. Al colocar los medidores en otra parte de la subestación a la elegida, es posible que aún y con esta medición no se pueda identificar al interruptor con estado erróneo.

Una vez que se ha identificado al interruptor 5 como el erróneo, se modifica su estado y se configura la topología del sistema a partir de la cual se hará un nuevo estimado del sistema.

Se recomienda el uso de la Figura 4.9 al leer los resultados presentados a continuación:

### 5.4.1 Inversión de flujo de potencia activa

En esta sección se presentan los resultados de haber colocado errores en medición correspondiente a la inversión del flujo de potencia, Tabla 5.42.

Tabla 5.42 Resultados de errores de medición (inversión del flujo)

ERRORES DE MEDICIÓN POTENCIA ACTIVA			Valor límite Xi-cuadrada = 86					
Medición	$\sigma$ de error	Valor Máximo Residual Normalizado	Mediana	Indice J	Nodos Afectadas		Valor Acumulado	
1	47	46	0.38	2194	B(3)	C(1)	B(52)	C(46)
2	49	48	0.40	2445	B(3)	D(1)	B(56)	D(48)
3	34	32	0.51	1131	B(3)	E(3)	B(39)	E(36)
4	10	8	0.24	83	C(2)	D(2)	C(10)	D(10)
5	22	21	0.32	483	C(1)	E(1)	C(21)	E(21)
6	14	12	0.45	176	C(1)	F(1)	C(12)	F(12)
7	23	21	0.51	508	C(1)	G(3)	C(21)	G(26)
8	32	31	0.55	1037	D(1)	E(3)	D(31)	E(35)
9	10	10	0.33	109	E(1)	G(1)	E(10)	G(10)
10	35	34	0.53	1216	E(3)	F(3)	E(38)	F(38)
11	26	25	0.51	681	F(1)	G(3)	F(25)	G(29)
23	132	99	1.25	13271	A(3)	B(9)	A(134)	B(200)
24	68	49	0.96	3321	H(2)	E(12)	H(67)	E(103)
25	40	29	0.87	1182	I(2)	G(8)	I(39)	G(59)

Se observa que el valor  $\sigma$  del error depende de la importancia de la línea de transmisión. A mayor valor de flujo de potencia mayor será el valor en  $\sigma$  del error, y a menor valor de flujo de potencia menor será el valor en  $\sigma$  del error. Lo anterior es evidente al verificar el valor en  $\sigma$  del error correspondiente a la medición 23 y 4 en la Tabla 5.42 y el valor correspondiente de flujo de potencia en la Tabla 5.2.

Al invertir el valor del flujo de potencia en mediciones el algoritmo *siempre* detectó e identificó correctamente al tipo y medición errónea.

### 5.4.2 Errores pequeños de medición

En esta parte se muestran los resultados de haber introducido errores pequeños (en  $\sigma$ ) a mediciones. A cada medición se le fue incrementando el error hasta lograr que el índice J fuera mayor al límite de la prueba Xi-cuadrada (se mostrará con letra cursiva cuando suceda esto último).

Tabla 5.43 Resultados de errores pequeños de medición

ERRORES PEQUEÑOS DE MEDICION			Valor límite Xi-cuadrada = 86					
Medición	$\sigma$ de error	Valor Máximo Residual Normalizado	Mediana	Índice J	Nodos Afectados		Valor Acumulado	
M1	3	3.1	0.20	12	B(1)	C(1)	B(3)	C(3)
	9	8.2	0.19	70	B(1)	C(1)	B(8)	C(8)
	10	9.9	0.34	104	B(2)	C(1)	B(11)	C(10)
M2	3	2.95	0.17	10	B(1)	D(1)	B(3)	D(3)
	5	5.16	0.20	20	B(1)	D(1)	B(4)	D(4)
	7	6.70	0.21	48	B(1)	D(1)	B(7)	D(6)
	8	7.93	0.19	66	B(1)	D(1)	B(8)	D(8)
	9	9.34	0.22	91	B(1)	D(1)	B(9)	D(9)
	10	9.62	0.46	95	B(1)	D(1)	B(10)	D(10)
M3	3	2.30	0.27	8	B(1)	E(1)	B(2)	E(12)
	7	6.28	0.21	42	B(1)	E(1)	B(6)	E(6)
	8	8.00	0.23	86	B(1)	E(1)	B(8)	E(8)
	9	8.90	0.20	84	B(1)	E(1)	B(9)	E(9)
	10	9.61	0.25	98	B(1)	E(1)	B(9.8)	E(9.8)
M4	3	2.47	0.17	9	C(1)	D(1)	C(2)	D(2)

	6	4.96	0.19	32	C(1)	D(1)	C(5)	D(5)
	10	8.00	0.28	80	C(2)	D(2)	C(10)	D(10)
	11	9.17	0.36	104	C(2)	D(2)	C(11)	D(11)
M5	3	3.06	0.19	10	C(1)	E(1)	C(3)	E(1)
	6	5.90	0.21	37	C(1)	E(1)	C(6)	E(6)
	9	8.88	0.23	81	C(1)	E(1)	C(9)	E(9)
	10	9.84	0.28	99	C(1)	E(1)	C(10)	E(10)
M6	3	2.70	0.17	9	C(1)	F(1)	C(2)	F(2)
	6	5.25	0.31	32	C(1)	F(1)	C(5)	F(5)
	9	8.16	0.30	75	C(1)	F(1)	C(8)	F(8)
	10	9.12	0.27	94	C(1)	F(1)	C(9)	F(9)
M7	3	2.86	0.22	10	C(1)	G(1)	C(3)	G(3)
	6	5.65	0.23	35	C(1)	G(1)	C(6)	G(6)
	9	8.50	0.27	78	C(1)	G(1)	C(9)	G(9)
	10	9.52	0.32	96	C(1)	G(1)	C(9)	G(9)
M8	3	2.75	0.19	10	D(1)	E(1)	D(3)	E(3)
	6	5.84	0.20	36	D(1)	E(1)	D(6)	E(6)
	9	8.68	0.22	79	D(1)	E(1)	D(9)	E(9)
	10	9.52	0.32	95	D(1)	E(1)	D(10)	E(10)
M9	3	3.00	0.17	11	E(1)	G(1)	E(3)	G(3)
	6	5.6	0.17	35	E(1)	G(1)	E(6)	G(6)
	9	8.57	0.23	78	E(1)	G(1)	E(8)	G(8)
	10	9.73	0.36	99	E(1)	G(1)	E(10)	G(10)
M10	3	2.84	0.15	10	E(1)	F(1)	E(3)	F(3)
	6	5.51	0.16	30	E(1)	F(1)	E(5)	F(5)
	9	8.55	0.24	78	E(1)	F(1)	E(8)	F(8)
	10	9.77	0.27	101	E(1)	F(1)	E(10)	F(10)
M11	3	2.76	0.21	9	F(1)	G(1)	F(3)	G(3)
	6	5.66	0.26	35	F(1)	G(1)	F(6)	G(6)
	9	8.67	0.22	80	F(1)	G(1)	F(8)	G(8)
	10	9.63	0.33	99	F(1)	G(1)	F(10)	G(10)

Es de notarse que en la mayoría de los casos un error de 9 o 10  $\sigma$  produce que el índice J sea mayor al límite de la prueba Xi-cuadrada. Se observa que el número de

mediciones afectadas de manera anormal ubicadas entre los nodos de la medición con mayor residual es pequeño (menos de 3).

### 5.4.3 Errores en parámetros

En esta parte se mostrarán los resultados de haber colocado errores en los parámetros de líneas de transmisión. Lo anterior fue a través de aumentar un tanto por ciento la longitud de la línea. Se muestran los resultados en forma de tabla donde aquellos renglones con letra *cursiva* indicarán que no se han cumplido las condiciones necesarias para la identificación de este tipo de error, por lo que el algoritmo los podría identificar como errores de topología o de medición.

Tabla 5.44 Resultados de errores en parámetros de líneas

ERRORES EN PARAMETROS			Valor límite Xi-cuadrada = 86					
Línea	% de aumento longitud	Valor Máximo Residual Normalizado	Mediana	Índice J	Nodos Afectadas		Valor Acumulado	
L1	%							
	50	6.63	0.63	151	B(7)	C(5)	B(27)	C(19)
	40	5.16	0.65	109	B(7)	C(5)	B(22)	C(16)
	30	4.22	0.43	66	B(6)	C(2)	B(16)	C(8)
	20	3.18	0.35	34	C(2)	B(4)	C(6)	B(9)
	10	1.75	0.28	11	C(1)	B(1)	C(1.7)	B(1.7)
L2	50	6.28	0.59	173	B(7)	D(7)	B(28)	D(24)
	40	5.68	0.50	123	D(6)	B(7)	D(20)	B(7)
	30	4.40	0.38	77	B(6)	D(4)	B(17)	D(12)
	20	3	0.32	37	D(2)	B(2)	D(6)	B(6)
	10	-	-	7.95	-	-	-	-
L3	50	3.18	0.46	45	B(5)	E(2)	B(12)	E(6)
	40	2.87	0.44	30	E(2)	B(2)	E(5)	B(5)
	30	2.08	0.34	20	B(2)	E(2)	B(4)	E(4)
	20	1.72	0.27	10	B(1)	E(1)	B(1.7)	E(1.7)
	10	-	-	3	-	-	-	-
L4	50	-	-	2.8	-	-	-	-

L5	50	3.69	0.44	56	C(3)	E(3)	C(10)	E(10)
	40	3.16	0.41	41	E(3)	C(3)	E(9)	C(9)
	30	2.29	0.37	24	E(3)	C(3)	E(6)	C(6)
	20	1.69	0.28	12	E(1)	C(1)	E(3.4)	C(3.4)
	10	-	-	3	-	-	-	-
L6	50	-	-	9	-	-	-	-
L7	50	2.85	0.46	44	C(4)	G(4)	C(9)	G(9)
	40	2.29	0.36	33	C(4)	G(4)	C(8)	G(8)
	30	1.9	0.36	21	C(1)	G(1)	C(2)	G(2)
	20	-	-	12	-	-	-	-
L8	50	4.46	0.66	100	D(8)	E(4)	D(23)	E(14)
	40	3.82	0.53	70	D(6)	E(4)	D(16)	E(12)
	30	2.98	0.40	37	E(3)	D(3)	E(7)	D(7)
	20	2.21	0.31	21	D(2)	E(2)	D(4)	E(4)
	10	-	-	6				
L9	50	-	-	8	-	-	-	-
L10	50	4.33	0.56	90	F(7)	E(3)	F(20)	E(11)
	40	3.41	0.49	64	F(5)	E(2)	F(13)	E(9)
	30	3.0	0.43	40	E(3)	F(4)	E(7)	F(9)
	20	2	0.33	20	F(2)	E(2)	F(4)	E(4)
	10	-	-	7	-	-	-	-
L11	50	3	0.37	61	F(6)	G(4)	F(14)	G(10)
	40	2.44	0.43	40	F(3)	G(3)	F(7)	G(7)
	30	2.16	0.57	27	F(3)	G(3)	F(6)	G(6)
	20	-	-	15				

Es de notarse que para aumentos del 30% en la longitud de la línea 1 y 2, el índice J es menor al límite de la prueba Xi-cuadrada y el valor máximo del residual normalizado es mayor a 4, por lo que el algoritmo clasificaría al error como de medición y no como de parámetro, lo anterior debido a que las líneas 1 y 2 son aquellas por donde circula la mayor cantidad de flujo de potencia, por lo que errores relativamente pequeños en la longitud de la línea provocan grandes valores de residual. Para estas y otras líneas de

transmisión el valor del índice J es mayor al valor límite de la prueba Xi-cuadrada, por lo que el algoritmo identificará al error como de topología o medición dependiendo de cuantas mediciones se afectaron. Esto último ocurrió cuando el valor en por ciento del error fue igual o mayor al 40% de la longitud original.

