



UNIVERSIDAD NACIONAL DE COLOMBIA

# **Vulnerabilidad de la observabilidad de un sistema de potencia considerando cambios topológicos en la red de transmisión**

**Xiomara Alexandra Gómez Valencia**

Universidad Nacional de Colombia  
Facultad de Minas, Departamento de Energía Eléctrica y Automática  
Medellín, Colombia  
2015



# **Vulnerabilidad de la observabilidad de un sistema de potencia considerando cambios topológicos en la red de transmisión**

**Xiomara Alexandra Gómez Valencia**

Tesis o trabajo de investigación presentada(o) como requisito parcial para optar al título

de:

**Magister en Ingeniería Eléctrica**

Director:

Ph.D. Ernesto Pérez González

Universidad Nacional de Colombia

Facultad de Minas, Departamento de Energía Eléctrica y Automática

Medellín, Colombia

2015



*A mi familia, esos seres maravillosos que  
acompañan mi camino.*



## Resumen

En este trabajo de investigación se propone una metodología para evaluar la vulnerabilidad de la observabilidad en sistemas de potencia considerando cambios topológicos en la red de transmisión, haciendo uso de indicadores que evalúan el riesgo de perder la observabilidad dada una contingencia en el sistema de medida.

La metodología propuesta es evaluada en dos sistemas de prueba y para diferentes escenarios de medición.

**Palabras clave:** *Observabilidad, estimación de estado, sistemas de potencia, medidas críticas, conjuntos de medidas críticas.*

## **Abstract**

In this research work is proposed a methodology for vulnerability evaluating of observability in power system state estimation, considering topological changes in transmission network through the calculation of unobservability risk indicators, based on unavailability of measurements.

Proposed methodology is tested on two IEEE cases under several measurement scenarios.

**Key-words:** Observability, state estimation, power system, critical measurement, critical measurement set



# Contenido

	Pág.
<b>Resumen</b> .....	<b>VII</b>
<b>Abstract</b> .....	<b>VIII</b>
<b>Lista de figuras</b> .....	<b>XI</b>
<b>Lista de tablas</b> .....	<b>XII</b>
<b>Introducción</b> .....	<b>1</b>
<b>1. Análisis de observabilidad para estimación de estado</b> .....	<b>5</b>
1.1 Enfoque numérico de análisis de observabilidad .....	6
1.2 Identificación de medidas críticas .....	7
1.3 Implementación y validación del algoritmo.....	10
<b>2. Indicadores para evaluar la vulnerabilidad de la observabilidad</b> .....	<b>13</b>
2.1 Vulnerabilidad del sistema de medidas.....	14
2.2 Ocurrencia de nuevas medidas críticas <i>Cmeas</i> dada una <i>m-1</i> .....	14
2.3 Pérdida simultánea de dos medidas, <i>Npares</i> .....	15
2.4 Concentración de medidas en <i>Csets</i> .....	16
2.5 Presencia de k-Tuplas críticas, <i>Ck – Tuplas</i> .....	16
2.6 Presencia de <i>CRTU</i> .....	17
2.7 Presencia de líneas críticas <i>Clineas</i> .....	18
2.8 Redundancia .....	19
2.9 Selección de los índices para evaluar la vulnerabilidad de la observabilidad considerando cambios topológicos .....	21
<b>3. Metodología para evaluar la vulnerabilidad de la observabilidad en sistemas de potencia considerando cambios topológicos</b> .....	<b>25</b>
3.1 Generación de escenarios de cambios topológicos en la red de transmisión. 26	
3.1.1 Caso IEEE 4 barras con indisponibilidad de la medida <i>P1 – 2</i> .....	29
3.1.2 Caso IEEE 4 barras con indisponibilidad de la línea 1-2 .....	29
3.2 Definición del índice de vulnerabilidad de la observabilidad para sistemas de potencia .....	30
3.3 Índice de Vulnerabilidad de la observabilidad <i>IV01</i> .....	31
3.4 Índice de Vulnerabilidad de la observabilidad <i>IV02</i> .....	32
3.5 Índice de Vulnerabilidad de la observabilidad <i>IV03</i> .....	32
3.6 Índice de Vulnerabilidad de la observabilidad <i>IV04</i> .....	33
3.7 Índice de Vulnerabilidad de la observabilidad <i>IV05</i> .....	33
3.8 Descripción de la metodología propuesta .....	34

---

<b>4. Análisis de resultados .....</b>	<b>36</b>
4.1 Caso IEEE 6 barras.....	36
4.2 Vulnerabilidad de la observabilidad para el caso de IEEE 4 barras considerando cambios topológicos en la red transmisión.....	38
4.3 Caso IEEE 14 barras.....	42
<b>5. Conclusiones y recomendaciones .....</b>	<b>47</b>
5.1 Conclusiones.....	47
5.2 Trabajos futuros .....	48
<b>Bibliografía .....</b>	<b>51</b>

## Lista de figuras

	<b>Pág.</b>
<b>Figura 1-1:</b> Sistema IEEE de 14 barras (Brown Do Coutto Filho et al., 2013) .....	10
<b>Figura 3-1:</b> Caso IEEE de 4 barras(Brown Do Coutto Filho et al., 2001) .....	28
<b>Figura 3-2:</b> Diagrama de flujo para cuantificar observabilidad en sistemas eléctricos de potencia.....	35
<b>Figura 4-1:</b> Caso IEEE de 6 barras(London et al., 2007).....	37
<b>Figura 4-3:</b> Caso IEEE de 14 barras .....	42

## Lista de tablas

	<b>Pág.</b>
<b>Tabla 2-1:</b> Indicadores para evaluar observabilidad con análisis de criticidad.....	19
<b>Tabla 2-2:</b> (Continuación) .....	20
<b>Tabla 4-1:</b> Resultados caso IEEE 4 barras. Caso Base .....	39
<b>Tabla 4-2:</b> Resultados caso IEEE 4 barras con adición de la medida $P2 - 4$ . .....	40
<b>Tabla 4-3:</b> Resultados caso IEEE 4 barras con pérdida de la medida $P1 - 2$ . .....	40
<b>Tabla 4-4:</b> Resultados caso IEEE 4 barras con pérdida de la medida $P3 - 2$ . .....	41
<b>Tabla 4-5:</b> Resumen de resultados caso IEEE 4 barras.....	42
<b>Tabla 4-6:</b> Resultados caso IEEE 14 barras .....	43
<b>Tabla 4-7:</b> Resultados caso IEEE 14 barras adicionando la medida $P7 - 8$ .....	44
<b>Tabla 4-8:</b> Escala de valoración del riesgo .....	45

# Introducción

Para los sistemas eléctricos de potencia (SEP) la estimación de estado consiste en determinar el punto de operación de la red de transmisión, a través de los valores de las potencias activas y reactivas, las magnitudes de las tensiones y los ángulos en cada una de las barras del sistema (Blood et al., 2008). Para ello se cuenta con la información topológica (localización e interconexión de los componentes del sistema) y la información suministrada por el sistema de supervisión y adquisición de datos (SCADA)

En los centros de supervisión y control de los SEP, una de las herramientas principales del SCADA son los Sistemas de Gestión de Energía (EMS por sus siglas en inglés), los cuales requieren una estimación precisa de los estados del sistema, para poder brindar información adecuada en tiempo real al operador del sistema y apoyar la toma de decisiones, garantizando confiabilidad y seguridad en la atención de la demanda.

El desempeño del estimador de estado en los SEP depende de la calidad y disponibilidad de las medidas existentes. Por tal motivo, es necesario establecer si la disponibilidad de las medidas (en términos de número, tipo y localización) es suficiente para determinar el estado de todo el sistema de potencia, en cuyo caso la red se denomina observable (Bretas et al., 2005).

La observabilidad está dada por el tipo y localización de las medidas disponibles y adicionalmente por la topología de la red. Temporalmente una red puede ser no observable cuando se tienen fallas en los canales de comunicación, en las unidades remotas (RTU), reconfiguraciones topológicas o se pierde una medida crítica (Brown Do Coutto Filho et al., 2001). Si el conjunto de medidas es suficiente y geográficamente están bien distribuidas se puede obtener el estado del sistema y entonces la red es observable (Monticelli and Wu, 1985).

El análisis de observabilidad de la red puede hacerse fuera de línea (off-line), en una etapa de planeación y diseño del sistema de medición o en línea (on-line), antes de correr el estimador de estado, para determinar si con las últimas mediciones recibidas es posible obtener una solución confiable para el estimador de estado (Ali Abur and Exposito Gómez, 2004)

El principal objetivo de un análisis de observabilidad es evaluar si con las medidas disponibles es posible determinar el estado del sistema. De no ser posible, es necesario identificar en cuales áreas del sistema los estados pueden determinarse de forma aislada, las cuales se denominan islas observables (Monticelli and Wu, 1985). Para este análisis se cuenta principalmente con tres tipos de algoritmos: topológicos, numéricos e híbridos.

El análisis de observabilidad en los SEP ha sido objeto de numerosos trabajos de investigación, los cuales han sido abordados desde un punto de vista cualitativo, es decir, determinar si la red es observable o no observable. Sin embargo desde el punto de vista preventivo, el análisis de observabilidad convencional no proporciona información que permita evaluar el riesgo de perder observabilidad o tomar acciones para fortalecer el sistema de medición de la red. En (Do Coutto Filho et al., 2009) se proponen unos indicadores numéricos para evaluar la robustez de una configuración de mediciones, en términos de su capacidad para permitir observabilidad en la red.

Como una extensión del trabajo anterior, en (Brown Do Coutto Filho et al., 2013) proponen una metodología para la cuantificación de la observabilidad para la estimación de estado de un SEP basada en términos de la probabilidad de tener la red no observable bajo la condición de perder medidas críticas.

Göl y Abur proponen en (Gol et al., 2012) un estudio para métricas de desempeño de estimadores de estado y diseño de sistemas de medidas en sistemas de potencia, las cuales también están basadas en la cantidad de medidas críticas presentes en el sistema sobre el total de medidas disponibles.

El análisis cuantitativo de la observabilidad es beneficioso ya que permite una evaluación objetiva de la influencia de la configuración de la red y la localización de las medidas en

---

la observabilidad del sistema, facilita las comparaciones entre la situación actual y diferentes configuraciones de medición y ayuda a obtener el nivel de redundancia de mediciones requerido para garantizar la observabilidad del sistema bajo condiciones extremas (Brown Do Coutto Filho et al., 2013). Por esta razón, en este trabajo de investigación se evaluará la vulnerabilidad de la observabilidad de un sistema de potencia considerando cambios topológicos en la red de transmisión, haciendo uso de indicadores, que puedan ser usados para tomar decisiones que permitan fortalecer el sistema de medición dado y mejorar así el desempeño del estimador de estado.





# 1. Análisis de observabilidad para estimación de estado

La estimación de estado para un sistema de potencia, es un proceso que se lleva a cabo en cuatro pasos básicos: procesamiento de red, análisis de observabilidad, filtrado de datos erróneos y análisis residual (Do Coutto Filho et al., 2009). El procesamiento de configuración de red es un paso necesario para transformar la información a un modelo de barras/líneas. El análisis de observabilidad verifica si con las medidas disponibles y su localización, es posible encontrar un único estado para todo el sistema. Para el paso de filtrado y estimación de estados los algoritmos de optimización más usados están basados en mínimos cuadrados ponderados (WLS por sus siglas en inglés).

El análisis de observabilidad es un paso previo antes de estimar el estado de las variables del sistema de potencia, que generalmente entrega un resultado cualitativo: la red es o no observable.

Si se encuentra que el sistema es no observable, el algoritmo de estimación debe identificar y estimar para las islas observables del sistema o reemplazar medidas utilizando datos históricos, conocidos como pseudomedidas, en localizaciones específicas para restaurar la observabilidad completa, permitiendo así que la estimación de estado pueda ser llevada a cabo.

Los enfoques principales para llevar a cabo el análisis de observabilidad para estimación de estado en SEP pueden dividirse en análisis topológicos y análisis numéricos (Ali Abur and Exposito Gómez, 2004). Los análisis topológicos están basados en teoría de grafos, y determinan la observabilidad de la red basados en el tipo y la ubicación de las medidas (Gou and Abur, 2000) mientras que los análisis numéricos se basan en la factorización de la matriz de medición del sistema y la matriz de ganancia asociada. Estos últimos han

ganado gran aceptación debido principalmente a su simplicidad y fácil implementación en cualquier proceso de estimación de estado (Brown Do Coutto Filho et al., 2013)

## 1.1 Enfoque numérico de análisis de observabilidad

Desde el enfoque numérico, la teoría de observabilidad de red se desarrolla con el modelo de estimador de estado linealizado y generalmente se trata de manera desacoplada para las variables a estimar: voltajes y ángulos en todas las barras (Ali Abur and Exposito Gómez, 2004). Esto debido que el problema de observabilidad es de naturaleza estructural, es decir, está basado en la interdependencia existente entre las variables de estado y sus mediciones, la cual es establecida por la configuración de la red. Adicionalmente la observabilidad puede ser evaluada independiente de los valores de los parámetros de las líneas.

Para el análisis de observabilidad numérico, habitualmente se hacen las siguientes consideraciones (Gou and Abur, 2000):

- Todas las medidas de potencia son pares de potencia activa –reactiva.
- Se adopta un modelo lineal  $P - \theta$  (Potencia activa –Ángulo), dado por la ecuación 1.

$$z = H\theta + v \quad (1)$$

Donde  $z$  es el vector de medidas de potencia activa,  $H$  es la matriz Jacobiana desacoplada de inyecciones/flujo de potencia activa versus  $\theta$  (ángulos en las barras);  $v$  es el vector de error en las medidas, con matriz de covarianza  $R$  igual a  $I$  (matriz identidad)

- Todas las reactancias son iguales a uno ( $b_{ik} = 1$ ); las reactancias en derivación y a tierra no son consideradas.
- Los elementos de la matriz jacobiana asociados a la  $l - th$  medida, son definidos de acuerdo con:

$$\text{Flujo } P_{ik}: \quad H(l, i) = b_{ik} \quad H(l, k) = -b_{ik} \quad (2)$$

$$\text{Inyección } P_i: \quad H(l, i) = \sum_k b_{ik}, \quad i \neq k \quad H(l, k) = -b_{ik} \quad (3)$$

Donde los subíndices  $i$  y  $k$  son las barras del sistema de potencia.

Se dice que el sistema es observable si la matriz de ganancia  $G$  (definida como  $H^T H$ ) es no singular, lo cual puede ser verificado durante su factorización triangular. O de forma equivalente si  $H$  es de rango completo, es decir, el rango de  $H$  debe ser igual al número de variables a estimar. Cuando el sistema completo es no observable, los análisis de observabilidad numéricos utilizan esquemas iterativos para determinar las islas observables del sistema.

## 1.2 Identificación de medidas críticas

El proceso de estimación de estado puede ser afectado por modificaciones a las características de cada medida, principalmente, la cantidad y ubicación en la red del sistema de potencia (Brown Do Coutto Filho et al., 2013). Para que el estimador de estado mitigue los inconvenientes asociados a esta dependencia intrínseca, es necesario considerar en los diseños, niveles de redundancia del sistema de medición que permitan la aplicación de mecanismos resolutivos de problemas de detección, identificación y eliminación de datos erróneos, de igual forma, soportar la pérdida temporal de las mediciones sin comprometer la calidad de los valores estimados, en contra peso a los costos adicionales asociados a la redundancia.

Sin embargo, en la operación, cambios topológicos imprevistos o mal funcionamiento del sistema de adquisición de datos, pueden conllevar a pérdidas de medidas, traducido en disminución de los niveles de redundancia de medidas para el estimador de estado, que pueden representar condiciones tan críticas, como la inminente pérdida de observabilidad del sistema (Gou and Abur, 2000).

La pérdida de la observabilidad en la red está directamente relacionada con la presencia de medidas críticas (Bretas et al., 2005). Una *medida* es *crítica* si al ser removida del conjunto de medidas del sistema, se pierde la observabilidad del mismo. Adicionalmente, las medidas pueden volverse críticas de manera individual o por conjuntos, denominados *conjuntos de medidas críticas*. (Brown Do Coutto Filho et al., 2013).

La presencia de *medidas críticas* en un sistema de medición es un indicador de la vulnerabilidad de la red para la estimación de estado. Su identificación es una herramienta útil en la fase de diseño de un sistema de medición, permitiendo la transformación de tales medidas en *medidas redundantes*, con la adición de nuevas medidas al sistema. En la fase de operación de los sistemas de potencia la identificación de las *medidas críticas* puede ser usada para cuantificar el riesgo de perder observabilidad debido a la indisponibilidad de medidas en el sistema o cambios topológicos en la red (Brown Do Coutto Filho et al., 2013).

La existencia de medidas críticas y conjuntos de medidas críticas, está intrínsecamente dado por la configuración de la red y no por los parámetros asociados o el valor de las medidas, por tanto algunas consideraciones simplifican su identificación. En la literatura se han desarrollado diversos algoritmos con este fin: (London et al., 2000), (Gol and Abur, 2013), (Greyson and Oonsivilai, 2009), (Sou et al., 2012), (Brown Do Coutto Filho et al., 2001), (London et al., 2007). En este trabajo de investigación se usará el algoritmo propuesto en (Brown Do Coutto Filho, M et al., 2007), el cual se basa en el análisis residual y cuyos pasos se resumen a continuación:

- i. La matriz de covarianza residual  $E$ , asumiendo que la matriz de covarianza es igual a la matriz identidad, está dada por:

$$E = I - H(H^T H)^{-1} H^T \quad (4)$$

Donde:

$I$ : Matriz identidad

$H$ : Matriz Jacobiano desacoplado

- ii. El vector de análisis residual  $r$ , calculado en términos de la matriz  $E$  y considerando que el vector de medidas  $z$  es igual al vector unidad (suposición válida, considerando que la identificación de medidas críticas no depende del valor real de las medidas), está dado por:

$$r = Ez \quad (5)$$

Por lo tanto, la componente  $i^{th}$  del vector residual y del vector residual normalizado, se puede calcular de acuerdo con las ecuaciones 6 y 7.

$$r(i) = \sum_{k=1}^m E(i, k) \quad (6)$$

$$r_N(i) = \frac{|\sum_{k=1}^m E(i, k)|}{\sqrt{E(i, i)}} \quad (7)$$

Donde  $m$  es el número total de medidas del sistema.

Para cada medida  $z(i)$  del conjunto de medidas, calcular el  $r(i)$  y  $E(i, i)$  usando las ecuaciones (2), (3), (4) y (6). Si estos dos valores son ceros, entonces la medida  $z(i)$  se identifica como una *medida crítica*.

Para identificar los *conjuntos de medidas críticas*, se seleccionan las medidas no críticas (medidas redundantes) y se calcula el respectivo vector residual normalizado  $r_N$  usando (7). Se comparan secuencialmente los valores obtenidos, usando las ecuaciones 8 y 9

$$\rho_{kj} = \frac{r_N(k)}{r_N(j)} = 1 \quad (8)$$

$$\gamma_{kj} = \frac{|E(k, j)|}{\sqrt{E(k, k)}\sqrt{E(j, j)}} = 1 \quad (9)$$

Un *conjunto de medidas críticas* está conformado por mínimo dos medidas cuya componente del vector residual normalizado es siempre igual (ver ecuación 8) y adicionalmente su factor de correlación es máximo, es decir, igual a 1 (ver ecuación 9). Ambas ecuaciones deben satisfacerse simultáneamente.

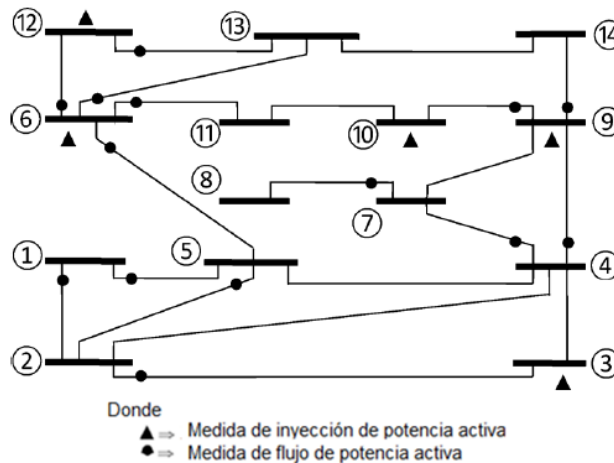
### 1.3 Implementación y validación del algoritmo

El algoritmo propuesto por (Brown Do Coutto Filho, M et al., 2007) fue implementado en Matlab® para determinar las medidas críticas y los conjuntos de medidas críticas de diferentes topologías del sistema con diferentes escenarios de medición.

Para dar validez a los resultados obtenidos con el algoritmo implementado, fueron usados cinco casos de prueba planteados en la literatura, logrando la identificación de las respectivas medidas críticas y conjuntos de medidas críticas. El algoritmo se validó con el caso IEEE 4 barras mostrado en (Brown Do Coutto Filho et al., 2001), los tres casos de diferentes topologías del sistema IEEE 14 barras planteados en (Brown Do Coutto Filho et al., 2013) y el caso de IEEE 30 barras planteado (London et al., 2007), donde la identificación de medidas críticas se hace a través de manipulación de la matriz jacobiana  $H$  del sistema y no con análisis residual como en las referencias anteriores.

Para todos los casos analizados se tuvieron resultados equivalentes a los presentados por los diferentes autores. En esta sección se presenta detalladamente el caso IEEE 14 barras con la configuración de medidas propuesta en (Brown Do Coutto Filho et al., 2013).

El sistema tiene 18 líneas y un total de 19 medidas disponibles ( $m = 19$ ), con 5 medidas de inyección de potencia en barras y 14 medidas de flujo de potencia activa.



**Figura 1-1:** Sistema IEEE de 14 barras (Brown Do Coutto Filho et al., 2013)

El vector de medidas  $z$  y la matriz  $H$  para este caso, se presentan a continuación, donde  $P_{i-j}$  corresponde a la medidas de flujo de potencia de la línea conectada entre el nodo  $i$  y  $j$  y la medida  $P_i$  corresponde a la medida de inyección de potencia a la barra  $i$ .

$$z = \begin{bmatrix} P_3 \\ P_6 \\ P_9 \\ P_{10} \\ P_{12} \\ P_{1-2} \\ P_{1-5} \\ P_{2-3} \\ P_{5-2} \\ P_{4-7} \\ P_{4-9} \\ P_{6-5} \\ P_{6-11} \\ P_{6-12} \\ P_{6-13} \\ P_{7-8} \\ P_{9-10} \\ P_{9-14} \\ P_{12-13} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 \\ 1 \\ 1 \\ 1 \\ 1 \\ 1 \\ 1 \\ 1 \\ 1 \\ 1 \\ 1 \\ 1 \\ 1 \\ 1 \\ 1 \\ 1 \\ 1 \\ 1 \\ 1 \\ 1 \end{bmatrix}$$

$$H = \begin{bmatrix} 0 & -1 & 2 & -1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & -1 & 4 & 0 & 0 & 0 & 0 & -1 & -1 & -1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & -1 & 0 & 0 & -1 & 0 & 4 & -1 & 0 & 0 & 0 & -1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -1 & 2 & -1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 2 & -1 & 0 \\ 1 & -1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & 0 & -1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & -1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & -1 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & -1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & -1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & -1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & -1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & -1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & -1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & -1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & -1 & 0 \end{bmatrix}$$

Con el algoritmo implementado se identifican las siguientes medidas críticas:

- Medidas críticas:  $P_{7-8}$

- El sistema cuenta además con tres conjuntos de medidas críticas:

$$C_{set1} = P_{1-2}, P_{1-5} \quad ; \quad C_{set2} = P_{2-3}, P_3, P_{10} \quad ; \quad C_{set3} = P_{4-7}, P_{9-14}, P_9$$

Estos resultados son idénticos a los obtenidos en (Brown Do Coutto Filho et al., 2013).

De acuerdo con la definición de medida crítica, la indisponibilidad de una medida de este tipo, vuelve el sistema no observable. Ahora bien, supongamos que la medida crítica  $P_{7-8}$  no está disponible.