#### 5.4.4 Errores en topología

Los errores de topología que se presentan a continuación corresponden a aperturas de líneas de transmisión por alguno de sus extremos. Debido a la forma en que son identificados estos errores, el algoritmo identificó al extremo erróneo en todos los casos.

Tabla 5.45 Resultados de errores de topología

ERRORES DE TOPOLOGIA		Valor límite Xi-cuadrada = 86					
Línea (extremo)	Valor Máximo Residual Normalizado	Mediana	Índice J	Mediciones Afectadas		Valor Acumulativo	
L1(B)	23.73	0.88	1835	B(13)	C(12)	B(110)	C(86)
L1(C)	23.73	0.91	1924	B(14)	C(12)	B(120)	C(91)
L2(B)	24.93	1	2134	B(13)	D(8)	B(119)	D(85)
L2(D)	24.93	0.92	2246	B(14)	D(11)	B(129)	D(96)
L3(B)	17.19	1.22	985	B(12)	E(14)	B(77)	E(73)
L3(E)	17.19	1.22	961	B(8)	E(12)	B(68)	E(68)
L4(C)	5.05	0.72	139	C(4)	D(4)	C(18)	D(18)
L4(D)	5.05	0.78	146	C(4)	D(4)	C(19)	D(19)
L5(C)	11.19	0.87	378	E(6)	C(12)	E(19)	C(34)
L5(E)	11.16	1.17	424	E(14)	C(10)	E(55)	C(45)
L6(C)	7.01	0.55	149	C(2)	F(5)	C(14)	F(19)
L6(F)	7.01	0.65	171	C(4)	F(7)	C(20)	F(25)
L7(C)	13.4	1.50	979	G(16)	C(15)	G(99)	C(75)
L7(G)	11.71	1.48	846	G(18)	C(14)	G(92)	C(68)
L8(D)	16.56	1.84	1223	E(24)	D(11)	E(111)	D(80)
L8(E)	16.56	1.61	1098	E(22)	D(10)	E(100)	D(72)
L9(E)	5.31	0.67	113	E(4)	G(6)	E(15)	G(20)
L9(G)	5.31	0.83	93	E(2)	G(4)	E(10)	G(15)
L10(E)	17.8	1.45	1147	E(19)	F(11)	E(97)	F(76)
L10(F)	17.8	1.79	1274	E(22)	F(12)	E(109)	F(84)
L11(F)	13.5	1.05	1034	G(16)	F(12)	G(100)	F(76)
L11(G)	13.5	1.81	874	G(16)	F(12)	G(90)	F(69)



# **CAPITULO 6**

## **CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES**

### **6.1 Conclusiones**

La tarea principal de un estimador de estado radica en la validación de información del sistema de potencia que se realiza en los centros de control, donde esta información sirve para las operaciones y el control del sistema de potencia.

De esta forma el estimador de estado es la base de la seguridad operativa, de ahí que sea indispensable que los valores estimados no estén contaminados con errores anormales (de topología, de medición y/o de parámetro). Se sabe que los errores de medición son los más comunes en un sistema de potencia, y que los errores en topología no suceden frecuentemente, sin embargo debido al impacto de los errores en topología sobre los residuales es necesario que el estimador tenga la capacidad de identificarlos, ya que de otra manera una gran cantidad mediciones correctas serían eliminadas, llegando en casos extremos a problemas de observabilidad y falta de redundancia.

Para poder identificar los errores en topología se hace necesario la expansión de subestaciones a un nivel nodo-interruptor para estimar los flujos internos de la misma y así identificar el estado del interruptor que provoca el error.

La validación de información está compuesta principalmente de tres partes: Procesador topológico de redes, Estimador de estado generalizado, y la Detección e identificación de errores anormales. A continuación se presentan las conclusiones de cada etapa.

### **6.1.1 Conclusiones del procesador topológico de redes**

- Es necesario formar la matriz de conectividad de subestaciones a partir de información dada a nivel nodo-interruptor.
- El procesador debe tener la flexibilidad para expandir cualquier subestación a nivel nodo-interruptor, modificando con ésto la base de datos.
- El método expandido considera los nodos internos de una subestación como nodos eléctricos y a los interruptores como elementos de conexión.
- El método expandido detalla la conexión interna de la subestación y los estados de interruptores, lo que permite verificar la consistencia de la información.
- Todas las subestaciones se procesan normalmente con el método compacto, excepto cuando se sospecha que existen errores en la topología.
- El algoritmo utilizado para el método expandido y para el compacto es el mismo, la diferencia radica en la base de datos que se utiliza.

- Al momento de expandir una subestación a nivel nodo-interruptor se incrementan las dimensiones de las matrices y se modifican los grados de libertad en el proceso de estimación.
- El método expandido es base para la estimación de flujos internos de potencia activa y reactiva a través de interruptores.

### 6.1.2 Conclusiones del estimador de estado generalizado

- Un estimador generalizado considera como variables de estado las magnitudes y ángulos de voltajes nodales, los flujos de potencia activa y reactiva en interruptores, así como los flujos de potencia activa y reactiva en elementos de transmisión cuando éstos se modelan como interruptor.
- El considerar como variables de estado a los flujos de potencia activa y reactiva, la matriz Jacobiana se modifica radicalmente con respecto al método compacto (Apéndice B).
- La estimación del flujo de potencia activa y reactiva se puede llevar a cabo mediante la modelación exacta de interruptores.
- Es indispensable asegurar que *los flujos de potencia activa y reactiva* dentro de la subestación sean observables (método expandido), ya que de otra manera se producirán singularidades durante el proceso de estimación.
- Es posible colocar mediciones de flujo de potencia activa y reactiva dentro de una subestación. En el método compacto el algoritmo no las considera, en cambio para el caso expandido es importante su modelación exacta.
- La modelación exacta de interruptores debe considerar tres estados: abierto, cerrado y estado desconocido.

- La modelación de elementos con impedancia cero e infinita (cerrado o abierto) permite evitar problemas de condicionamiento en la matriz de ganancia del estimador.
- La modelación de interruptores con estado desconocido es apropiada para estimar parámetros de líneas de transmisión utilizando la estimación del flujo de potencia.
- En la modelación de interruptores con estado cerrado se aumentan dos variables de estado ( $P_{kl}$  y  $Q_{kl}$ ) y dos pseudo-mediciones ( $V_k - V_l = 0$  y  $\delta_k - \delta_l = 0$ ), por lo que el nivel de redundancia no se modifica.
- Para el caso de interruptores con estado abierto, se aumentan dos variables de estado ( $P_{kl}$  y  $Q_{kl}$ ) y dos pseudo-mediciones ( $P_{kl} = 0$  y  $Q_{kl} = 0$ ), sin modificar la redundancia.
- En la modelación de interruptores con estado desconocido, el nivel de redundancia se ve reducido debido a que no se aumentan pseudo-mediciones, pero se incrementan las variables de estado ( $P_{kl}$ ,  $P_{lk}$ ,  $Q_{kl}$ , y  $Q_{lk}$ ).
- En la modelación de interruptores es necesario incluir la redundancia disponible en las subestaciones mediante el uso de inyecciones de potencia cero (pseudo-mediciones) en nodos internos donde no haya carga ni generación.
- En las pruebas realizadas la convergencia para el método convencional se obtuvo en 3 o 4 iteraciones, en cambio para el método expandido el estimador llegó a converger en 6 iteraciones.
- El método de estimación expandido es recomendable siempre y cuando se cumplan los requisitos de observabilidad de flujos de potencia dentro de la

subestación. En el trabajo se encontró que la única desventaja con respecto al método compacto es la *carga computacional*, se observó que cada iteración en el método expandido consumía mayor tiempo que el método compacto.

### 6.1.3 Conclusiones sobre la detección e identificación de errores

- Un estimador convencional detecta errores utilizando la prueba de hipótesis sobre el índice J. El estimador considera como aceptable un estimado siempre que el índice J sea menor al límite de la prueba Xi-cuadrada.
- Un estimador de estado convencional identifica únicamente errores anormales de medición.
- El algoritmo propuesto en la tesis considera como caso anormal el encontrar magnitudes en residuales mayores al límite de la prueba t-student.
- Se encontró que cada tipo de error produce un impacto diferente en los residuales normalizados del estimador, lo que hace posible su identificación.
- En las pruebas realizadas se encontró que al colocar un error de medición con magnitud  $\eta \sigma$ , el residual normalizado correspondiente reflejará prácticamente la misma magnitud del error ( $\eta$ ), observando también la propagación del error a otras mediciones.
- Un error de medición se propaga generalmente a otras mediciones, con un mayor efecto en las mediciones más cercanas, sin embargo, a medida que existe más redundancia el efecto del error se reduce.
- Se observa independencia en la propagación de errores en mediciones de flujo de potencia de diferente tipo (mediciones activas y reactivas).

- Un error de topología se propaga generalmente a una gran cantidad de mediciones debido a que hay inconsistencia entre las mediciones y el modelo del sistema.
- La identificación de errores de topología del primer tipo (apertura de líneas) se basa en los valores estimados de flujo de potencia activa correspondientes a la medición con mayor residual. La forma de identificar un error de este tipo es verificar si los valores estimados de *potencia activa* son cero o de un valor pequeño ( $10e-4$ ).
- La identificación de un error en topología del segundo tipo (separación de subestaciones) se lleva a cabo contabilizando el número total de mediciones afectadas así como el número de mediciones afectadas que comparten alguno de los nodos asociados a la medición con el mayor residual.
- Es posible encontrar casos con errores de topología donde el algoritmo no cuenta con la información requerida para identificar al interruptor con estado erróneo.
- Una forma de garantizar la identificación de un interruptor con estado erróneo es mediante la colocación de mediciones de flujo de potencia activa y reactiva dentro de la subestación.
- La ubicación de mediciones dentro de la subestación es importante para tener la redundancia suficiente que permita identificar un interruptor con estado erróneo a través de los valores medidos y estimados de flujos de potencia.
- Para identificar un error en parámetro, el algoritmo propuesto parte de analizar casos donde el valor del índice  $J$  sea menor al límite de la prueba  $\chi^2$ -cuadrada.

- Un error en parámetro se identifica a través del valor de la mediana del residual ponderado y el valor máximo del residual normalizado. Una vez identificado el error, la línea de transmisión se modelará como interruptor con estado desconocido.
- Para el caso donde un error en parámetros causa que el índice J sea mayor al límite de la prueba Xi-cuadrada, el algoritmo propuesto lo identificará como error de topología o de medición, dependiendo del efecto en los residuales.
- Un error en topología se puede considerar como un caso particular de un error en los parámetros del modelo.
- El algoritmo presentado en la tesis jerarquiza la identificación de errores, dando prioridad a los de topología, seguido de los de medición y por último los errores en parámetros.
- El algoritmo propuesto es capaz de identificar errores de diferente tipo en un mismo caso de estudio, identificando en primera instancia aquel que afecte en mayor medida a los residuales normalizados.

## 6.2 Recomendaciones para trabajos futuros

- Realizar estudios en un sistema de potencia real donde se especifique la ubicación y el valor  $\sigma$  de cada medidor, la configuración interna de subestaciones y la conectividad del sistema, realizando pruebas sobre la detección e identificación de errores anormales de diferente tipo.
- Incluir en la modelación de subestaciones otros dispositivos de desconexión, como cuchillas, ya que son elementos que pueden afectar la topología del sistema.

- Mejorar la lógica de identificación de errores para no tener que ‘sintonizar’ ciertos parámetros al cambiar el sistema en estudio, con el objetivo de obtener algoritmos generales sin importar el tipo o tamaño del sistema.
- Proponer técnicas para la ubicación de medidores dentro de subestaciones y así garantizar la identificación de interruptores con estado erróneo.
- Analizar y proponer técnicas para corregir el valor de las mediciones erróneas en lugar de eliminarlas, buscando no afectar la observabilidad y el nivel de redundancia.



## REFERENCIAS

- [ 1 ] F.C.Schweppe and E.J. Handschin, 'Static state estimation in electric power systems', Proc. IEEE, vol 62, pp. 972-983, July 1974.
- [ 2 ] A.M. Sasson, S.T. Ehrmann, P. Lynch, and L.S. Van Slyck 'Automatic power system network topology determination', IEEE Trans. on PAS, vol 92, pp. 610-618, Mar./Apr. 1973
- [ 3 ] T.E. Dyliacco, K.A. Ramarao, and A.W. Weiner, 'Network status analysis for real-time systems', in 8<sup>th</sup> PICA Conf. Proc., pp. 365-362, June 1973.
- [ 4 ] Schweppe, F.C. and Wildes, J.C., 'Power system static state estimation: Part I-Exact model', IEEE Trans. on PAS, vol. 89, pp. 120-125, January 1970.
- [ 5 ] Schweppe, F.C. and Rom, D, 'Power system static state estimation: Part II-Approximate model', IEEE Trans. on PAS, vol. 89, pp. 125-130, January 1980.
- [ 6 ] Scheppe, F.C. 'Power system static estimation Part III: Implementation', IEEE Trans. on PAS, vol. 89, pp. 130-135, January 1980.
- [ 7 ] Dopazo, J F. Klitin, O A, Stagg, G.W. and Van Slyck, L.S., 'State calculation of power systems from line flow measurements', IEEE Trans. on PAS, vol. 89, pp. 1698-1708, September 1980.
- [ 8 ] Dopazo, J F. Klitin, O A, and Van Slyck, L.S., 'State calculation of power systems from line flow measurements: Part II', IEEE Trans. on PAS, vol. 91, pp. 145-151, January 1972.
- [ 9 ] Larson, R. Tinney, W. and Peschon, J., 'State estimation in power systems: Part I-Theory and feasibility', IEEE Trans. on PAS, vol 89, pp. 345-352, March 1970.

- [ 10] Larson, R. Tinney, W. and Peschon, J., 'State estimation in power systems: Part II implementation applications', IEEE Trans. on PAS, vol. 89, pp. 353-363, March 1970.
- [ 11] H.P. Horisberger, J.C. Richard, and C. Rossier, 'A fast decoupled static state estimation for electric power systems' IEEE Trans. on PAS, vol. 95, pp. 208-215, Jan/Feb. 1976.
- [ 12] A. García, A. Monticelli, and P. Abreu, 'Fast decoupled state estimation and bad data processing', IEEE Trans. on PAS, vol. 98, pp. 1645-1652, September 1979.
- [ 13] J.J. Allemong, L. Radu, and A.M. Sasson, 'A fast and reliable state estimation algorithm for AEP's new control center', IEEE Trans. on PAS, vol. 101, pp. 933-944, April 1982.
- [ 14] K.A. Clements and B.F. Wollenberg, 'An algorithm for observability determination in power system state estimation', paper A75 447-3, presented at the IEEE/PES Summer Meet, July 1975.
- [ 15] J.S. Horton and R.D. Masiello, 'On-line decoupled observability processing', 10<sup>th</sup> PICA Conf. Proc., pp. 420-426, May 1977.
- [ 16] F.C. Aschmoneit, N.M. Peterson, and E.C. Adrian, 'State estimation with equality constraints', 10<sup>th</sup> PICA Conf. Proc., pp. 427-430, May 1977.
- [ 17] A. Gjelsvik, S. Aam, and L. Holten, 'Hachtel's augmented matrix method-A rapid method improving numerical stability in power system static state estimation', IEEE Trans. on PAS, vol. 104, pp. 2987-2993, November 1985.
- [ 18] J.W. Gu, K.A. Clements, G.R. Krumpholz, and P.W. Davis, 'The solution of ill-conditioned power system state estimation problems via the method of Peters and Wilkinson', PICA Conf. Proc., pp. 239-246, May 1983.
- [ 19] 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.
- [ 20] --, 'An orthogonal row processing algorithm for power system sequential state estimation', IEEE Trans. on PAS, vol. 100, pp. 3791-3800, August 1981.

- [ 21] Merrill, H. M. and Schweppe, F.C., 'Bad data suppression in power system state estimation', IEEE Trans. on PAS, vol. 90, pp. 2718-2725, November/December 1971.
- [ 22] Irving, M.R., Owen, R.C. and Sterling, M.J.H., 'Power system state estimation using linear programming', pp. 879-885, IEEE Proc., Part C, vol. 125, pp. 879-885, September 1978.
- [ 23] Mili, L., Phaniraj, V. and Rousseau P.R., 'Robust estimation theory for bad data diagnostics in electric power systems', Advances in Control and Dynamical Systems, Vol. XXXVI (ed. CT. Leondes) Academic Press, New York.
- [ 24] G.R. Krumpholz, K.A. Clements, and P.W. Davis, 'Power system observability: A practical algorithm using network topology', IEEE Trans. on PAS, vol. 99, pp. 1534-1542, July/Aug. 1980.
- [ 25] V.H. Quintana, A. Simoes-Costa, and A. Mandel, 'Power system observability using a direct graph-theoretic approach', IEEE Trans. on PAS, vol. 101, pp. 617-626, March 1982.
- [ 26] I.W. Slutsker and J.M. Scudder, 'Network observability analysis through measurement jacobian matrix reduction', presented at the IEEE/PES Winter Meet., February 1986.
- [ 27] A. Monticelli and F.F. Wu, 'Network observability: Theory', IEEE Trans. on PAS, vol. 104, pp. 1042-1048, May 1985. power systems state estimation', IEEE Trans. on PAS, vol. 94, pp. 329-337, Mar./Apr. 1975.
- [ 28] F. Broussolle, 'State estimation in power systems: Detecting bad data through the sparse inverse matrix method', IEEE Trans. on PAS, vol. 97, pp. 678-682, May 1978.
- [ 29] F. Aboytes and B.J. Cory, 'Identification of measurement parameter and configuration errors in static state estimation and bad data processing', PICA Conf. Proc., May 1975.
- [ 30] N. Xiang, S. Wang, and F. Yu, 'A new approach for detection and identification of multiple bad data in power system state estimation', IEEE Trans. on PAS, vol. 101, pp. 454-462, February 1982.

- [ 31] L. Mili, Th. Van Cuseum, and M. Ribbens-Pavella, '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
- [ 32] F.Aboytes, F.Betancourt, 'Conceptos básicos para la aplicación de técnicas de estimación de estado', Simposium IEEE. Septiembre 1988. Monterrey, N.L.
- [ 33] 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.
- [ 34] K.A. Clements and P.W. Davis, 'Detection and identification of topology errors in electric power systems', IEEE/PES, vol. 3, pp. 1748-1753, No. 4, November 1988.
- [ 35] W.H. Edwin Liu and Swee-Lian Lim, 'Parameter error identification and estimation in power system state estimation', IEEE/PES, vol. 10, pp. 200-209 No. 1, February 1995.
- [ 36] Kevin A. Clements and Antonio Simoes Costa, 'Topology error identification using normalized Lagrange multipliers', IEEE/PES, vol. 13, pp. 347-353, No. 2, May 1998
- [ 37] L. Mili, G. Steeno, F. Dobraca and D. French, 'A robust estimation method for topology error identification', IEEE/PES, vol 14, pp. 1469-1476, No. 4, November 1999.
- [ 38] A. Monticelli and A. Garcia, 'Modeling zero impedance branches in power system state estimation', IEEE/PES, Vol. 6, pp. 1561-1570, No. 4, November 1991.
- [ 39] A. Monticelli, 'Modelling circuit breakers in weighted least squares state estimation', IEEE/PES, Vol. 8, pp. 1143-1148, No. 3, August 1993.
- [ 40] A. Monticelli, 'The impact of modeling short circuit branches in state estimation', IEEE/PES, Vol. 8, pp. 364-370, No. 1, February 1993.
- [ 41] --'Observability analysis for orthogonal transformation based state estimation', IEEE Trans. On PAS, vol. PWRs-1, pp. 201-206, Feb, 1986.
- [ 42] A. Bose and K. Clements, 'Real-time modeling of power networks', Proc. IEEE, Vol. 75, pp. 1607-1622, No. 12, December 1987

- [43] Allen J. Wood and Bruce F. Wollenberg, 'Power Generation, operation and control', second edition, John Wiley & Sons, Inc., 1992
- [44] Walpole and Myers, 'Probabilidad y Estadística', cuarta edición, Mc. Graw Hill, 1992.