La matriz  $H$  se modificaría eliminando la fila asociada a esa medida, es decir,  $H$  tendría dimensiones  $m \times n = 18 \times 14$ , como se muestra a continuación

$$H_{indisp, P_{7-8}} = \begin{bmatrix} 0 & -1 & 2 & -1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & -1 & 4 & 0 & 0 & 0 & 0 & -1 & -1 & -1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & -1 & 0 & 0 & -1 & 0 & 4 & -1 & 0 & 0 & 0 & -1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -1 & 2 & -1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 2 & -1 & 0 \\ 1 & -1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & 0 & -1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & -1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & -1 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & -1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & -1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & -1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & -1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & -1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & -1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & -1 & 0 \end{bmatrix}$$

Haciendo un test de observabilidad, donde la matriz de ganancia asociada debe tener rango completo, es decir igual al número de variables a estimar, en este caso  $n = 13$ , (asumiendo un ángulo de referencia) tenemos:

$$\text{rank}[G] = 12 < n = 14; \quad G = H^T H \quad (10)$$

De (10) se concluye que el sistema no es observable ante la indisponibilidad de la medida  $P_{7-8}$ . Por lo cual se puede afirmar que la medida  $P_{7-8}$ , efectivamente es una medida crítica para el sistema.



## **2. Indicadores para evaluar la vulnerabilidad de la observabilidad**

En los análisis de observabilidad convencionales la respuesta obtenida es de tipo binario, el sistema es o no es observable. Adicionalmente, si el sistema es no observable, se determinan, si existen, las islas observables y se ejecuta un procedimiento para reemplazar medidas (pseudomedidas), que convierta el sistema completo en observable nuevamente (Brown Do Coutto Filho, M et al., 2007). Sin embargo no se presenta información que permita establecer el riesgo de perder observabilidad. Este riesgo depende de la redundancia de datos, que no solo está limitada a la cantidad de medidas, sino también al tipo y su localización en la red.

Un análisis cuantitativo de observabilidad es beneficioso debido principalmente a que permite una evaluación objetiva de la influencia de la configuración de la red y la localización de las medidas en términos de observabilidad (Brown Do Coutto Filho et al., 2013), permitiendo que en la etapa de planeación de sistemas de potencia, se diseñe el sistema de medición con los niveles de redundancia requeridos. En el trabajo de investigación (Powalko et al., 2012), por ejemplo, proponen un índice que es usado para determinar el nivel de observabilidad de la red considerando ubicación óptima de Unidades de Medición Fasorial (PMU por sus siglas en ingles).

Debido a que la observabilidad de la red esta intrínsecamente relacionada con la presencia de medidas críticas, en (Brown Do Coutto Filho et al., 2013) proponen un análisis de criticidad, que da como resultado unos indicadores que permiten evaluar el riesgo de perder observabilidad en un sistema de potencia basado en contingencias de medidas, todas con igual probabilidad de ocurrencia.

Ahora bien, el objetivo de este trabajo de investigación es determinar la afectación de la observabilidad de un sistema de potencia considerando cambios topológicos en la red de transmisión. En este capítulo se revisan los indicadores planteados en (Brown Do Coutto Filho et al., 2013) para identificar cuáles permiten realizar este tipo de análisis.

## 2.1 Vulnerabilidad del sistema de medidas

La presencia de medidas críticas ( $C_{meas}$ ) en el conjunto de medidas disponibles hace que el riesgo de perder observabilidad ante la indisponibilidad de una medida de este tipo, sea inminente y está relacionado con la cantidad de medidas críticas presentes en el sistema.

Asumiendo que cada medida tiene la misma probabilidad de no estar disponible, el índice de Vulnerabilidad del sistema de medida  $MSV$  (por las siglas en ingles), ante la falla o ausencia de una  $C_{meas}$ , esta dado por (Do Coutto Filho et al., 2009):

$$MSV = \frac{N_{C_{meas}}}{m} \times 100\% \quad (11)$$

Donde:

$N_{C_{meas}}$  : Número de medidas críticas ( $C_{meas}$ )

$m$  : Número total de medidas en el sistema

El índice  $MSV$  es una manera de cuantificar la robustez del sistema de medida ante la condición de contingencias en las medidas, es decir, pérdida de una medida a la vez " $m - 1$ " (Do Coutto Filho et al., 2009)

## 2.2 Ocurrencia de nuevas medidas críticas $C_{meas}$ dada una $m-1$

Cuando se forman conjuntos de medidas críticas ( $C_{sets}$ ), en el conjunto de medidas del sistema, la probabilidad de que aparezcan  $C_{meas}$  adicionales, está relacionada con el número total de medidas que pertenecen a los  $C_{sets}$ , por tanto el índice  $\beta$ , esta dado por:

$$\beta = \frac{M_{C_{sets}}}{m} \times 100\% \quad (12)$$

Donde:

$M_{C_{sets}}$  : Número de medidas que pertenecen a los conjuntos de medidas críticas  $C_{sets}$

$m$  : Número total de medidas en el sistema

El índice  $\beta$  puede entenderse como la probabilidad de ocurrencia de  $C_{meas}$  en un sistema de medida “ $m - 1$ ” robusto. (Do Coutto Filho et al., 2009).

La indisponibilidad de cualquier par de medidas que pertenecen a un conjunto de medidas críticas ( $C_{set}$ ) hace el sistema no observable y son denominadas  $C_{pares}$ .

### 2.3 Pérdida simultánea de dos medidas, $N_{pares}$

Considerando la ausencia simultánea de dos medidas, el número total de combinaciones de las  $m$  medidas disponibles (denotado por  $N_{pares}$ ) es:  $N_{pares} = m(m - 1)/2$ . En esta condición el sistema se vuelve no observable si el par de medidas ausentes contiene: 1) Dos medidas del mismo conjunto crítico  $C_{set}$  (Denominadas par crítico  $C_{par}$ ); 2) Dos medidas críticas; 3) Una medida crítica. El número de pares críticos, ( $C_{pares}$ ), extraído del conjunto de medidas críticas y denotado por  $N_{C_{pares}}$  está dado por el número de combinaciones de  $M_{C_{sets}}$  (número total de medidas que pertenecen a los conjuntos críticos) y es igual a  $N_{C_{pares}} = M_{C_{sets}}(M_{C_{sets}} - 1)/2$ . El número de pares con al menos una medida crítica ( $C_{meas}$ ) – denotado por  $N'_{pares}$  – puede ser obtenido adicionando al número de pares compuesto por dos medidas críticas, el número de pares que contienen una medida crítica:  $N'_{pares} = [N_{C_{meas}}(N_{C_{meas}} - 1)/2] + [N_{C_{meas}}(m - N_{C_{meas}})] = N_{C_{meas}}(2m - N_{C_{meas}} - 1)/2$ .

Si un par de medidas, seleccionado aleatoriamente del total de medidas de pares disponibles  $N_{pares}$  del conjunto total de medidas, queda fuera de operación, la probabilidad de que el sistema se haga no observable está dado por:

$$\delta = \frac{N_{C_{pares}} + N'_{pares}}{N_{pares}} \times 100\% \quad (13)$$

Donde:

$N_{C_{pares}}$  : Número de pares críticos del sistema

$N'_{pares}$  : Número de pares con al menos una medida crítica

$N_{pares}$  : Número total de pares formado con las  $m$  medidas del sistema.

## 2.4 Concentración de medidas en $C_{sets}$

Si se tiene presencia de conjuntos de medidas críticas  $C_{sets}$ , es preferible tener varios  $C_{sets}$ , con pocas medidas, que tener pocos conjuntos de medidas críticas  $C_{sets}$  cada uno con una gran cantidad de medidas asociadas. Esta situación puede cuantificarse con el índice  $k$

$$k = \frac{M_{C_{sets}}}{mN_{C_{sets}}} \times 100\% \quad (14)$$

Donde:

$M_{C_{sets}}$  : Número de medidas que pertenecen a los conjuntos de medidas críticas  $C_{sets}$

$N_{C_{sets}}$  : Número de conjuntos de medidas críticas  $C_{sets}$

$m$  : Número total de medidas en el sistema

El peor caso es cuando se tiene un único conjunto de medidas críticas y todas las medidas del sistema están contenidas en ese conjunto.

## 2.5 Presencia de k-Tuplas críticas, $Ck - Tuplas$

Desde la teoría de conjuntos, una  $k - Tupla$  es un conjunto de  $k$  elementos. Además, una  $k - Tupla$  crítica ( $Ck - tupla$ ) se define como un grupo de  $k$  medidas redundantes, tales que la indisponibilidad simultanea de todas las medidas que pertenecen a la  $k - Tupla$  hacen el sistema no observable, pero la indisponibilidad de la medida  $j$  del conjunto,  $\forall j \in k$ , no lo hace. La definición de una  $Ck - tupla$  es la generalización natural del concepto de medida crítica ( $C1 - Tupla$ ) y  $C_{par}$  ( $C2 - Tupla$ ). La probabilidad de que el sistema se vuelva indisponible bajo la condición de perder  $k - tuplas$ , está dada por:

$$\gamma = \frac{N_{Ck-tuplas} + N'_{k-tuplas}}{N_{k-tuplas}} \times 100\% \quad (15)$$

Donde:

$N_{Ck-tuplas}$  : Número de k-Tuplas críticas

$N_{k-tuplas}$  : Número de k-Tuplas formado con las  $m$  medidas

$N'_{k-tuplas}$  : Número de k-Tuplas compuesto de  $C_{meas}, C_{pares}, \dots, C(k-1)$  –Tuplas.

## 2.6 Presencia de $C_{RTU}$

Una RTU (Unidad Terminal Remota) es un concentrador de medidas para el sistema SCADA (sistema de Supervisión, Control y Adquisición de Datos), que generalmente cuenta con un número significativo de medidas y están asociadas a las barras del sistema eléctrico de potencia, por tanto su distribución geográfica está relacionada con un área del SEP.

La pérdida de una RTU significa perder un gran número de medidas, lo cual podría traer el riesgo de pérdida de observabilidad de un área del SEP.

Sin embargo, pueden identificarse las RTU críticas desde el punto de vista de observabilidad, es decir, aquellas cuya indisponibilidad (incluyendo el total de las medidas que contiene) hace el sistema no observable. Para ello se proponen las siguientes reglas (Brown Do Coutto Filho et al., 2013)

- Regla 1: Si una RTU contiene una o más medidas  $C_{meas}$ , y/o dos o más medidas pertenecen al mismo  $C_{set}$ , entonces se trata de una  $C_{RTU}$ .
- Regla 2. Si una RTU está instalada en una barra adyacente a una barra conectada radialmente que no tiene RTU, entonces dicha RTU es una  $C_{RTU}$ , independientemente del número de medidas disponibles desde esta RTU.
- Regla 3. Una RTU con solo una medida disponible (no  $C_{meas}$ ) no es una  $C_{RTU}$ ; independiente de si la medida pertenece o no a un  $C_{set}$
- Regla 4. Una RTU con dos medidas disponibles (donde ninguna es medida crítica o pertenecen al mismo  $C_{set}$ ) no es una  $C_{RTU}$ ; una de estas medidas puede pertenecer a un  $C_{set}$ , o cada una puede pertenecer a diferentes  $C_{sets}$ , o no pertenecer a ningún  $C_{sets}$ .

- Regla 5. Una RTU con tres o más medidas disponibles es una  $C_{RTU}$ , si una k-Tupla crítica,  $C_k - tupla (k > 3)$  es formada con sus medidas.; de otra forma no es una  $C_{RTU}$ .

El índice para cuantificar el riesgo de perder la observabilidad bajo presencia de  $C_{RTU}$  está dado por:

$$\mu = \frac{N_{C_{RTU}}}{N_{RTU}} \times 100\% \quad (16)$$

Donde:

$N_{C_{RTU}}$  : Número de RTU críticas del sistema

$N_{RTU}$  : Número total de RTU del sistema

## 2.7 Presencia de líneas críticas $C_{lineas}$

Una línea crítica,  $C_{linea}$  de una red observable puede ser definida como aquella cuya indisponibilidad ocasiona que el sistema se convierta no observable. Un error de configuración de la red en una línea crítica  $C_{linea}$  se hace indetectable. (Clements and Davis, 1988)

Considerando la indisponibilidad de una línea de la red de transmisión, seleccionada aleatoriamente del total de líneas del sistema, la probabilidad de que el sistema se convierta no observable, viene dada por:

$$\vartheta = \frac{N_{C_{lineas}}}{N_{lineas}} \times 100\% \quad (17)$$

Donde:

$N_{C_{lineas}}$  : Número de líneas críticas del sistema

$N_{lineas}$  : Número total de líneas del sistema

Para la identificación de las líneas críticas se puede extender el análisis de criticidad de medidas, una vez identificadas las medidas críticas y los conjuntos de medidas críticas, es posible determinar que si una medida de flujo de potencia es una medida crítica  $C_{meas}$ ,

entonces la línea asociada a esta medida es una  $C_{lineas}$ . Es posible también adoptar la metodología planteada en (Jian Chen and Abur, 2008)

## 2.8 Redundancia

La redundancia de un sistema de medidas se refiere a la cantidad de datos supervisados de una red de potencia, en relación con el mínimo número necesario para estimar todas las variables de estado. Este índice es comúnmente usado para hacer comparaciones triviales entre sistemas de medidas.

Para evaluar la robustez del sistema de medidas, el índice de redundancia normalizado esta dado por  $\eta\%$ , donde se calcula la relación de la redundancia global en relación con la máxima redundancia que puede tener el sistema de medidas. Ver la ecuación 18.

$$\eta\% = \frac{m-n}{m_{max}-n} \times 100\% \quad (18)$$

Donde:

$m$  : Número total de medidas en el sistema

$n$  : Número de variables a estimar

$m_{max}$  : Máximo número de medidas que pueden ser obtenidas en una configuración dada

**Tabla 2-1:** Indicadores para evaluar observabilidad con análisis de criticidad.

Índice	Descripción		Objetivo
<b>MSV</b>	<i>Vulnerabilidad del Sistema de Medidas</i>		Evaluar la confiabilidad de sistema ante la "m-1". Para un sistema de medidas robusto, se recomienda un MSV < 3% (Gol et al., 2012)
	Ecuación	$MSV = \frac{N_{C_{meas}}}{m} \times 100\%$	
	Variables	$N_{C_{meas}}$	
$m$		Número total de medidas en el sistema	
<b><math>\beta</math></b>	<i>Ocurrencia de nuevas medidas críticas <math>C_{meas}</math> dada una m-1</i>		Evaluar la vulnerabilidad de la observabilidad en un sistema que es "m-1" robusto.
	Ecuación	$\beta = \frac{M_{C_{sets}}}{m} \times 100\%$	
	Variables	$M_{C_{sets}}$	
$m$		Número total de medidas en el sistema	

Tabla 2-2: (Continuación)

Índice	Descripción		Objetivo	
$\delta$	<i>Pérdida de simultanea de dos medidas, <math>N_{pares}</math></i>		Evaluar la probabilidad de perder la observabilidad del sistema ante la contingencia m-2 de las medidas.	
	Ecuación	$\delta = \frac{N_{C_{pares}} + N'_{pares}}{N_{pares}} \times 100\%$		
	Variables	$N_{C_{pares}}$		Número de pares críticos del sistema
		$N'_{pares}$		Número de pares con al menos una medida crítica.
	$N_{pares}$	Número total de pares formado con las m medidas del sistema.		
$k$	<i>Concentración de medidas en <math>C_{sets}</math></i>		Evaluar la vulnerabilidad del sistema a “datos erróneos”. En sistemas con un alto valor de $k$ los efectos de datos erróneos son más perjudiciales.	
	Ecuación	$k = \frac{M_{C_{sets}}}{mN_{C_{sets}}} \times 100\%$		
	Variables	$M_{C_{sets}}$		Número de medidas que pertenecen a los conjuntos de medidas críticas $C_{sets}$
		$N_{C_{sets}}$		Número de conjuntos de medidas críticas $C_{sets}$
	$m$	Número total de medidas en el sistema		
$\gamma$	<i>Presencia de k-Tuplas críticas, <math>C_k - Tuplas</math></i>		Evaluar la probabilidad de perder la observabilidad del sistema ante la presencia de K-tuplas críticas en el sistema.	
	Ecuación	$\gamma = \frac{N_{C_k-tuplas} + N'_{k-tuplas}}{N_{k-tuplas}} \times 100\%$		
	Variables	$N_{C_k-tuplas}$		Número de k-Tuplas críticas
		$N_{k-tuplas}$		Número de k-Tuplas formado con las m medidas
	$N'_{k-tuplas}$	Número de k-Tuplas compuesto de $C_{medias}, C_{pares}, \dots, C_{(k-1)-Tuplas}$ .		
$\mu$	<i>Presencia de RTU críticas, <math>C_{RTU}</math></i>		Evaluar la probabilidad de perder la observabilidad ante la pérdida de RTUs críticas en el sistema.	
	Ecuación	$\mu = \frac{N_{C_{RTU}}}{N_{RTU}} \times 100\%$		
	Variables	$M_{C_{RTU}}$		Número de RTU críticas del sistema $C_{RTU}$
$N_{C_{RTU}}$		Número total de RTU del sistema $C_{RTU}$		
$\vartheta$	<i>Presencia de líneas críticas, <math>C_{lineas}</math></i>		Evaluar la probabilidad de perder la observabilidad ante la pérdida de líneas críticas en el sistema.	
	Ecuación	$\vartheta = \frac{N_{C_{lineas}}}{N_{lineas}} \times 100\%$		
	Variables	$N_{C_{lineas}}$		Número de líneas críticas del sistema
$N_{lineas}$		Número total de líneas del sistema		



## 2.9 Selección de los índices para evaluar la vulnerabilidad de la observabilidad considerando cambios topológicos

Un cambio topológico puede ser definido como la desconexión o conexión de líneas de transmisión en los sistemas de potencia. La inclusión de cambios topológicos en el análisis de observabilidad modifica la matriz de mediciones  $H$  debido a que los elementos que la conforman se afectarían de la siguiente forma:

- *Flujo  $P_{ik}$* : Si la línea considerada indisponible tiene medidas de flujo de potencia, la matriz  $H$  perderá la(s) fila(s) asociada(s) a la(s) medidas(s), por lo tanto, disminuye la dimensión de la matriz  $H$ .

Debido a que las variables a estimar, para el caso desacoplado, son los ángulos en las barras, esto equivale a decir que se tiene un sistema de menos ecuaciones disponibles que en el caso inicial, llamado *caso base*, para resolver las mismas incógnitas. Esto no implica que el sistema de ecuaciones pierda la capacidad de ser solucionable matemáticamente.

- *Inyección  $P_i$* : Si la línea considerada indisponible, está conectada a una barra con medición de inyección de potencia activa, el balance de potencia activa hecho en ese nodo se modifica (ver ecuación (3)), eliminando la posición  $(i, j)$  de la matriz  $H$  asociada a las barras entre las cuales está conectada la línea y reduciendo en una unidad el valor de la posición  $(i, i)$ , nodo en el cual se está haciendo el balance de potencia (Estos resultados son obtenidos considerando que, para el análisis de observabilidad numérico, es posible asumir todas las susceptancias iguales a 1,  $b_{ik} = 1$ )

Estos cambios a la matriz  $H$ , cuando se consideran cambios topológicos en la red, podrían ocasionar un aumento en el número de medidas críticas  $C_{meas}$  y/o un aumento en el número de conjuntos de medidas críticas  $C_{sets}$ , o incluso en el número de las medidas que los conforman, modificando el riesgo de perder observabilidad en el sistema.

Dado que los cambios topológicos modifican la presencia de medidas críticas en el sistema, es posible evaluar la vulnerabilidad de la observabilidad en un sistema de potencia bajo esta condición.

Para este análisis serán usados los indicadores nombrados a continuación debido a las siguientes consideraciones:

- El índice de *Vulnerabilidad del Sistema de Medidas VSM* permite determinar el riesgo de pérdida de observabilidad, ya que cuantifica la presencia de las medidas críticas en el conjunto total de medidas y expone la vulnerabilidad del sistema ante la condición  $m-1$ . Debido a que los cambios topológicos en la red de transmisión pueden modificar la conformación de esta clase de medidas, este índice es pertinente.
- El índice de *Ocurrencia de Medidas Críticas  $\beta$*  cuantifica la posibilidad de tener nuevas medidas críticas en un sistema  $m-1$  robusto. Este índice es complementario con el índice *Vulnerabilidad del Sistema de Medidas VSM*. Es conveniente evaluar este índice debido a que los cambios topológicos en la red de transmisión pueden modificar la conformación de los conjuntos críticos del sistema de medidas.
- El índice para cuantificar la pérdida simultánea de dos medidas  $\delta$ , evalúa la probabilidad de perder observabilidad ante la contingencia  $m-2$  de las medidas del sistema. El efecto de perder dos medidas (Flujo de potencia) asociadas a una línea, está considerado en la evaluación de la contingencia de la línea, por tanto este índice no será evaluado.
- El índice de *Concentración de Medidas en Conjuntos Críticos  $k$*  evalúa la agrupación de medidas en los conjuntos críticos. Su evaluación es pertinente debido a que un alto valor de  $k$  indica que el sistema de potencia está muy vulnerable a perder observabilidad y como se ha mencionado anteriormente, la

contingencia de una línea en la red de transmisión puede alterar eventualmente esta distribución de medidas.

- El índice para cuantificar la observabilidad bajo presencia de  $k - Tuplas$  críticas de medidas  $\gamma$ , no será evaluado debido a que delimitando el alcance de este trabajo de investigación se considerará la contingencia sencilla  $m - 1$  de las medidas.
- El índice para cuantificar la observabilidad bajo presencia de RTU críticas  $\mu$ , no será evaluado debido a que los cambios topológicos considerados en este trabajo de investigación serán las contingencias sencillas  $n - 1$ , en la red de transmisión.
- El índice para cuantificar la observabilidad bajo presencia de líneas críticas  $\vartheta$ , no será evaluado. Esto debido a que se hará un análisis de todas las contingencias sencillas  $n - 1$  del sistema, considerando su probabilidad de ocurrencia y se determinará la vulnerabilidad de la observabilidad del sistema de potencia.



### **3. Metodología para evaluar la vulnerabilidad de la observabilidad en sistemas de potencia considerando cambios topológicos**

En los análisis de confiabilidad en sistemas de potencia, es usual cubrir la contingencia  $n-1$  de las líneas de transmisión, es decir, el sistema debe soportar la contingencia de una línea a la vez. Para el sistema eléctrico colombiano este es un criterio de confiabilidad en el planeamiento eléctrico (Resolución CREG 025/1995).

Las contingencias son definidas como la salida de operación no programada de equipos del sistema de potencia. Esta desconexión puede ser atribuida a causas internas o externas (Balu et al., 1992). Las causas internas están relacionadas a la falla de parámetros de equipos (ruptura del aislamiento, sobrecalentamiento, sobrepresión) o al mal funcionamiento de los mismos.

Las causas externas son atribuidas a los efectos del medio circundante, tales como descargas atmosféricas, el viento o la salinidad, y otras a eventos no relacionados al clima, como accidentes o actos mal intencionados contra la infraestructura eléctrica. Estas causas representan la mayor cantidad de desconexiones de equipos de potencia, principalmente líneas, expuestas a la intemperie: condiciones topográficas, medio ambientales y climáticas del entorno.

La tasa de falla de las líneas transmisión es afectada por el tipo de evento al que está expuesto el sistema. Esto conlleva a poseer una probabilidad diferente de ocurrencia de contingencia para cada línea.

La contingencia de un solo elemento, denominada  $n - 1$ , ocasiona una reducción topológica que deteriora la confiabilidad y, en ocasiones, la seguridad del sistema. Sin embargo, además de generar pérdida de las condiciones eléctricas, puede tener un efecto negativo sobre el sistema de medición de la red.

En forma análoga, la pérdida de una sola medición, puede ser denominada  $m - 1$ , concepto utilizado para hallar los índices descritos en el capítulo 2, en función del efecto que esta pérdida genera sobre la observabilidad total del sistema.

La combinación de topología reducida ocasionada por una  $n - 1$  en el sistema de transmisión, sumada a la pérdida sencilla de una medición,  $m - 1$ , da origen a la metodología propuesta que pretende evaluar las consecuencias de una contingencia sobre los índices que cuantifican la vulnerabilidad de la observabilidad.

Adicionalmente, con la metodología propuesta, se pretende evaluar la robustez integral de un SEP para soportar las contingencias  $n - 1$  de la red de transmisión considerando que todas las medidas tienen la misma probabilidad de falla. Esta robustez será definida en función de la probabilidad de ocurrencia de determinada contingencia, y sus efectos cuantificables sobre la observabilidad de la red incompleta. El índice de observabilidad global es propuesto para este propósito.