# INDICE DE TABLAS

Tabla		Página
2.1	Vector de islas internas	18
2.2	Sistema con una sola isla por subestación	19
2.3	Sistema con dos islas internas en una subestación	19
2.4	Cambios a los interruptores de la Figura 2.1	22
3.1	Resumen de modificaciones	47
4.1	Valores de áreas bajo curva normal para diferentes $\sigma$	58
4.2	Valores de límite t-student	60
5.1	Voltajes y Potencias nodales	86
5.2	Flujos de Potencia a través de líneas y transformadores	87
5.3	Asignación de medidores	87
5.4	Resultados Caso 5.2.1.1	89
5.5	Resultados	91
5.6	Resultados	93
5.7	Resultados Caso 5.2.1.2	94
5.8	Resultados	95
5.9	Resultados	96
5.10	Resultados	96
5.11	Resultados Caso 5.2.2.1	99
5.12	Potencias y parámetros estimados	101
5.13	Resultados	101
5.14	Resultados	102
5.15	Potencias y parámetros estimados	103

5.16	Resultados Caso 5.2.3.1	105
5.17	Flujos de potencia estimada y medida	106
5.18	Resultados	107
5.19	Potencias estimadas por interruptores	108
5.20	Resultados	109
5.21	Resultados Caso 5.2.3.2	110
5.22	Flujos de potencia estimada y medida	112
5.23	Resultados	112
5.24	Potencias estimadas por interruptores 1 y 4	113
5.25	Resultados	114
5.26	Flujos de potencia estimada y medida	115
5.27	Resultados	115
5.28	Potencia estimada por interruptor 16	116
5.29	Resultados	117
5.30	Resultados Caso 5.3.1	119
5.31	Resultados	121
5.32	Flujos de potencias estimada y medida	121
5.33	Resultados	122
5.34	Resultados	123
5.35	Resultados Caso 5.3.2	124
5.36	Flujos de potencia estimada y medida	125
5.37	Resultados	127
5.38	Resultados	129
5.39	Resultados	130
5.40	Potencias estimada y medida por medidor dentro de subestación	131
5.41	Resultados	132
5.42	Resultados de errores de medición (inversión del flujo)	133
5.43	Resultados de errores pequeños de medición	134
5.44	Resultados de errores en parámetros de líneas	136
5.45	Resultados de errores de topología	138
E.1	Valores del sistema de prueba	184

# INDICE DE FIGURAS

Figura		Páginas
1.1	Procesador de información	3
1.2	Estimador de Estado	4
2.1	Sistema a nivel nodo-interruptor	13
2.2	Sistema compacto	14
2.3	Islas internas a nivel nodo-interruptor	15
2.4	Sistema compacto con islas internas	16
2.5	Subestación Sub2	17
2.6	Colocación de medidores	21
2.7	Isla eléctrica a nivel nodo-interruptor	23
2.8	Isla eléctrica en forma compacta	23
2.9	Estructura de Ybus con islas eléctricas energizadas	26
2.10	Expansión de nodo eléctrico 2	29
3.1	Curvas normales para diferentes valores de $\sigma$ y media cero	33
	$\sigma_1 < \sigma_2 < \sigma_3$	
3.2	Modelación de interruptor cerrado	43
3.3	Modelación de interruptor abierto	44
3.4	Interruptor con estado desconocido	47
4.1	Función de densidad de probabilidad de la distribución Xi-cuadrada	
	Para diferentes grados de libertad	53
4.2	Areas de la función de densidad de probabilidad de la distribución	
	Xi-cuadrada para un valor de 8 grados de libertad	53



## INDICE DE FIGURAS (continuación)

4.3	Residual normalizado con errores de medición	57
4.4	Distribución normal o gaussiana de errores	58
4.5	Distribución t-student para diferentes valores de grados de libertad	59
4.6a	Residual normalizado para un error de medición de $5 \sigma$	62
4.6b	Residual normalizado para un error de medición de $20 \sigma$	62
4.7	Residual normalizado de un error en topología	64
4.8	Residual normalizado de un error en parámetro	65
4.9	Algoritmo de detección e identificación de errores	69
4.10	Configuración de subestación con interruptor erróneo	75
4.11	Configuración real de subestación B	76
4.12	Colocación de medidor interno asociado a interruptor 8	77
4.13	Colocación de medidor interno asociado a interruptor 5	77
5.1	Sistema de 9 nodos	86
5.2	Espectro y residuales normalizados	90
5.3	Espectro y residuales normalizados	92
5.4	Espectro y residuales normalizados	100
5.5	Espectro y residuales normalizados	103
5.6	Error de topología en subestación E	105
5.7	Errores de topología en línea 1 y línea 10	110
5.8	Espectro y residuales normalizados	111
5.9	Línea 7 abierta de lado G	118
5.10	Espectro y residuales normalizados	120
5.11	Separación en dos de subestación C	124
5.12	Espectro y residuales normalizados	126
5.13	Subestación C con medición interna	130
A.1	Circuito $\pi$ de una línea de transmisión	151
E.1	Subestación B	183
E.2	Subestación C	183
E.3	Subestación D	183

E.4	Subestación E	183
E.5	Subestación F	184
E.6	Subestación G	184
E.7	Subestación A, H, I	184

**APENDICE A**

**DEDUCCION DE ECUACIONES DE**

**FLUJO DE POTENCIA**

## APENDICE A

# DEDUCCION DE ECUACIONES DE FLUJO DE POTENCIA

Para llevar a cabo la deducción de las ecuaciones de Flujo de Potencia se partirá del circuito  $\pi$  equivalente de una línea de transmisión Figura A.1

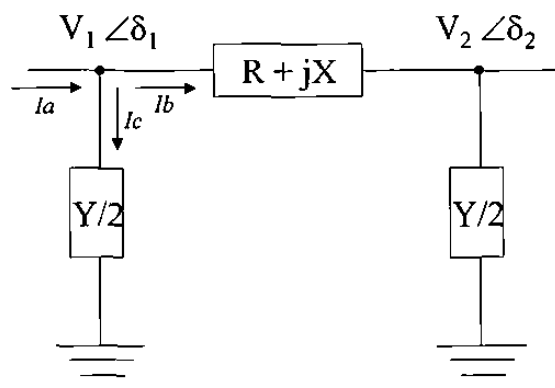


Figura A.1 Circuito  $\pi$  de una Línea de transmisión

Para la modelación de la línea se consideran los elementos  $R$ ,  $X$  y  $Y/2$  de la misma.

La ecuación a partir de la cual se deducen las ecuaciones de flujo de potencia es la ecuación de potencia compleja:

$$S = V I^* \quad (\text{A.1})$$

Donde  $S$  es la potencia compleja,  $V$  es el voltaje nodal e  $I^*$  es la corriente conjugada.

Aplicando LCK en el nodo 1:

$$I_a = I_b + I_c \quad (\text{A.2})$$

Por lo que (A.1) para el nodo 1 sería igual a:

$$S_1 = V_1 (I_b + I_c)^* \quad (\text{A.3})$$

donde

$I_b$  es la corriente debida al efecto Capacitivo de la Línea

$I_a$  es la corriente que circula a través de la línea entre los nodos 1 y 2.

La corriente  $I_b$  e  $I_c$  están definidas respectivamente como:

$$I_b = \frac{V_1}{-X_c} \quad (\text{A.4})$$

$$I_c = \frac{V_1 - V_2}{R + jX} \quad (\text{A.5})$$

donde

$X_c$  es el inverso de  $Y/2$ .

Sustituyendo A.4 y A.5 en A.3 se tiene:

$$S_I = V_1 \left[ \frac{V_1 - V_2}{R + jX} + \frac{V_1}{-jX_c} \right] \quad (\text{A.6})$$

Conjugando la ecuación anterior y sustituyendo valores de Voltajes en forma exponencial se tiene:

$$S_I^* = V_1 e^{-j\delta_1} \left[ \frac{V_1 e^{j\delta_1} - V_2 e^{j\delta_2}}{R + jX} + \frac{V_1 e^{j\delta_1}}{-jX_c} \right] \quad (\text{A.7})$$

Realizando operaciones

$$S_I^* = \frac{|V_1|^2 - V_1 V_2 e^{-j(\delta_1 - \delta_2)}}{R + jX} + \frac{|V_1|^2}{-jX_c} \quad (\text{A.8})$$

Definiendo  $\delta = \delta_1 - \delta_2$  y ocupando la identidad de Euler  $e^{j\delta} = \cos(\delta) + j\text{sen}(\delta)$ , se tiene:

$$S_I^* = \frac{V_1^2}{R + jX} - \frac{V_1 V_2 [\cos(\delta) - j\text{sen}(\delta)]}{R + jX} + \frac{V_1^2}{-jX_c} \quad (\text{A.9})$$

Multiplicando aquellos factores que incluyan  $(R + jX)$  se tiene:

$$S_I^* = \frac{V_1^2(R - jX)}{R^2 + X^2} - \frac{V_1 V_2 (R - jX) \cos(\delta)}{R^2 + X^2} + j \frac{V_1 V_2 (R - jX) \text{sen}(\delta)}{R^2 + X^2} + j \frac{V_1}{X_c} \quad (\text{A.10})$$

separando parte Real e imaginaria se tiene:

$$\text{Parte Real} = \frac{V_1^2 R - V_1 V_2 R \cos(\delta) - V_1 V_2 X \text{sen}(\delta)}{R^2 + X^2} \quad (\text{A.11})$$

La ecuación A.10 el factor  $S_I$  está conjugado por lo que se multiplicará por  $-1$  la parte imaginaria, dando como resultado:

$$\text{Parte Imaginaria} = \frac{V_1^2 X - V_1 V_2 X \cos(\delta) - V_1 V_2 R \sin(\delta)}{R^2 + X^2} - \frac{V_1^2}{Xc} \quad (\text{A.12})$$

Para que las ecuaciones A.11 y A.12 estén expresadas en términos de  $G$  y  $B$  se deducirán en términos de  $R$  y  $X$ , esto es:

$$Y = \frac{I}{R + jX} \quad (\text{A.13})$$

Multiplicando y dividiendo por el complejo conjugado de  $R + jX$  se tiene:

$$Y = \frac{I}{R + jX} \left( \frac{R - jX}{R - jX} \right) = \frac{R}{R^2 + X^2} + \frac{-jX}{R^2 + X^2} = G + jB \quad (\text{A.14})$$

Ocupando estos valores en las ecuaciones A.11 y A.12 se tiene:

$$\text{Parte Real} = P = V^2 G - V_1 V_2 G \cos(\delta) - V_1 V_2 B \sin(\delta) \quad (\text{A.15})$$

$$\text{Parte Imaginaria} = Q = -V_1^2 B + V_1 V_2 B_{km} \cos(\delta) - V_1 V_2 G \sin(\delta) - V_1^2 Bc \quad (\text{A.16})$$

Estas últimas dos ecuaciones son las que se derivan para la formación del Jacobiano.

## **APENDICE B**

# **FORMACION DE MATRIZ JACOBIANA**



## APENDICE B

# FORMACION DE MATRIZ JACOBIANA

### Formación de matriz Jacobiana

La matriz Jacobiana es indispensable para llevar a cabo el proceso de estimación de estado, la cual está definida como una matriz de primeras derivadas.

Un Estimador de Estado al estar basado en la información proporcionada por medidores, es lógico pensar que la matriz Jacobiana tendrá que estar formada a partir de dichas mediciones.

Las mediciones consideradas en este trabajo pueden ser de Flujo de Potencia a través de líneas y transformadores, de Potencias nodales y de Voltajes nodales, la matriz deberá estar formada a partir de las ecuaciones que representen el comportamiento de estas mediciones con respecto a las variables a estimar (normalmente ángulos y voltajes), ver Apéndice 1. Se tiene que las ecuaciones de flujo del nodo  $k$  al  $m$  serían:

$$P_{km} = V_k^2 G_{km} - V_k V_m G_{km} \cos(\delta_k - \delta_m) - V_k V_m B_{km} \sin(\delta_k - \delta_m) \quad (B.1)$$

$$Q_{km} = -V_k^2 B_c + V_k V_m B_{km} \cos(\delta_k - \delta_m) - V_k V_m G_{km} \sin(\delta_k - \delta_m) - V_k^2 B_c \quad (B.2)$$

Las derivadas parciales serían:

$$\frac{\partial P_{km}}{\partial \delta_k} = V_k V_m G_{km} \sin(\delta_k - \delta_m) - V_k V_m B_{km} \cos(\delta_k - \delta_m) \quad (B.3)$$

$$\frac{\partial P_{km}}{\partial \delta_m} = -V_k V_m G_{km} \sin(\delta_k - \delta_m) + V_k V_m B_{km} \cos(\delta_k - \delta_m) \quad (B.4)$$

$$\frac{\partial P_{km}}{\partial V_k} = 2 V_k G_{km} - V_m G_{km} \cos(\delta_k - \delta_m) - V_m B_{km} \sin(\delta_k - \delta_m) \quad (B.5)$$

$$\frac{\partial P_{km}}{\partial V_m} = -V_k G_{km} \cos(\delta_k - \delta_m) - V_k B_{km} \sin(\delta_k - \delta_m) \quad (B.6)$$

$$\frac{\partial Q_{km}}{\partial \delta_k} = -V_k V_m B_{km} \sin(\delta_k - \delta_m) - V_k V_m G_{km} \cos(\delta_k - \delta_m) \quad (B.7)$$

$$\frac{\partial Q_{km}}{\partial \delta_m} = V_k V_m B_{km} \sin(\delta_k - \delta_m) + V_k V_m G_{km} \cos(\delta_k - \delta_m) \quad (B.8)$$

$$\frac{\partial Q_{km}}{\partial V_k} = -2 V_k (B_{km} + B_c) + V_m B_{km} \cos(\delta_k - \delta_m) - V_m G_{km} \sin(\delta_k - \delta_m) \quad (B.9)$$

$$\frac{\partial Q_{km}}{\partial V_m} = V_k B_{km} \cos(\delta_k - \delta_m) - V_k G_{km} \sin(\delta_k - \delta_m) \quad (B.10)$$

Las derivadas parciales del flujo  $m - k$  se deducen de igual manera.

En un *estimador normal* sin modelación de interruptores la matriz Jacobiana estaría formada por las siguientes submatrices:

$$H = \begin{bmatrix} A & B \\ C & D \\ E & F \\ E1 & F1 \\ G & I \end{bmatrix} \quad (B.11)$$

Donde cada submatriz está definida como:

- A** Submatriz de dimensiones  $N_{nmp} \times N_{n-1}$ , contiene la derivada de los flujos de Potencia Activa con respecto al ángulo.
- B** Submatriz de dimensiones  $N_{nmp} \times N_n$ , contiene la derivada de los flujos de Potencia Activa con respecto al voltaje.
- C** Submatriz de dimensiones  $N_{nmq} \times N_{n-1}$ , contiene la derivada de los flujos de Potencia Reactiva con respecto al ángulo.
- D** Submatriz de dimensiones  $N_{nmq} \times N_n$ , contiene la derivada de los flujos de Potencia Reactiva con respecto al voltaje.
- E** Submatriz de dimensiones  $N_n \times N_{n-1}$ , contiene la derivada de las inyecciones nodales de Potencia Activa con respecto al ángulo.
- F** Submatriz de dimensiones  $N_n \times N_n$ , contiene la derivada de las inyecciones nodales de Potencia Activa con respecto al voltaje.
- E1** Submatriz de dimensiones  $N_n \times N_{n-1}$ , contiene la derivada de las inyecciones nodales de Potencia Reactiva con respecto al ángulo.
- F1** Submatriz de dimensiones  $N_n \times N_n$ , contiene la derivada de las inyecciones nodales de Potencia Reactiva con respecto al voltaje.
- G** Submatriz de dimensiones  $N_n \times N_{n-1}$ , está compuesta por ceros.
- I** Submatriz de dimensiones  $N_n \times N_n$ , contiene la derivada de la magnitud de voltajes nodales con respecto al voltaje, por lo que será diagonal unitaria.

Donde

$N_{mdp}$  son el Número de mediciones de Flujo de potencia Activa en líneas y transformadores.

$N_{mdq}$  son el Número de mediciones de Flujo de potencia Reactiva en líneas y transformadores.

$N_n$  es el número de nodos del sistema.

Se aprecia que en varias submatrices se tiene  $N_{n-1}$ , esto debido a la eliminación del nodo compensador.

Cuando se llevan a cabo *modelaciones en interruptores cerrados y abiertos*, la matriz Jacobiana se modificará de acuerdo a las nuevas variables a estimar y “pseudo-mediciones”.

La matriz Jacobiana para estas modelaciones estaría formada por las siguientes submatrices:

$$H = \begin{bmatrix} A & B & 01 \\ C & D & 04 \\ E & F & U \\ E1 & F1 & U1 \\ G & I & O2 \\ S & T & V2 \end{bmatrix} \quad (B.12)$$

Donde cada submatriz está definida como:

- A** Submatriz de dimensiones  $N_{mdp} \times N_{n-1}$ , contiene la derivada de los flujos de Potencia Activa con respecto al ángulo.
- B** Submatriz de dimensiones  $N_{mdp} \times N_n$ , contiene la derivada de los flujos de Potencia Activa con respecto al voltaje.

- O1** Submatriz de dimensiones  $N_{nmp} \times N_{nve}$ , está formado por ceros
- C** Submatriz de dimensiones  $N_{nmq} \times N_{n-1}$ , contiene la derivada de los flujos de Potencia Reactiva con respecto al ángulo.
- D** Submatriz de dimensiones  $N_{nmq} \times N_n$ , contiene la derivada de los flujos de Potencia Reactiva con respecto al voltaje.
- O4** Submatriz de dimensiones  $N_{nmq} \times N_{nve}$ , está formado por ceros
- E** Submatriz de dimensiones  $N_n \times N_{n-1}$ , contiene la derivada de las inyecciones nodales de Potencia Activa con respecto al ángulo.
- F** Submatriz de dimensiones  $N_n \times N_n$ , contiene la derivada de las inyecciones nodales de Potencia Activa con respecto al voltaje.
- U** Submatriz de dimensiones  $N_n \times N_{n-1}$ , contiene la derivada de los flujos correspondientes a las inyecciones nodales de Potencia Activa con respecto a las variables de Flujos de Potencia.
- E1** Submatriz de dimensiones  $N_n \times N_{n-1}$ , contiene la derivada de las inyecciones nodales de Potencia Reactiva con respecto al ángulo.
- F1** Submatriz de dimensiones  $N_n \times N_n$ , contiene la derivada de las inyecciones nodales de Potencia Reactiva con respecto al voltaje.
- U1** Submatriz de dimensiones  $N_n \times N_{nve}$ , contiene la derivada de los flujos correspondientes a las inyecciones nodales de Potencia Reactiva con respecto a las variables de Flujos de Potencia.
- G** Submatriz de dimensiones  $N_{n-1} \times N_{n-1}$ , está formada por ceros
- I** Submatriz de dimensiones  $N_{n-1} \times N_n$ , contiene la derivada de la magnitud de los voltajes nodales con respecto al voltaje, por lo que es una matriz diagonal unitaria
- O2** Submatriz de dimensiones  $N_{n-1} \times N_{nve}$ , está formada por ceros
- S** Submatriz de dimensiones  $N_{nve} \times N_{n-1}$ , contiene la derivada de pseudo-mediciones con respecto al ángulo
- T** Submatriz de dimensiones  $N_{nve} \times N_n$ , contiene la derivada de pseudo-mediciones con respecto al voltaje
- V2** Submatriz de dimensiones  $N_{nve} \times N_{nve}$ , contiene la derivada de pseudo-mediciones con respecto a variables de Flujos de Potencia

Para el caso de modelación de *interruptores con estado desconocido* la matriz Jacobiana tendrá una estructura parecida a la ocupada en la modelación de impedancia cero e infinita.

$$H = \begin{bmatrix} A & B \\ C & D \\ E & F \\ EI & FI \\ G & I \end{bmatrix} \quad (B.13)$$

Debido a que los flujos de envío y recepción de  $P$  y  $Q$  son considerados como variables de estado, las submatrices  $B$  y  $D$ , se modificarán de acuerdo a lo anterior.

En este caso no se agregó otra columna al Jacobiano para no aumentar más variables, por lo que se modificaron submatrices  $B$  y  $D$  para poder modelar este tipo de interruptor.

Las submatrices se añaden a la matriz en cuestión, donde estas submatrices deben tener el mismo número de renglones de la matriz a donde se añadirán.

A continuación se muestran las submatrices que se añadirán a la derecha de la matriz correspondiente.

- A** Submatriz de dimensiones  $N_{nmp} \times N_{n-1}$ , formada por ceros
- B** Submatriz de dimensiones  $N_{nmp} \times N$ , contiene la derivada de los flujos de Potencia Activa con respecto al voltaje y con respecto a los Flujos de potencia.
- C** Submatriz de dimensiones  $N_{nmq} \times N_{n-1}$ , formada por ceros
- D** Submatriz de dimensiones  $N_{nmq} \times N$ , contiene la derivada de los flujos de Potencia Reactiva con respecto al voltaje y con respecto a los Flujos de potencia

Es claro que al derivar las ecuaciones de flujo en  $B$  y  $D$  con respecto al ángulo y voltaje respectivamente el resultado será igual a cero, pero al derivar con respecto a los

flujos de potencia el valor será 1 o  $-1$  dependiendo si se trata de un flujo de envío o recepción.

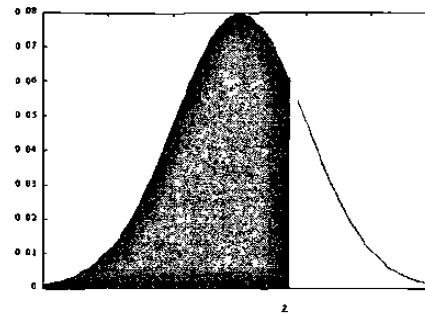
La formación de las submatrices (E, F, E1, F1, G e I) no se modifica con respecto a la modelación cero e infinita.