### **3.1 Generación de escenarios de cambios topológicos en la red de transmisión**

Los análisis tradicionales de confiabilidad y seguridad de un sistema de potencia generalmente consideran la contingencia sencilla  $n - 1$  en la red de transmisión con igual probabilidad de ocurrencia. Debido a los diferentes factores a los que está expuesto un SEP, la probabilidad de falla de las líneas de transmisión puede variar dependiendo de las condiciones topográficas, medio ambientales y climáticas del entorno.

La probabilidad de ocurrencia de contingencias en una red de transmisión ha sido abordada en la literatura desde tres enfoques principales: La tasa de falla de los equipos, las condiciones socio-políticas del entorno país, que se reflejan en los atentados

terroristas a la infraestructura eléctrica y condiciones climáticas adversas (descargas atmosféricas).

La *Tasa de falla* de una línea es parámetro que cuantifica el número de salidas no programadas con la información histórica disponible. En Colombia, por ejemplo, la probabilidad de falla de los equipos de la red de transmisión es definida a través de la disponibilidad esperada ( $D_0$ ) de los elementos que conforman el sub-sistema eléctrico, para una línea de transmisión, dicho subsistema está conformado por la línea y las respectivas bahías que la conectan al SEP.

Ésta probabilidad es calculada con los datos de salidas históricas en un periodo de 8760 horas (un año) con una ventana móvil semanal, de acuerdo con la siguiente expresión: (Resolución CREG 062 del 2000)

$$\text{Probabilidad de Falla} = 1 - D_0 = 1 - \frac{\int_0^{168} e^{-\alpha t^\beta} dt}{168} \quad (19)$$

Donde  $\alpha$  y  $\beta$  son parámetros de la distribución Weibull del tiempo transcurrido entre fallas.

La probabilidad de indisponibilidad de una línea debido a un acto mal intencionado en la infraestructura eléctrica, conocidos como AMI, ha sido modelada en la literatura considerando la zona de influencia geográfica del grupo terrorista. Para este fin se han usados planteamientos con redes Bayesianas. (Tranchita et al., 2006).

Para modelar a través de una función de probabilidad las condiciones climáticas adversas, principalmente descargas atmosféricas, a las que está sometido un sistema de potencia y que ocasionan la mayoría de las salidas no programadas de las líneas de transmisión, se ha usado la información suministrada por sistemas de monitoreo y posicionamiento geográfico. (Fei Xiao et al., 2006)

En este trabajo de investigación, para la probabilidad de ocurrencia de una contingencia sencilla  $n - 1$  en la red de transmisión, para efectos de exponer los resultados de la metodología, se usará una distribución de probabilidad descrita por la expresión (20).

$$P = X \quad (20)$$

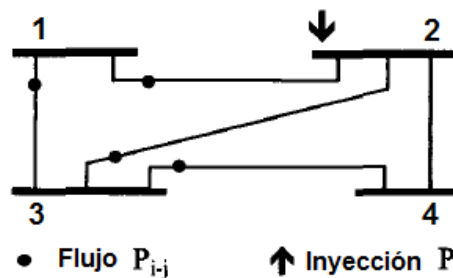
Donde:

$P$ : Es la probabilidad de falla

$X$ : Es una variable aleatoria con distribución uniforme con límites entre el 1% y el 5%

Con el objetivo de ilustrar los efectos sobre la cantidad de medidas críticas de un sistema de potencia bajo la indisponibilidad de una medida  $m - 1$  o bajo la indisponibilidad de una línea de transmisión  $n - 1$ , se presenta el caso de la Figura 3-1.

Se trata de un sistema IEEE 4 barras, conformado por 5 líneas de transmisión y un total de medidas  $m = 5$ , conformadas por 4 medidas de flujo de potencia activa y una medida de inyección de potencia activa.



**Figura 3-1:** Caso IEEE de 4 barras(Brown Do Coutto Filho et al., 2001)

La matriz  $H$  está dada por:

$$H = \begin{bmatrix} -1 & 3 & -1 & -1 \\ 1 & -1 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & -1 & 1 \\ 0 & -1 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & -1 \end{bmatrix}$$

El rango de la matriz  $H$  es igual a 3, el sistema es observable debido a que es posible asumir una referencia para uno de los ángulos a estimar.



Este sistema no tiene medidas críticas ( $C_{meas} = 0$ ) y tiene un conjunto de medidas críticas dado por  $C_{set1} = P_2$  y  $P_{3-4}$ .

### 3.1.1 Caso IEEE 4 barras con indisponibilidad de la medida $P_{1-2}$

Si consideramos la indisponibilidad de la medida  $P_{1-2}$ , la matriz  $H$  es modificada quedando de la siguiente manera.

$$H_{Indisponible\ P_{1-2}} = \begin{bmatrix} -1 & 3 & -1 & -1 \\ 1 & 0 & -1 & 0 \\ 0 & -1 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & -1 \end{bmatrix}$$

El sistema continúa siendo observable, debido a que el rango de  $H$  continúa siendo 3.

Con la indisponibilidad de la medida  $P_{1-2}$ , el sistema sigue sin tener medidas críticas ( $C_{meas} = 0$ ), pero ahora tiene un conjunto de medidas críticas conformado por todas las medidas disponibles, es decir,  $C_{set1} = P_{2-2}, P_{1-3}, P_{3-4}$  y  $P_{3-2}$ . En este caso el indicador  $MSV = 0\%$  y el indicador  $\beta = 100\%$ .

### 3.1.2 Caso IEEE 4 barras con indisponibilidad de la línea 1-2

Si consideramos la indisponibilidad de la línea 1-2, la matriz  $H$  es modificada quedando de la siguiente manera.

$$H_{Indisponible\ línea\ 1-2} = \begin{bmatrix} 0 & 2 & -1 & -1 \\ 1 & 0 & -1 & 0 \\ 0 & -1 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & -1 \end{bmatrix}$$

El sistema continúa siendo observable, debido a que el rango de  $H$  continúa siendo 3.

Considerando la indisponibilidad de la línea 1-2, el sistema tiene ahora una medida crítica  $C_{meas} = P_{1-3}$ , y tiene un conjunto de medidas críticas conformado por  $C_{set1} = P_{2-2}, P_{3-4}$  y  $P_{3-2}$ . En este caso el indicador  $MSV = 25\%$  y el indicador  $\beta = 75\%$ .

Es posible evidenciar que las contingencias sencillas  $n-1$ , modifican la conformación de medidas críticas y conjuntos de medidas críticas de un sistema de potencia. Serán

usados los indicadores expuestos en el capítulo 2 para cuantificar la vulnerabilidad del sistema de potencia bajo esta condición.

### **3.2 Definición del índice de vulnerabilidad de la observabilidad para sistemas de potencia**

La observabilidad es una cualidad importante de los sistemas de medición que proporciona información relevante de la capacidad de la red para ser estimada. Cuantificarla permite establecer, en forma objetiva, cuán crítica será la consecuencia de perder determinada medida o conjunto de medidas.

Sin embargo, la cuantificación de la observabilidad de la red no puede darse exclusivamente en función del sistema de medición, sino también debe satisfacer otros criterios de confiabilidad y seguridad establecidos para preservar la operación de la red. Estas condiciones han sido consideradas para el desarrollo de una metodología que permita satisfacer los dos criterios mencionados en el diseño, planeación y operación de los sistemas de potencia, la  $m-1$  en el sistema de medición y la  $n-1$  de la red de transmisión.

La metodología desarrollada cuantifica, ante la desconexión de líneas de transmisión, un índice de vulnerabilidad de la observabilidad que permite establecer cuán expuesto está el sistema de potencia a perder esta propiedad a partir de los índices expuestos en el capítulo 2, de la red con topología degradada.

Para establecer el índice de vulnerabilidad de la observabilidad de sistemas de potencia considerando cambios topológicos en la red de transmisión se seguirá la siguiente metodología:

- Se analizarán las expresiones matemáticas de los indicadores cuantificadores del riesgo de perder observabilidad planteados anteriormente. El indicador de *redundancia del sistema de medidas*  $\eta\%$ , no será tenido en cuenta en este análisis debido a que se trata de un indicador global, aplica solo para el caso base y a medida que se modifican los escenarios topológicos no tiene sentido su evaluación. Por otro lado debe tenerse en cuenta que para los casos donde el

sistema no tiene conjuntos críticos no es posible calcular el *índice de concentración de medidas en Conjuntos Críticos k*.

- Se determinará una expresión matemática que contenga los diferentes escenarios de contingencias  $n-1$  del sistema de potencia y que pueda evaluar la robustez de la observabilidad del sistema de potencia frente a esta condición.
- Se dará más peso a la cuantificación de medidas críticas ( $N_{C_{meas}}$ ) en los escenarios de cambios topológicos que la cantidad de medidas que hacen parte de los conjuntos críticos ( $M_{C_{sets}}$ ). Esto debido a que ocasionan un riesgo inminente de no observabilidad en el sistema ante la contingencia  $m-1$  de las medidas.
- Se analizarán en un caso de prueba los resultados del índice propuesto y se estudiarán diferentes sistemas de medición sobre el mismo caso con el objetivo de observar la evaluación del índice planteado.

Para el índice de vulnerabilidad de la observabilidad se tienen las propuestas que detallan a continuación.

### 3.3 Índice de Vulnerabilidad de la observabilidad $IVO_1$

Para cuantificar la vulnerabilidad de la observabilidad se propone el índice  $IVO_1$  en el cual se considera la probabilidad de tener una contingencia en la red ( $n-1$ ) más la probabilidad de tener una contingencia en las medidas ( $m-1$ ).

Este índice puede calcularse con la siguiente ecuación:

$$IVO_1\% = \frac{N_{C_{meas}CASOBASE}}{m} + \sum_{n=1}^l \frac{N_{C_{emasn}}}{m} * P_n \quad (21)$$

Donde:

- $l$  : Total de líneas del sistema.
- $n$  : Determinada contingencia del total de contingencias del sistema.
- $P_n$  : Probabilidad de ocurrencia de la contingencia  $n$ .

$N_{C_{meas} \text{ CASO BASE}}$  : Probabilidad de tener el sistema no observable ante la contingencia en una medida para el caso base. (Índice MSV).

$N_{C_{meas} n}$  : Probabilidad de tener el sistema no observable ante la contingencia en una medida para cada escenario de contingencia  $n-1$ .

### 3.4 Índice de Vulnerabilidad de la observabilidad $IVO_2$

Para evaluar la vulnerabilidad del sistema ante la nueva presencia de medidas críticas con los nuevos escenarios topológicos, se propone el índice  $IVO_2$ , el cual puede ser calculado a través de la ecuación (22).

$$IVO_2\% = \sum_{n=1}^l P_n * f_{c_m} \quad (22)$$

$$f_{c_m} = \begin{cases} 1 \rightarrow C_{meas \text{ base}} < C_{meas \text{ contingencia } n} \\ 0 \rightarrow C_{meas \text{ base}} > C_{meas \text{ contingencia } n} \end{cases}$$

Donde:

$l$  : Total de líneas del sistema.

$n$  : Determinada contingencia del total de contingencias del sistema.

$P_n$  : Probabilidad de ocurrencia de la contingencia  $n$ .

### 3.5 Índice de Vulnerabilidad de la observabilidad $IVO_3$

Para evaluar la vulnerabilidad del sistema ante el aumento del número de medidas que hacen parte de los conjuntos críticos con cada contingencia, se propone el índice  $IVO_3$  mostrado en la ecuación (23).

$$IVO_{3 \beta > 60\%}\% = \sum_{n=1}^l P_n * g_{\beta} \quad (23)$$

$$g_{\beta} = \begin{cases} 1 \rightarrow \beta > 60\% \\ 0 \rightarrow 0 < \beta \leq 60\% \end{cases}$$

Donde:

$l$  : Total de líneas del sistema.

$n$  : Determinada contingencia del total de contingencias del sistema.

$P_n$  : Probabilidad de ocurrencia de la contingencia  $n$ .

$\beta$  : Índice de *Ocurrencia de nuevas medidas críticas*  $C_{meas}$  en el sistema ante la contingencia  $m-1$  en las medidas.

El indicador puede ser calculado para diferentes valores de  $\beta$  y finalmente obtener una distribución de probabilidad.

### 3.6 Índice de Vulnerabilidad de la observabilidad $IVO_4$

El índice  $IVO_4$  evalúa la vulnerabilidad global del sistema a perder observabilidad considerando contingencias en la red de transmisión combinado con la pérdida de una medida en el sistema, a través de las medidas críticas generadas con cada escenario de cambio topológico. El índice está dado por la ecuación (24)

$$IVO_4\% = \sum_{n=1}^l \frac{N_{C_{meas\ n}}}{m_n} * P_n \quad (24)$$

Donde:

$l$  : Total de líneas del sistema.

$n$  : Determinada contingencia del total de contingencias del sistema.

$m_n$  : Total de medidas del sistema después de la contingencia  $n$ .

$P_n$  : Probabilidad de ocurrencia de la contingencia  $n$ .

$N_{C_{meas\ n}}$  : Cantidad de medidas críticas del sistema ante la contingencia  $n$ .

### 3.7 Índice de Vulnerabilidad de la observabilidad $IVO_5$

El índice  $IVO_5$  evalúa la vulnerabilidad global del sistema a perder observabilidad considerando contingencias en la red de transmisión combinado con la pérdida de una medida en el sistema, a través de las medidas críticas generadas con cada escenario de cambio topológico. El índice está dado por la ecuación (25).

$$IVO_5\% = \sum_{n=1}^l \frac{M_{Csets\ n}}{m_n} * P_n \quad (25)$$

Donde:

$l$  : Total de líneas del sistema.

$n$  : Determinada contingencia del total de contingencias del sistema.

$m_n$  : Total de medidas del sistema después de la contingencia  $n$ .

$P_n$  : Probabilidad de ocurrencia de la contingencia  $n$ .

$M_{C_{sets} n}$  : Cantidad de medidas en los conjuntos críticos del sistema ante la contingencia  $n$ .

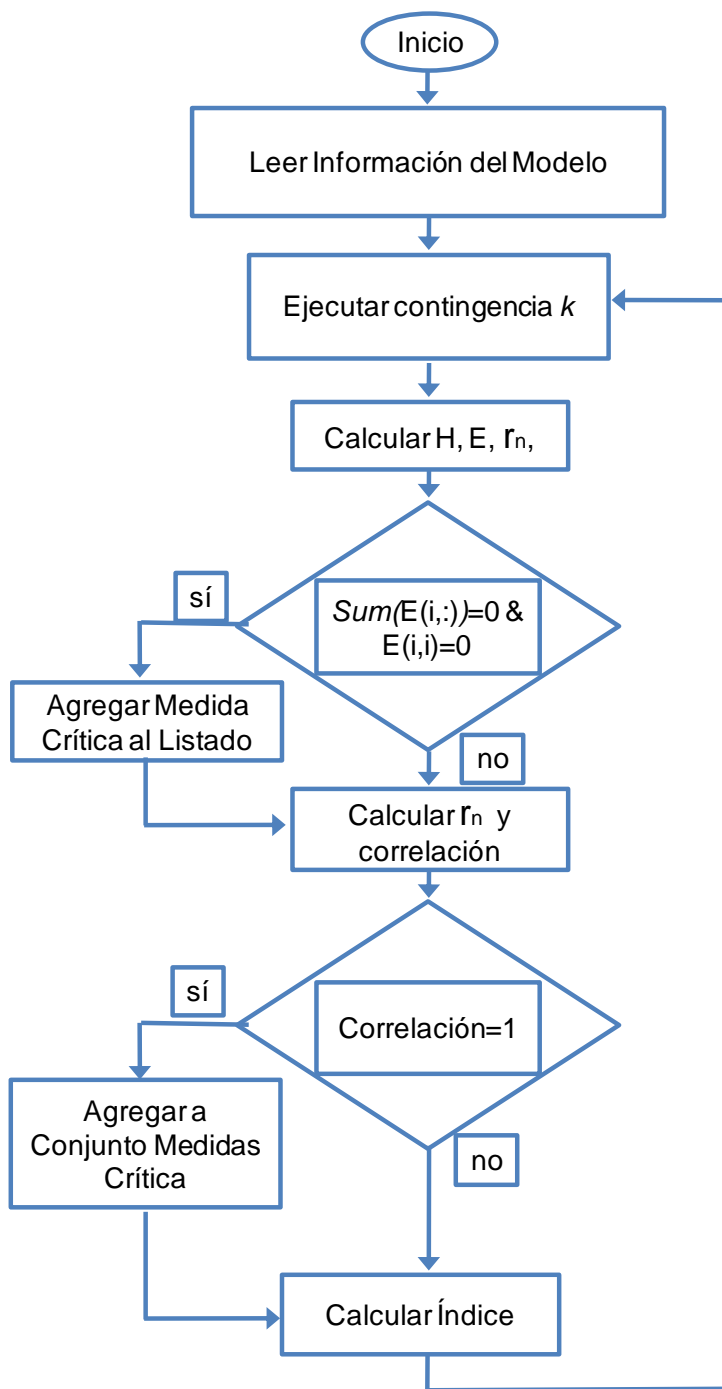
### 3.8 Descripción de la metodología propuesta

Debido a que el objetivo es cuantificar la observabilidad de un sistema de potencia, la metodología es útil para sistemas observables y es aplicable a sistemas altamente enmallados donde la contingencia  $n-1$  no afectaría esta propiedad.

La contingencia de una línea radial ocasionaría que dicha barra quedará desconectada del resto de la red, por tanto a pesar de que el sistema de potencia dejaría de ser observable porque no se tendría información para estimar dicha barra, la metodología continuaría siendo aplicable para el resto del sistema de potencia que queda energizado.

En la figura 3-2 se presenta el diagrama de flujo de la metodología propuesta para evaluar vulnerabilidad de la observabilidad en sistemas de potencia considerando cambios topológicos en la red de transmisión.

La metodología inicia calculando para la red degradada con una contingencia de una línea a la vez, el número de medidas críticas, los números de conjuntos críticos, las medidas que los conforman, el total de medidas del sistema y los índices MSV y  $\beta$ . Luego se calcula el índice que evalúa la vulnerabilidad de la observabilidad del sistema cuando es sometido a cambios topológicos en la red de transmisión y se presentan los resultados.



**Figura 3-2:** Diagrama de flujo para cuantificar observabilidad en sistemas eléctricos de potencia

## 4. Análisis de resultados

En este capítulo se presentan los resultados obtenidos con la metodología planteada anteriormente para evaluar la vulnerabilidad de la observabilidad de un sistema de potencia considerando cambios topológicos. Se comparan diferentes sistemas de medición sobre dos casos de prueba: IEEE 4 barras y IEEE 14 barras, lo cual permite determinar la evolución de los índices propuestos.

Para la presentación de los resultados a través de Matlab®, se adoptó la siguiente convección:

$i - i$ : Medición de Inyección de potencia en la barra  $i$

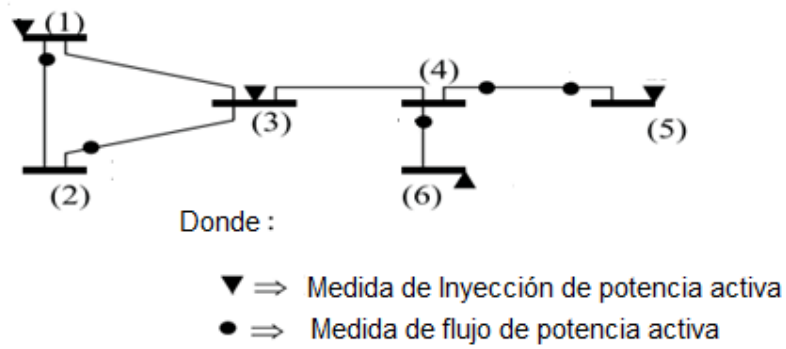
$i - j$ : Medición de flujo de potencia de la barra  $i$  a la barra  $j$

Los cambios topológicos en la red de transmisión considerados serán las  $n - 1$  con diferente probabilidad de ocurrencia generada a partir de la ecuación (20).

### 4.1 Caso IEEE 6 barras

En la Figura 4-1 se presenta el sistema de prueba IEEE 6 barras. Este sistema cuenta con 6 líneas y un total de 9 medidas: 5 medidas de flujo de potencia y 4 medidas de inyección de potencia.





**Figura 4-1:** Caso IEEE de 6 barras(London et al., 2007)

La matriz de mediciones  $H$  y el vector de medidas, están dados por:

$$z = \begin{bmatrix} P_1 \\ P_3 \\ P_5 \\ P_6 \\ P_{1-2} \\ P_{2-3} \\ P_{4-5} \\ P_{4-6} \\ P_{5-4} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 \\ 1 \\ 1 \\ 1 \\ 1 \\ 1 \\ 1 \\ 1 \\ 1 \end{bmatrix}; \quad H = \begin{bmatrix} 2 & -1 & -1 & 0 & 0 & 0 \\ -1 & -1 & 3 & -1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \\ 1 & -1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 1 & -1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & -1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & -1 \\ 0 & 0 & 0 & -1 & 1 & 0 \end{bmatrix}$$

El rango de  $H$  es igual 5, por tanto, asumiendo un ángulo de referencia, el sistema es observable.

El análisis de medidas críticas da como resultado una medida crítica  $C_{meas} = P_3$  y dos conjuntos de medidas críticas  $C_{set1} = P_1, P_{1-2}, P_{2-3}$  y  $C_{set2} = P_6, P_{4-6}$

Las ecuaciones matemáticas que describen el modelo, asumiendo que todas las susceptancias por las líneas son igual a 1, están dadas por las expresiones:

$$\theta_3 - \theta_2 = P_{2-3} \quad (26)$$

$$\theta_2 - \theta_1 = P_{1-2} \Rightarrow \theta_2 = P_{1-2} \quad (27)$$

$$P_{1-1} = P_{1-2} + P_{1-3} = \theta_2 - \theta_1 + \theta_3 - \theta_1 \Rightarrow \theta_3 + \theta_2 = P_{1-1} \quad (28)$$

$$P_{3-3} = -P_{1-3} + P_{3-4} - P_{2-3} \Rightarrow \theta_3 = \theta_2 - P_{3-3} - \theta_4 \quad (29)$$

$$P_{5-5} = -P_{5-4} = P_{4-5} \quad (30)$$

$$P_{6-6} = P_{4-6} \quad (31)$$

Se tiene un sistema de 6 ecuaciones y 5 incógnitas (ángulos en las barras), debido a que es posible asumir un ángulo de referencia, generalmente  $\theta_1$ . Las variables resaltadas en negrilla son las variables a estimar.

Las barras 5 y 6 están conectadas radialmente al sistema, sin embargo cuentan con medidas de inyección de potencia y adicionalmente medidas de flujo de potencia de las líneas conectadas a esas barras. De las ecuaciones (30) y (31) se observa que la pérdida de una de éstas medidas por vez, no impediría que se pudieran estimar  $\theta_5$  y  $\theta_6$ , por tanto las medidas  $P_{6-6}$ ,  $P_{4-6}$ ,  $P_{5-5}$ ,  $P_{4-5}$  y  $P_{5-4}$  no son medidas críticas del sistema.

La medida  $P_{3-3}$  es una medida crítica debido a que de la ecuación (29) se concluye que no contar con dicha medida ocasiona que no pueda estimarse  $\theta_4$  con las ecuaciones restantes.

Adicionalmente se resalta que para la metodología propuesta este sistema no es conveniente considerando que la mayoría de contingencias del sistema: línea 3-4, línea 4-5 y línea 4-6 convierten el sistema en no observable, haciendo necesaria la estimación de estado por islas.

## **4.2 Vulnerabilidad de la observabilidad para el caso de IEEE 4 barras considerando cambios topológicos en la red transmisión**

Retomando el caso IEEE 4 barras mostrado en la Figura 3-1, se presentan en la Tabla 4-1 los resultados obtenidos con la metodología propuesta. Este sistema cuenta con un total de 5 líneas de transmisión y un número de medidas  $m = 5$ .

Se llama caso base al escenario sin contingencias. El término NA mostrado en las tablas es usado cuando no aplica el cálculo del índice.

Con el índice  $IVO_1\%$  se observa que el sistema pasa de 0% a 2.4% cuando se hace el análisis de contingencias en el sistema. El índice  $IVO_4\%$  tiene el mismo valor debido a que el caso base no tiene medidas críticas.