## **APENDICE C**

# **TABLAS DE PROBABILIDAD**



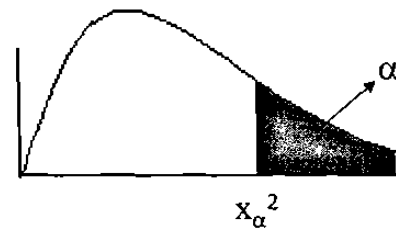
## Áreas bajo la curva normal



z	0.00	0.01	0.02	0.03	0.04	0.05	0.06	0.07	0.08	0.09
-3.4	.0003	.0003	.0003	.0003	.0003	.0003	.0003	.0003	.0003	.0002
-3.3	.0005	.0005	.0005	.0004	.0004	.0004	.0004	.0004	.0004	.0003
-3.2	.0007	.0007	.0006	.0006	.0006	.0006	.0006	.0005	.0005	.0005
-3.1	.0010	.0009	.0009	.0009	.0008	.0008	.0008	.0008	.0007	.0007
-3.0	.0013	.0013	.0013	.0012	.0012	.0011	.0011	.0011	.0010	.0010
-2.9	.0019	.0018	.0017	.0017	.0016	.0016	.0015	.0015	.0014	.0014
-2.8	.0026	.0025	.0024	.0023	.0023	.0022	.0021	.0021	.0020	.0019
-2.7	.0035	.0034	.0033	.0032	.0031	.0030	.0029	.0028	.0027	.0026
-2.6	.0047	.0045	.0044	.0043	.0041	.0040	.0039	.0038	.0037	.0036
-2.5	.0062	.0060	.0059	.0057	.0055	.0054	.0052	.0051	.0049	.0048
-2.4	.0082	.0080	.0078	.0075	.0073	.0071	.0069	.0068	.0066	.0064
-2.3	.0107	.0104	.0102	.0099	.0096	.0094	.0091	.0089	.0087	.0084
-2.2	.0139	.0136	.0132	.0129	.0125	.0122	.0119	.0116	.0113	.0110
-2.1	.0179	.0174	.0170	.0166	.0162	.0158	.0154	.0150	.0146	.0143
-2.0	.0228	.0222	.0217	.0212	.0207	.0202	.0197	.0192	.0188	.0183
-1.9	.0287	.0281	.0274	.0268	.0262	.0256	.0250	.0244	.0239	.0233
-1.8	.0359	.0352	.0344	.0336	.0329	.0322	.0314	.0307	.0301	.0294
-1.7	.0446	.0436	.0427	.0418	.0409	.0401	.0392	.0384	.0375	.0367
-1.6	.0548	.0537	.0526	.0516	.0505	.0495	.0485	.0475	.0465	.0455
-1.5	.0668	.0655	.0643	.0630	.0618	.0606	.0594	.0582	.0571	.0559
-1.4	.0808	.0793	.0778	.0764	.0749	.0735	.0722	.0708	.0694	.0681
-1.3	.0968	.0951	.0934	.0918	.0901	.0885	.0869	.0853	.0838	.0823
-1.2	.1151	.1131	.1112	.1093	.1075	.1056	.1038	.1020	.1003	.0985
-1.1	.1357	.1335	.1314	.1292	.1271	.1251	.1230	.1210	.1190	.1170
-1.0	.1587	.1562	.1539	.1515	.1492	.1469	.1446	.1423	.1401	.1379
-0.9	.1841	.1814	.1788	.1762	.1736	.1711	.1685	.1660	.1635	.1611
-0.8	.2119	.2090	.2061	.2033	.2005	.1977	.1949	.1922	.1894	.1867
-0.7	.2420	.2389	.2358	.2327	.2296	.2266	.2236	.2206	.2177	.2148
-0.6	.2743	.2709	.2676	.2643	.2611	.2578	.2546	.2514	.2483	.2451
-0.5	.3085	.3050	.3015	.2981	.2946	.2912	.2877	.2843	.2810	.2776



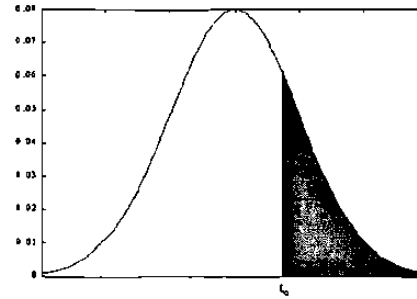
## Valores críticos de la distribución Xi-cuadrada



V	$\alpha$									
	.995	.99	.98	.975	.95	.90	.80	.75	.70	.50
1	0.000393	.000157	.000628	.000982	.00393	.01579	.0642	.102	.148	.455
2	.100	.201	.0404	.0506	.103	.211	.446	.575	.713	1.386
3	.0717	.115	.185	.216	.352	.584	1.005	1.213	1.424	2.366
4	.207	.297	.429	.484	.711	1.064	1.649	1.923	2.195	3.357
5	.412	.554	.752	.831	1.145	1.610	2.343	2.675	3.000	4.351
6	.676	.872	1.134	1.137	1.635	2.204	3.070	3.455	3.828	5.348
7	.989	1.239	1.564	1.690	2.167	2.833	3.822	4.255	4.671	6.346
8	1.344	1.646	2.032	2.180	2.733	3.490	4.594	5.071	5.527	7.344
9	1.735	2.088	2.532	2.700	3.325	4.168	5.380	5.899	6.393	8.343
10	2.156	2.558	3.059	3.247	3.940	4.865	6.179	6.737	7.267	9.342
11	2.603	3.053	3.609	3.816	4.575	5.578	6.989	7.584	8.148	10.341
12	3.074	3.571	4.178	4.404	5.226	6.304	7.807	8.438	9.034	11.340
13	3.565	4.107	4.765	5.009	5.892	7.042	8.634	9.299	9.926	12.340
14	4.075	4.660	5.368	5.629	6.571	7.790	9.467	10.165	10.821	13.339
15	4.601	5.229	5.985	6.262	7.261	8.547	10.307	11.036	11.721	14.339
16	5.142	5.812	6.614	6.908	7.962	9.312	11.152	11.912	12.624	15.338
17	5.697	6.408	7.255	7.564	8.672	10.085	12.002	12.792	13.531	16.338
18	6.265	7.015	7.906	8.231	9.390	10.865	12.857	13.675	14.440	17.338
19	6.844	7.633	8.567	8.907	10.117	11.651	13.716	14.562	15.352	18.338
20	7.434	8.260	9.237	9.591	10.851	12.443	14.578	15.452	16.226	19.337
21	8.034	8.897	9.915	10.283	11.591	13.240	15.445	16.344	17.182	20.337
22	8.663	9.542	10.600	10.982	12.338	14.041	16.314	17.240	18.101	21.337
23	9.260	10.196	11.293	11.688	13.091	14.848	17.187	18.137	19.021	22.337
24	9.886	10.856	11.992	12.401	13.848	15.659	18.062	19.037	19.943	23.337
25	10.520	11.524	12.697	13.120	14.611	16.473	18.940	19.939	20.867	24.337
26	11.160	12.198	13.409	13.844	15.379	17.292	19.820	20.843	21.792	25.336
27	11.808	12.879	14.125	14.573	16.151	18.114	20.703	21.749	22.719	26.336
28	12.461	13.565	14.847	15.308	16.928	18.939	21.588	22.657	23.647	27.337
29	13.121	14.256	15.574	16.047	17.708	19.768	22.475	23.567	24.577	28.336
30	13.787	14.953	16.306	16.791	18.493	20.599	23.364	24.478	25.508	29.336

V	$\alpha$									
	.30	.25	.20	.10	.05	.025	.02	.01	.005	.001
1	1.074	1.323	1.642	2.706	2.841	5.024	5.412	6.635	7.879	10.827
2	2.408	2.773	3.219	4.605	5.991	7.378	7.824	9.210	10.597	13.815
3	3.665	4.108	4.642	6.251	7.815	9.348	9.837	11.345	12.838	16.268
4	4.878	5.385	5.989	7.779	9.488	11.143	11.668	13.277	14.860	18.465
5	6.064	6.626	7.289	9.236	11.070	12.832	13.388	15.086	16.750	20.517
6	7.231	7.841	8.558	10.645	12.592	14.449	15.033	16.812	18.548	22.457
7	8.383	9.037	9.803	12.017	14.067	16.013	16.622	18.475	20.278	24.322
8	9.524	10.219	11.030	13.362	15.507	17.535	18.168	20.090	21.955	26.125
9	10.656	11.389	12.242	14.684	16.919	19.023	19.679	21.666	23.589	27.877
10	11.781	12.549	13.442	15.987	18.307	20.483	21.161	23.209	25.188	29.588
11	12.899	13.701	14.631	17.275	19.675	21.920	22.618	24.725	26.757	31.264
12	14.011	14.845	15.812	18.549	21.026	23.337	24.054	26.217	28.300	32.909
13	15.119	15.984	16.985	19.812	22.362	24.736	25.472	27.688	29.819	34.528
14	16.222	17.117	18.151	21.064	23.685	26.119	26.873	29.141	31.319	36.123
15	17.322	18.245	19.311	22.307	24.996	27.488	28.259	30.578	32.801	37.697
16	18.418	19.369	20.465	23.542	26.296	28.845	29.633	32.000	34.267	39.252
17	19.511	20.489	21.615	24.769	27.587	30.191	30.995	33.409	35.718	40.790
18	20.601	21.605	22.760	25.989	28.869	31.526	32.346	34.805	37.156	42.312
19	21.689	22.718	23.900	27.204	30.144	32.852	33.687	36.191	38.582	43.820
20	22.775	23.828	25.038	28.412	31.410	34.170	35.020	37.566	39.997	45.315
21	23.858	24.935	26.171	29.615	32.671	35.479	36.343	38.932	41.401	46.797
22	24.939	26.039	27.301	30.813	33.924	36.781	37.659	40.289	42.796	48.268
23	26.018	27.141	28.429	32.007	35.172	38.076	38.968	41.638	44.181	49.728
24	27.096	28.241	29.553	33.196	36.415	39.364	40.270	42.980	45.558	51.179
25	28.172	29.339	30.675	34.382	37.652	40.646	41.566	44.314	46.928	52.620
26	29.246	30.434	31.795	35.563	38.885	41.923	42.856	45.642	48.290	54.052
27	30.319	31.528	32.912	36.741	40.113	43.194	44.140	46.963	49.645	55.476
28	31.391	32.620	34.027	37.916	41.337	44.461	45.419	48.278	50.993	56.893
29	32.461	33.711	35.139	39.087	42.557	45.722	46.693	49.588	52.336	58.302
30	33.530	34.800	36.250	40.256	43.773	46.979	47.962	50.892	53.672	59.703

## Valores críticos de la distribución t-student



v	$\alpha$				
	100	050	025	010	005
1	3.078	6.314	12.706	31.821	63.657
2	1.886	2.920	4.303	6.965	9.925
3	1.638	2.353	3.182	4.541	5.841
4	1.533	2.132	2.776	3.747	4.604
5	1.476	2.015	2.571	3.365	4.032
6	1.440	1.943	2.447	3.143	3.707
7	1.415	1.895	2.365	2.998	3.499
8	1.397	1.860	2.306	2.896	3.355
9	1.383	1.833	2.262	2.821	3.250
10	1.372	1.812	2.228	2.764	3.169
11	1.363	1.796	2.201	2.718	3.106
12	1.356	1.782	2.179	2.681	3.055
13	1.350	1.771	2.160	2.650	3.012
14	1.345	1.761	2.145	2.624	2.977
15	1.341	1.753	2.131	2.602	2.947
16	1.337	1.746	2.120	2.583	2.921
17	1.333	1.740	2.110	2.567	2.898
18	1.330	1.734	2.101	2.552	2.878
19	1.328	1.729	2.093	2.539	2.861
20	1.325	1.725	2.086	2.528	2.845
21	1.323	1.721	2.080	2.518	2.831
22	1.321	1.717	2.074	2.508	2.819
23	1.319	1.714	2.069	2.500	2.807
24	1.318	1.711	2.064	2.492	2.797
25	1.316	1.708	2.060	2.485	2.787
26	1.315	1.706	2.056	2.479	2.779
27	1.314	1.073	2.052	2.473	2.771
28	1.313	1.701	2.048	2.467	2.763
29	1.311	1.699	2.045	2.462	2.756
Inf	1.282	1.645	1.960	2.326	2.576

**APENDICE D**

**OBSERVABILIDAD**

# APENDICE D

## OBSERVABILIDAD

Cuando se cuenta con un número suficiente de mediciones para que el vector de estado, magnitudes de voltaje y ángulos de fase, pueda ser estimado, se dice que la red es observable. Esto se cumple cuando el rango de la matriz Jacobiana  $H(x)$  es igual al número de variables de estado del sistema. El rango de la matriz Jacobiana de mediciones es dependiente de la ubicación y tipo de mediciones disponibles, así como de la topología de la red. Normalmente, el sistema de medición de la red interna se diseña de manera que la red no sólo sea observable, sino que también tenga redundancia de información. De hecho, la localización de las mediciones es importante en la confiabilidad del estimador de estado.

Debido a que la disponibilidad de mediciones y la topología de la red puede variar a través del tiempo, es necesario realizar una prueba de observabilidad cada vez que se tiene un cambio en el conjunto de mediciones disponibles o en la topología de la red. Si la red es totalmente observable, la estimación de estado puede proceder a determinar los valores de estado del sistema.

De otra manera, es necesario determinar los nodos inobservables. Estos nodos tienen que ser removidos de los cálculos del estimador de estado o hacerlos observables a través de añadir “pseudo-mediciones”. Es posible tener varias islas observables en un sistema,

sin embargo el estimador de estado debe ser capaz de obtener la solución de todas las islas, al especificar una barra de referencia en cada isla.

Básicamente existen dos clases de algoritmos para la determinación de observabilidad: algoritmos con un enfoque numérico y algoritmos con un enfoque topológico.

## D.1 Observabilidad Topológica

Los algoritmos con un enfoque topológico sólo utilizan información acerca de la topología de la red y de las mediciones, fueron desarrollados para evitar el cálculo numérico del rango de la matriz Jacobiana de mediciones. Tales algoritmos han sido utilizados en programas de observabilidad para el estimador de estado. En [14] Clements y Wollenberg consideraron redes con sólo mediciones de flujos en líneas e inyecciones nodales. En el caso de redes con mediciones de flujos en líneas, con mediciones activas y reactivas en pares, la condición topológica para la observabilidad es que se tenga al menos una medición de magnitud de voltaje, de manera que pueda formarse un árbol completo de la red. La determinación del árbol se puede realizar con métodos de búsqueda tales como *breadth-first* o *depth-first* [24]. Para una red de  $N$  barras y con sólo mediciones de inyecciones nodales, la determinación de observabilidad es aún más simple; debe haber al menos una medición de voltaje de barra y al menos  $N-1$  mediciones de inyecciones nodales.

En el algoritmo Clements - Wollenberg estas dos ideas se combinan para establecer las condiciones suficientes, aunque no necesarias de observabilidad. En la primera fase del algoritmo, las regiones de la red que contienen los árboles de mediciones de flujos son identificadas; estas regiones son llamadas islas observables de mediciones de flujos. Las regiones restantes contendrán, por necesidad, sólo mediciones de inyecciones nodales. En cada una de estas últimas regiones se definen dos tipos de barras: i) barras frontera que son comunes a las islas observables y a las regiones de flujos no medidos y ii) las barras restantes que son llamadas barras internas. El número de grados de libertad



de una región sin mediciones de flujos se define igual al número de barras internas más el número de islas adyacentes con mediciones de flujos. Una condición suficiente para obtener observabilidad es que el número de inyecciones medidas en la región sea al menos igual al número de grados de libertad menos uno y que ninguna barra frontera quede sin medir.

El algoritmo Clements - Wollenberg es conservador en el declarar observable una red. Sin embargo, el algoritmo puede etiquetar determinadas redes observables como no-observables. El algoritmo asume que las mediciones activas y reactivas siempre se presentan en pares, por lo que la observabilidad del modelo P- $\delta$  implica observabilidad del modelo Q-V. Horton y Masiello [15] extendieron el algoritmo de Clements-Wollenberg manejando en forma separada las porciones P- $\delta$  y Q-V de la solución en forma desacoplada.

En 1980, Krumpholz, Clements y Davis publicaron un algoritmo de observabilidad teórico-gráfico [24]. El algoritmo se fundamenta en teoremas básicos que establecen que la condición necesaria y suficiente para que una red sea observable es que esta contenga al menos un árbol completo observable. La determinación de la observabilidad de un árbol es mucho más simple; en un árbol observable, cada rama es asignada a una medición incidente en ella y cada medición sólo puede ser asignada a una rama del árbol. La asignación de mediciones de flujos de líneas a las ramas es individual ya que una medición de flujo incide sólo en una rama individual. Las mediciones de inyecciones nodales pueden ser asignadas a cualquiera de las ramas incidentes en la barra medida. La estrategia del algoritmo Krumpholz, Clements-Davis es encontrar primeramente el máximo del grupo de ramas con mediciones de flujos y luego utilizar un algoritmo para aumentar el campo en una zona observable, a través de la asignación de inyecciones a determinadas ramas del árbol. Este algoritmo se ha utilizado en programas de observabilidad en estimadores de estado.

Quintana, Simoes-Costa y Mandel [25] propusieron otro algoritmo teórico-gráfico basado en el teorema de lazo cerrado observable [24]. En el trabajo se relaciona el

problema de encontrar un árbol observable por tramos con un problema que, en el análisis combinatorial se denomina “matroid intersection problem”. El algoritmo se aplica para determinar si existe un árbol observable por tramos. Slutsker y Scudder [26] presentaron otro algoritmo no-numérico, este algoritmo se fundamenta en una reducción simbólica, más que numérica, de la matriz Jacobiana de mediciones.

## D.2 Observabilidad numérica

Monticelli y Wu [27] y [41] han propuesto una prueba de observabilidad numérica basada en la descomposición triangular de la matriz de información  $G(x)$ . Si  $G(x)$  se puede factorizar exitosamente, sin encontrar ceros en la diagonal, entonces se concluye que el sistema es observable. Por otro lado, si la red no es observable, uno o más ceros se presentarán en la diagonal de la matriz triangularizada. Cuando esto ocurre, se agrega una “pseudo-medición” de ángulo en el nodo correspondiente y se continúa con el proceso de factorización. Estos nodos son entonces automáticamente identificados como barras que requieren mediciones adecuadas para lograr la observabilidad. El algoritmo también proporciona información acerca de islas observables dentro de la red, seleccionando ángulos de fase de referencia para cada pseudo-medición de ángulo utilizada en la prueba de observabilidad.

Si todos los flujos de potencia son cero dentro de una isla observable, entonces todos los ángulos de fase de los nodos serán iguales al del nodo de referencia. Las pseudo-mediciones de ángulo proporcionan en efecto referencias adicionales para permitir que el cálculo se pueda realizar.

Estrictamente hablando se debe aplicar el algoritmo de observabilidad primero al modelo P- $\delta$  y posteriormente al modelo Q-V. La intersección resultante de las islas observables con los dos modelos define las islas observables del sistema. En la práctica, si las mediciones de potencia activa y reactiva se presentan en pares, la segunda parte del algoritmo de observabilidad no sería necesaria.

Si una rama no tiene medición de flujo, ni medición de inyección en uno de sus nodos terminales, esa rama no interviene en la matriz  $H$  y por lo tanto no participa en el análisis de observabilidad; ni en la estimación de estado. Esa rama es descartada de consideraciones posteriores.

### D.2.1 Algoritmo de Observabilidad

Se resume la metodología utilizada por un algoritmo de observabilidad numérica.

- Paso 1.- Se inicializa el conjunto de mediciones en la red.
- Paso 2.- Se actualiza el sistema de potencia removiendo todas las ramas que no tengan una medición de flujo ni una medición de inyección en sus nodos terminales.
- Paso 3.- Formar la matriz de ganancia  $G_\delta$ .
- Paso 4.- Efectuar una factorización triangular de  $G_\delta$  introduciendo pseudo-mediciones de ángulo cuando se encuentre un pivote igual a cero.
- Paso 5.- Resolver para  $\hat{\delta}$  la ecuación  $G_\delta \hat{\delta} = H_{p\delta}^t W_p z_p$ . Esta es una formulación de corriente directa (DC) del estimador de estado, considerando todas las cantidades medidas igual a cero, a excepción de las pseudo-mediciones de ángulo  $\delta$  que toman los valores supuestos  $\delta_k = 0, 1, 2$  y así sucesivamente.
- Paso 6.- Evaluar los flujos de rama  $P_{km} = x_{km}^{-1}(\delta_k - \delta_m)$ , para todas las ramas k-m de la red de potencia obtenida en el paso 2.
- Paso 7.- Actualizar la red del sistema en estudio, removiendo las ramas k-m con  $P_{km} \neq 0$ . Las anteriores son ramas inobservables.

- Paso 8.- Actualizar el conjunto de mediciones en cuestión removiendo las inyecciones de potencia en las barras donde al menos a una de las ramas se eliminó en el paso 7. Estas son clasificadas como *mediciones irrelevantes*.
- Paso.9.- Regresar al paso 2.

### **D.2.2 Restablecimiento de Observabilidad**

Se forma una lista de pseudo-mediciones factibles para hacer observable el sistema.