Con el índice  $IVO_2\%$  se evalúa la vulnerabilidad de la observabilidad considerando la presencia de medidas críticas adicionales a las del caso base con cada escenario de topología.

**Tabla 4-1:** Resultados caso IEEE 4 barras. Caso Base

Índices	Caso Base	Línea 1-2	Línea 1-3	Línea 2-3	Línea 2-4	Línea 3-4
<b>Rango de H</b>	3	3	3	3	3	3
<b>Medidas críticas</b>	NO	1-3	NO	NO	3-4	2-2
<b>Conformación de Conjuntos de Medidas Críticas</b>	2-2 3-4	3-4 3-2 2-2	3-4 3-2 2-2 1-2	3-4 2-2 1-3 1-2	NO	1-2 3-2 1-3
<b>Total medidas m</b>	5	4	4	4	5	4
<b>Número de medidas críticas</b>	0	1	0	0	1	1
<b>Número de conjuntos</b>	1	1	1	1	0	1
<b>Medidas en los Conjuntos</b>	2	3	4	4	0	3
<b>MSV %</b>	0	25	0	0	20	25
<b><math>\beta</math> %</b>	40	75	100	100	0	75
<b>k %</b>	40	75	100	100	NA	75
<b><math>P_n</math> %</b>	NA	3	4	3	2	5
<b><math>IVO_1\%</math></b>	2.4					
<b><math>IVO_2\%</math></b>	10					
<b><math>IVO_{3\beta&gt;30}\%</math></b>	15					
<b><math>IVO_4\%</math></b>	2.4					
<b><math>IVO_5\%</math></b>	13					

Para ilustrar la evolución de los índices de vulnerabilidad de observabilidad del sistema de potencia se modifica la conformación del sistema de medidas del caso, adicionando una medida de flujo de potencia  $P_{2-4}$  en la línea 2-4. Los resultados son presentados en la Tabla 4-2.

En este caso se logra disminuir la vulnerabilidad de la observabilidad del sistema, se observa que todos los índices disminuyen. Los índices que son calculados con los conjuntos de medidas críticas del sistema son los que presentan mayor disminución.

En la Tabla 4-3 se presenta la evolución de los índices cuando se pierde la medida  $P_{1-2}$ .

Tabla 4-2: Resultados caso IEEE 4 barras con adicción de la medida  $P_{2-4}$ .

Índices	Caso Base	Línea1-2	Línea 1-3	Línea 2-3	Línea 2-4	Línea 3-4
Rango de H	3	3	3	3	3	3
Medidas críticas	NO	1-3	NO	NO	3-4	NO
Total medidas m	6	5	5	5	5	5
Número de medidas críticas	0	1	0	0	1	0
Número de Conjuntos	0	0	1	1	0	1
Medidas en los Conjuntos	0	0	2	2	0	2
MSV %	0	20	0	0	20	0
$\beta$ %	0	0	40	40	0	40
$k$ %	0	NA	40	40	NA	40
$P_n$ %	NA	3	4	3	2	5
$IVO_1$ %	1					
$IVO_2$ %	5					
$IVO_{3\beta>30}$ %	12					
$IVO_4$ %	1					
$IVO_5$ %	4.8					

Tabla 4-3: Resultados caso IEEE 4 barras con pérdida de la medida  $P_{1-2}$ .

Índices	Caso Base	Línea1-2	Línea 1-3	Línea 2-3	Línea 2-4	Línea 3-4
Rango de H	3	3	3	3	3	3
Medidas críticas	NO	1-3	2-2 3-2 3-4	2-2 1-3 3-4	3-4	2-2 1-3 3-2
Total medidas m	4	4	3	3	4	3
Número de medidas críticas	0	1	3	3	1	3
Número de Conjuntos	0	1	0	0	1	0
Medidas en los Conjuntos	0	3	0	0	3	0
MSV %	0	25	100	100	25	100
$\beta$ %	100	75	0	0	75	0
$k$ %	100	75	NA	NA	75	NA
$P_n$ %	NA	3	4	3	2	5
$IVO_1$ %	13.25					
$IVO_2$ %	17					
$IVO_{3\beta>30}$ %	5					
$IVO_4$ %	13.25					
$IVO_5$ %	3.75					

De la Tabla 4-3 se observa que con la pérdida de la medida  $P_{1-2}$ , se generan mayor número de medidas críticas con los cambios topológicos que en el caso base, presentando mayor vulnerabilidad de la observabilidad.

En la Tabla 4-4 se muestran los resultados cuando se pierde la medida  $P_{3-2}$ . Se observa que la ubicación de las medidas afecta la observabilidad del sistema, los indicadores se ven afectados de manera específica cuando se pierde una u otra medida.

**Tabla 4-4:** Resultados caso IEEE 4 barras con pérdida de la medida  $P_{3-2}$ .

Índices	Caso Base	Línea 1-2	Línea 1-3	Línea 2-3	Línea 2-4	Línea 3-4
Rango de H	3	3	3	3	3	3
Medidas críticas	NO	2-2 1-3 3-4	2-2 1-2 3-4	NO	3-4	2-2 1-2 1-3
Total medidas m	4	3	3	4	4	3
Número de medidas críticas	0	3	3	0	1	3
Número de Conjuntos	0	0	0	1	1	0
Medidas en los Conjuntos	0	0	0	4	3	0
MSV %	0	100	100	0	25	100
$\beta$ %	100	0	0	100	75	0
$k$ %	100	NA	NA	100	75	NA
$P_n$ %	NA	3	4	3	2	5
$IVO_1$ %	12.5					
$IVO_2$ %	14					
$IVO_{3\beta>30}$ %	5					
$IVO_4$ %	12.5					
$IVO_5$ %	4.5					

Los índices que son calculados considerando las medidas críticas son complementarios con los índices que consideran los conjuntos de medidas críticas y por tanto no deben interpretarse por separado.

Mientras los índices  $IVO_1$  % y  $IVO_4$  % consideran el riesgo de perder observabilidad ante la contingencia  $m-1$  en las medidas combinada con la probabilidad de ocurrencia de una contingencia en la red de transmisión, los índices  $IVO_3$  % y  $IVO_5$  % evalúan el riesgo de perder observabilidad después de ocurrida dicha contingencia en el sistema de medición.

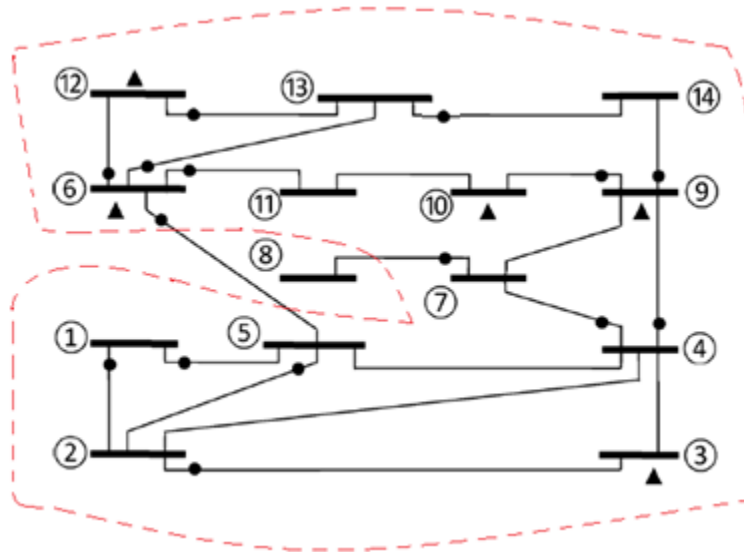
En la Tabla 4-5 se muestra un resumen de los resultados obtenidos para el caso IEEE 4 barras para diferentes sistemas de medición donde se puede observar la evolución de los indicadores propuestos para evaluar la vulnerabilidad de la observabilidad en el sistema.

**Tabla 4-5:** Resumen de resultados caso IEEE 4 barras

Índices	IEEE 4 Barras	IEEE 4 Barras más $P_{2-4}$	IEEE 4 Barras menos $P_{1-2}$	IEEE 4 Barras menos $P_{3-2}$
$IVO_1\%$	2.4	1	13.25	12.5
$IVO_2\%$	10	5	17	14
$IVO_{3\beta > 30\%}$	15	12	5	5
$IVO_4\%$	2.4	1	13.25	12.5
$IVO_5\%$	13	4.8	3.75	4.5

### 4.3 Caso IEEE 14 barras

En la Figura 4-3 se presenta el caso IEEE de 14 barras. Este sistema cuenta con 20 medidas en total compuestas por 5 inyecciones de potencia en barras y 15 medidas de flujo de potencia por las líneas. Está conformado además por 20 líneas.



**Figura 4-2:** Caso IEEE de 14 barras

En el caso base el rango de la matriz H es 13. El sistema es observable debido a que se asume uno de los ángulos como referencia y por tanto solo es necesario estimar 13 ángulos en las barras.

Este sistema cuenta con una medida crítica  $C_{meas} = P_{7-8}$  y tres conjuntos de medidas críticas  $C_{set1} = P_{9-9}, P_{9-14}, P_{4-7}$ ;  $C_{set2} = P_{1-2}, P_{1-5}$  y  $C_{set3} = P_{2-3}, P_{3-3}, P_{10-10}$

La contingencia radial de la línea 7-8, ocasiona que la barra 8 quede aislada del resto del sistema. Adicionalmente contiene la única medida crítica del sistema ( $C_{meas} = P_{7-8}$ ). De la teoría anteriormente expuesta, el caso de análisis se vuelve no observable, debido a que la matriz H pierde rango. Sin embargo, considerando que se están evaluando contingencias, esta barra quedaría aislada del resto del sistema, el sistema queda dividido en dos zonas: una  $zona_1$  conformada por la barra 8 que se encuentra aislada y la otra zona ( $zona_2$ ), está conformada por el resto del sistema. Cuando ocurre esta contingencia los indicadores propuestos se calculan únicamente para  $zona_2$ .

En la Tablas 4-6 se presentan los resultados obtenidos para el caso IEEE 14 barras y en la Tabla 4-7 se muestran los resultados obtenidos adicionando la medida  $P_{7-8}$  al sistema.

De los resultados expuestos en la Tabla 4-6 se observa que el riesgo de tener el sistema no observable ante la pérdida de una medida (MSV) es 5%. Este riesgo aumenta ante la probabilidad combinada de contingencias en la red de transmisión a un valor de 7.25% ( $IVO_1\%$ ).

El índice  $IVO_2\%$  es igual a 41%, porque con cada contingencia del sistema se generan medidas críticas adicionales al caso base (sin contingencias), aumentando el riesgo de perder observabilidad.

Por otro lado, el número de medidas en los conjuntos críticos se ve afectado cuando se consideran los cambios topológicos, ya que en 15 de los 20 escenarios posibles el índice  $\beta\%$  es mayor a 30%, valor del caso base. Esto implica que el índice  $IVO_3\%$  sea igual a 64%.