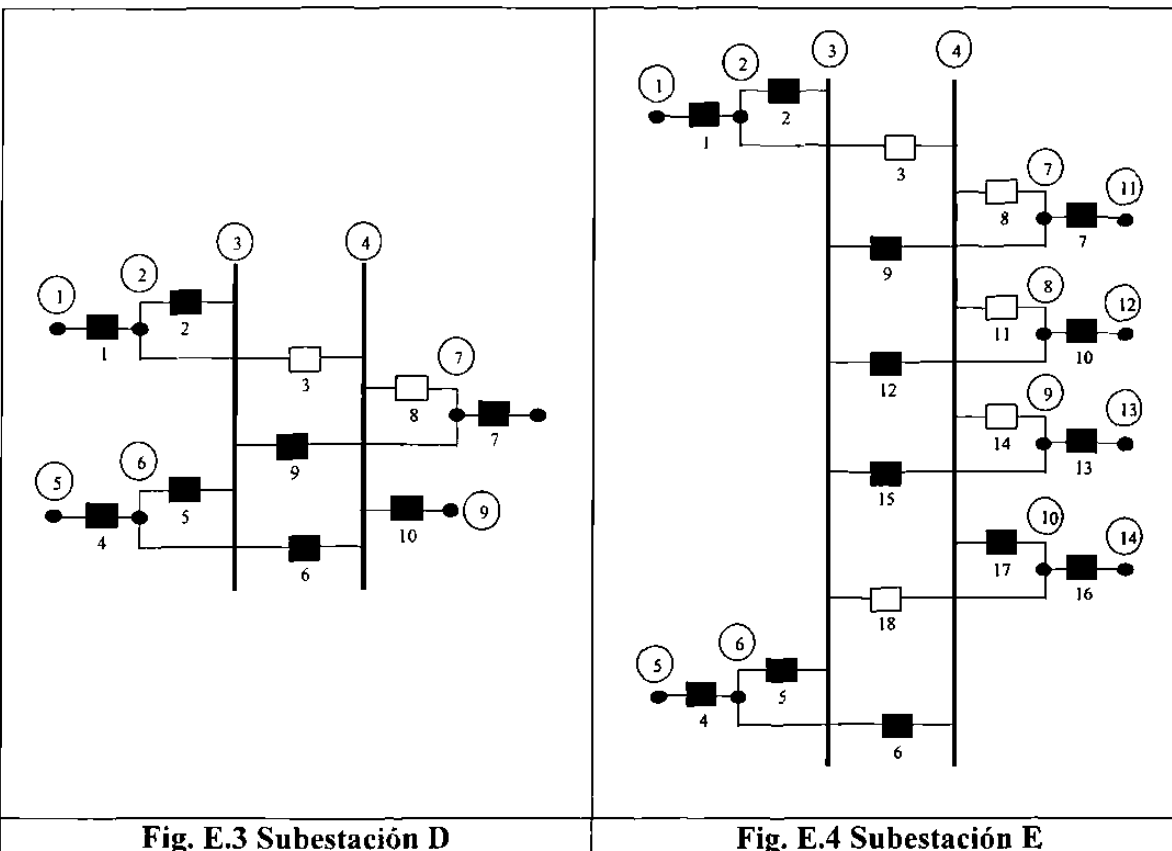
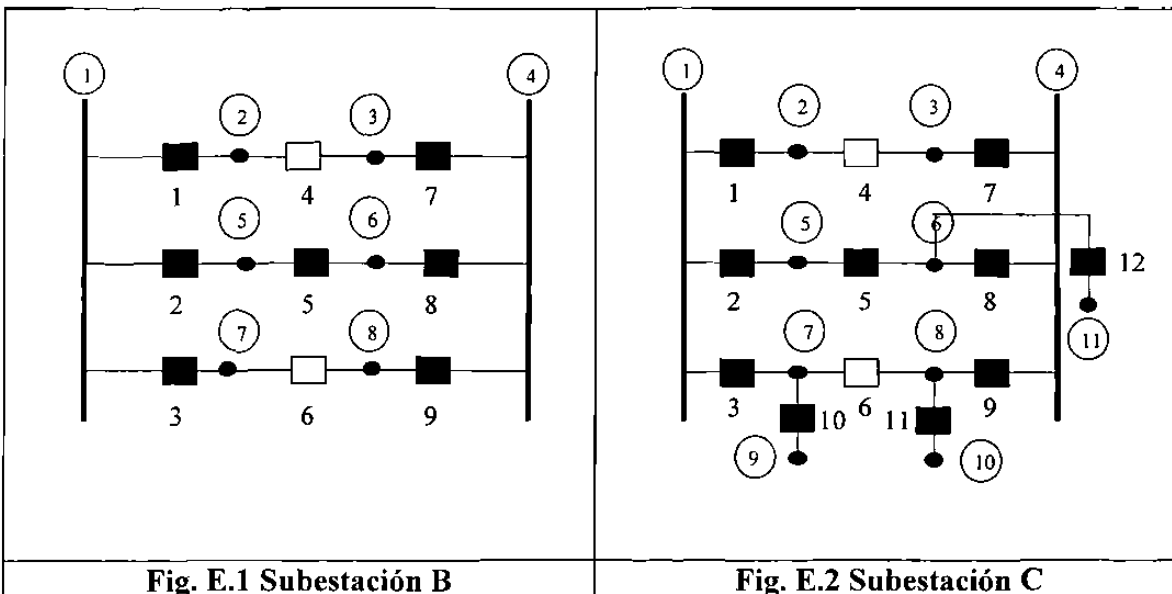
La selección e incorporación se efectúa en forma secuencial agregando una medición a la vez. Las pseudo-mediciones candidatas a hacer la red observable son las mediciones de inyecciones en los nodos donde se interconectan diferentes islas observables. Si las pseudo-mediciones adicionales no son redundantes harán que varias islas sean observables.

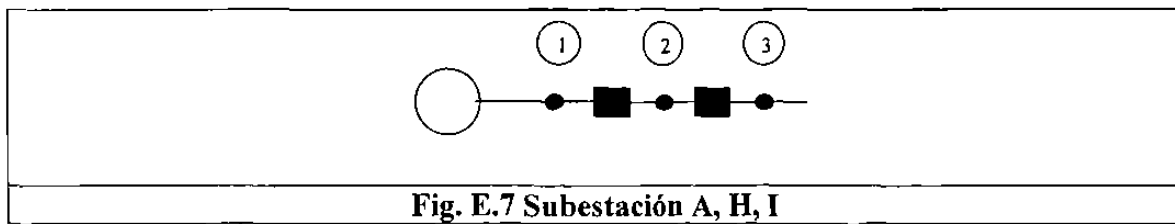
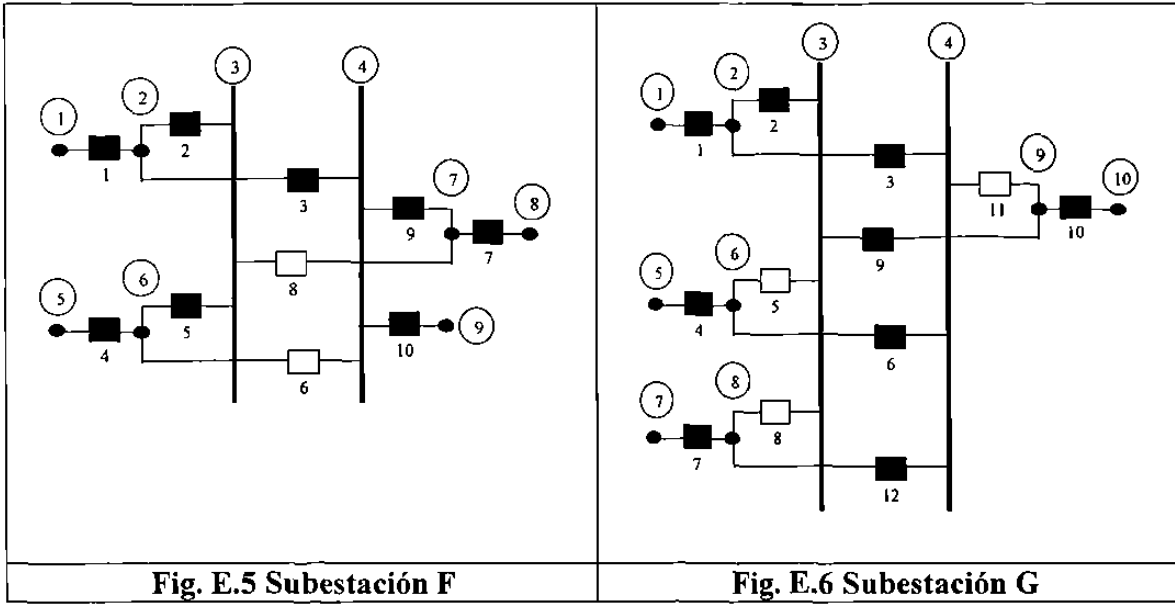
**APENDICE E**

**CONFIGURACION DE SISTEMA DE**

**PRUEBA**

A Continuación se muestra cada Subestación en forma expandida en donde se muestra el estado de los interruptores, los cuales para el caso principal forman una sola isla interna en cada subestación.





Los elementos están conectados de la siguiente manera:

Tabla E.1 Valores del sistema de prueba

Elemento	Nodo Interno Envío	Substación	Nodo Interno Recepción	Substación	Valor	
	Generador 1	1	A	1	A	P=1.038
Generador 2	1	H	1	H	P=0.500	Q=0.0143
Generador 3	1	I	1	I	P=0.600	Q=-0.0943
Transformador 1	3	A	2	B	Z = 0.002+0.01j	
Transformador 2	3	I	10	G	Z = 0.002+0.01j	
Transformador 3	3	H	5	E	Z = 0.002+0.01j	
Línea 1	3	B	2	C	Z=-0.0606+0.3030j Y/2=0.03030	
Línea 2	8	B	5	D	Z=0.04 + 0.20j Y/2=0.02	
Línea 3	7	B	1	E	Z=0.04 + 0.20j Y/2=0.02	
Línea 4	10	C	1	D	Z=0.08 + 0.4j	

					Y/2=0.04	
<b>Línea 5</b>	8	C	13	E	Z=0.0606 + 0.3030j Y/2=0.03030	
<b>Línea 6</b>	3	C	1	F	Z=0.0606 + 0.3030j Y/2=0.03030	
<b>Línea 7</b>	6	C	5	G	Z=0.04 + 0.2j Y/2=0.02	
<b>Línea 8</b>	8	D	12	E	Z=0.02 + 0.1j Y/2=0.01	
<b>Línea 9</b>	5	E	7	G	Z=0.05 + 0.25j Y/2=0.025	
<b>Línea 10</b>	14	E	9	F	Z=0.04 + 0.2j Y/2=0.02	
<b>Línea 11</b>	3	F	1	G	Z=0.08 + 0.4j Y/2=0.04	
<b>Carga 1</b>	9	C	--	--	P=0.700	Q=0.05
<b>Carga 2</b>	9	D	--	--	P=0.350	Q=0.025
<b>Carga 3</b>	11	D	--	--	P=0.350	Q=0.025
<b>Carga 4</b>	8	F	--	--	P=0.700	Q=0.05