Tabla 4-6: Resultados caso IEEE 14 barras

Índices	Caso Base	Contingencias en las líneas																			
	nodo i	1	1	2	2	2	3	4	4	4	5	6	6	6	7	7	9	9	10	12	13
	nodo j	2	5	3	4	5	4	5	7	9	6	11	12	13	8	9	10	14	11	13	14
Rango de H	13	13	13	13	13	13	13	13	13	13	13	13	13	13	12	13	13	13	13	13	13
Total medidas m	20	19	19	19	20	19	20	20	19	19	19	19	19	19	19	20	19	19	20	19	19
Numero de medidas críticas	1	2	2	2	1	1	1	1	2	1	3	2	1	1	0	2	2	2	1	1	1
Número de conjuntos	3	2	2	4	3	2	5	3	4	2	3	3	3	3	3	2	4	3	4	3	3
Medidas en los Conjuntos	6	5	5	10	6	6	12	6	9	6	8	8	6	6	6	4	9	7	9	6	8
MSV %	5	11	11	11	5	5	5	5	11	5	16	11	5	5	0	10	11	11	5	5	5
$\beta$ %	30	26	26	53	30	32	60	30	47	32	42	42	32	32	32	20	47	37	45	32	42
$k$ %	10	13	13	13	10	16	12	10	12	16	14	14	11	11	11	10	12	12	11	11	14
$P_n$ %	5	3	4	3	3	5	4	5	7	7	5	3	2	4	4	6	7	3	3	4	3
$IVO_1$ %	7.25																				
$IVO_2$ %	41																				
$IVO_{3\beta>30}$ %	64																				
$IVO_4$ %	6.61																				
$IVO_5$ %	31.35																				

Tabla 4-7: Resultados caso IEEE 14 barras adicionando la medida  $P_{7-8}$

Índices	Caso Base	Contingencias en las líneas																			
	nodo i	1	1	2	2	2	3	4	4	4	5	6	6	6	7	7	9	9	10	12	13
	nodo j	2	5	3	4	5	4	5	7	9	6	11	12	13	8	9	10	14	11	13	14
Rango de H	13	13	13	13	13	13	13	13	13	13	13	13	13	13	12	13	13	13	13	13	13
Total medidas m	21	20	20	20	21	20	21	21	20	20	20	20	20	20	19	21	20	20	21	20	20
Numero de medidas críticas	0	1	1	1	0	0	0	0	1	0	2	1	0	0	0	1	1	1	0	0	0
Número de conjuntos	4	3	3	5	4	3	5	4	5	3	4	4	4	4	3	3	5	4	5	4	4
Medidas en los Conjuntos	8	7	7	12	8	8	14	8	11	8	10	10	8	8	6	6	11	9	11	8	10
MSV %	0	5	5	5	0	0	0	0	5	0	10	5	0	0	0	5	5	5	0	0	0
$\beta$ %	38	35	35	60	38	40	67	38	55	40	50	50	40	40	32	29	55	45	52	40	50
$k$ %	10	12	12	12	10	13	13	10	11	13	13	13	10	10	11	10	11	11	10	10	13
$P_n$ %	5	3	4	3	3	5	4	5	7	7	5	3	2	4	4	6	7	3	3	4	3
$IVO_1$ %	2.29																				
$IVO_2$ %	5																				
$IVO_{3\beta>38}$ %	41																				
$IVO_4$ %	2.29																				
$IVO_5$ %	60																				



Adicionando la medida  $P_{7-8}$ , la cual es una medida crítica común en varios escenarios de contingencias, el riesgo de no observabilidad dada la condición de perder una medida pasa de 0% en el caso base (sin contingencias en las líneas), a 2.29% (Ver Tabla 4-7), dado que la mitad de los escenarios posibles con las contingencias no tiene medidas críticas.

Sin embargo la conformación de conjuntos críticos se ve afectada en 14 de los 20 escenarios posibles, presentando un mayor número de medidas que pertenecen a conjuntos críticos que el caso sin contingencia. (Índice  $IVO_5\%=60$ )

Puede establecerse una escala del riesgo para comparar diferentes sistemas de medición en la etapa diseño. En la literatura se presenta por ejemplo (Brown Do Coutto Filho et al., 2013):

**Tabla 4-8:** Escala de valoración del riesgo

<b>Grado</b>	<b>Descripción</b>	<b>Rango (%)</b>
A	Muy bajo	0-10
B	Bajo	11-20
C	Moderado	21-30
D	Alto	31-50
E	Muy Alto	>50



## 5. Conclusiones y recomendaciones

### 5.1 Conclusiones

En este trabajo se propone una metodología para establecer un índice que permite evaluar la vulnerabilidad de la observabilidad en sistemas de potencia considerando cambios topológicos en la red de transmisión. Para la inclusión de la probabilidad de ocurrencia de las contingencias se utilizó una función de probabilidad uniforme. La evaluación del riesgo de no observabilidad en el sistema se hizo considerando la contingencia  $m-1$  en el sistema de medidas, donde todas las medidas tenían la misma probabilidad de estar indisponibles.

Los análisis tradicionales de observabilidad arrojan la respuesta de si el sistema es o no observable. Sin embargo, es posible cuantificar la observabilidad de un sistema de potencia por medio de las *medidas críticas* y los *conjuntos de medidas críticas*. La presencia de este tipo de medidas depende de la cantidad de medidas, el tipo de medidas y adicionalmente la topología de la red.

Los resultados obtenidos fueron validados en dos casos de prueba: IEEE 4 barras y IEEE 14 barras para diferentes escenarios de medición, los cuales se obtuvieron adicionando o eliminando medidas. Para todos los casos índices propuestos muestran resultados esperados: disminución del índice de vulnerabilidad de observabilidad cuando se adicionan medidas al sistema y aumento del índice cuando se pierden medidas.

Debe darse más peso a los índices de vulnerabilidad de observabilidad  $IVO_1\%$ ,  $IVO_2\%$  y  $IVO_4\%$ . Los cuales fueron propuestos considerando la presencia de medidas críticas en el sistema. Estos índices cuantifican el riesgo de perder una medida de este tipo, lo cual ocasionaría que el riesgo de no observabilidad fuera inminente.

## 5.2 Trabajos futuros

Tras desarrollar una metodología para cuantificar la observabilidad de un sistema de potencia considerando contingencias en líneas de transmisión, es posible identificar aspectos que pueden ser incorporados a futuro.

La metodología planteada asume barras sencillas como nodos de conexión de los extremos de las líneas de transmisión. Sin embargo, es posible estudiar, cómo las medidas de otras configuraciones de subestaciones con mayor complejidad, pueda afectar el planteamiento del problema.

El auge de nuevas tecnologías de monitoreo, como las unidades de medición fasorial, PMU, proporcionan medidas adicionales que también pueden ser incorporadas a la matriz  $H$ , para cuantificar una observabilidad integral, que considere todos los sistemas de medición.

La demanda de energía no es considerada en los análisis de observabilidad, solo las inyecciones de energía de las unidades de generación. No obstante, es posible estudiar la inclusión de esta información en la metodología y la manera en la que puedan ser modeladas.

Los índices estudiados en el desarrollo del presente trabajo pueden ser utilizados como criterios de selección de ubicación óptima de unidades medición, garantizando la mejor observabilidad del sistema, ante degradación topológica.

Otra aplicación puede ser fundamentada en el uso de estos índices como criterio de selección de contingencias para evaluar la severidad al sistema de medición de una  $n-1$  en las líneas de transmisión.

---

Posibles aplicaciones de indicadores para tiempo real pueden ser exploradas a partir de la teoría desarrollada, haciendo uso de la cuantificación de observabilidad, para dar señales tempranas al operador de la posible vulnerabilidad del sistema.

El uso de índices que consideran la  $m-k$ , o sea la pérdida simultánea de más de una medida, puede ser de utilidad al conocer en detalle la infraestructura física de la red. En países como Colombia, en que las torres de transmisión eléctrica soportan enlaces de comunicaciones de gran capacidad que llevan información de las RTU y PMU a los centro de control, una contingencia sencilla de línea puede representar pérdida de más de una medida a la vez. Una metodología que considere esta situación de riesgo puede ser desarrollada a partir de la teoría revisada en el documento.

La presente propuesta puede ampliarse a las  $n-k$ , cuantificando el posible efecto sobre la observabilidad de perder más de una línea a la vez, al considerar la probabilidad de desconexión de un conjunto de elementos de red. De igual forma, puede ser extendida para considerar la salida de línea de generadores, con el propósito de medir el efecto de este tipo de eventos sobre el sistema de medición.

La función de probabilidad de desconexión de líneas de transmisión puede ser vinculada a cualquier tipo de fenómeno que ocasione eventos de esta índole. Esta temática puede ser abarcada con profundidad para desarrollar metodologías que incluya nueva información a la planeación de los sistemas de medición.



## Bibliografía

- Ali Abur, Exposito Gómez, 2004. Power Systems State Estimation: Theory and Implementation. Marcel Dekker, inc.
- Balu, N., Bertram, T., Bose, A., Brandwajn, V., Cauley, G., Curtice, D., Fouad, A., Fink, L., Lauby, M.G., Wollenberg, B.F., Wrubel, J.N., 1992. On-line power system security analysis. Proc. IEEE 80, 262–282. doi:10.1109/5.123296
- Blood, E.A., Krogh, B.H., Ilic, M.D., 2008. Electric power system static state estimation through Kalman filtering and load forecasting, in: 2008 IEEE Power and Energy Society General Meeting - Conversion and Delivery of Electrical Energy in the 21st Century. Presented at the 2008 IEEE Power and Energy Society General Meeting - Conversion and Delivery of Electrical Energy in the 21st Century, pp. 1–6. doi:10.1109/PES.2008.4596742
- Bretas, N.G., London, J., J.B.A, Alberto, L.F.C., Bretas, A., 2005. A topological approach to the identification of critical measurements in power-system state estimation. IEEE Trans. Circuits Syst. Regul.Pap. 52, 139–147. doi:10.1109/TCSI.2004.838543
- Brown Do CouttoFilho, M., de Souza, J.S., de Oliveira, F.M.F., Schilling, M.T., 2001. Identifying critical measurements & sets for power system state estimation, in: Power Tech Proceedings, 2001 IEEE Porto. IEEE, p. 6–pp.
- Brown Do CouttoFilho, M., Stacchini de Souza, J.C., Villavicencio Tafur, J.E., 2013. Quantifying Observability in State Estimation. IEEE Trans. Power Syst. 28, 2897–2906. doi:10.1109/TPWRS.2013.2241459
- Brown Do CouttoFilho, M, Stacchini de Souza, J.C, Schilling, M.T., 2007. Handling Critical Data and Observability. Electr. Power Components Syst. 35, 553–573.
- Clements, K.A., Davis, P.W., 1988. Detection and identification of topology errors in electric power systems. Power Syst. IEEE Trans. 3, 1748–1753. doi:10.1109/59.192991
- Do CouttoFilho, M.B., de Souza, J.C.S., Tafur, J.E.V., 2009. Indicators of critical conditions for state estimation, in: Power & Energy Society General Meeting, 2009. PES'09. IEEE. IEEE, pp. 1–6.
- Fei Xiao, McCalley, J.D., Ou, Y., Adams, J., Myers, S., 2006. Contingency Probability Estimation Using Weather and Geographical Data for On-Line Security Assessment. Probabilistic Methods Appl. Power Syst. 2006 PMAPS 2006 Int. Conf. 1–7. doi:10.1109/PMAPS.2006.360410
- Gol, M., Abur, A., 2013. Identifying vulnerabilities of state estimators against cyber-attacks. PowerTechPOWERTECH 2013 IEEE Grenoble 1–4. doi:10.1109/PTC.2013.6652124
- Gol, M., Abur, A., Galvan, F., 2012. Metrics for Success: Performance Metrics for Power System State Estimators and Measurement Designs. IEEE Power Energy Mag. 10, 50–57. doi:10.1109/MPE.2012.2205315

- Gou, B., Abur, A., 2000. A direct numerical method for observability analysis. *Power Syst. IEEE Trans.* 15, 625–630.
- Greyson, K.A., Oonsivilai, A., 2009. Identification of critical measurements in the power system network. *Power Syst. Conf. Expo. 2009 PSCE 09 IEEE PES* 1–6. doi:10.1109/PSCE.2009.4840210
- Jian Chen, Abur, A., 2008. Enhanced Topology Error Processing via Optimal Measurement Design. *Power Syst. IEEE Trans.* 23, 845–852. doi:10.1109/TPWRS.2008.926083
- London, J.B.A., Alberto, L.F.C., Bretas, N.G., 2000. Network observability: a fast topological approach to identify critical measurements. *Power Syst. Technol. 2000 Proc. PowerCon 2000 Int. Conf.* 2, 583–588 vol.2. doi:10.1109/ICPST.2000.897088
- London, J.B.A., Alberto, L.F.C., Bretas, N.G., 2007. Analysis of measurement-set qualitative characteristics for state-estimation purposes. *IET Gener. Transm. Distrib.* 1, 39. doi:10.1049/iet-gtd:20050171
- Monticelli, A., Wu, F.F., 1985. Network Observability: Theory. *IEEE Power Eng. Rev. PER-5*, 32–33. doi:10.1109/MPER.1985.5526568
- Powalko, M., Orths, A.G., Abildgaard, H., Eriksen, P.B., Rudion, K., Golub, I.I., Voropai, N.I., 2012. System observability indices for optimal placement of PMU measurements. *Power Energy Soc. Gen. Meet. 2012 IEEE* 1–6. doi:10.1109/PESGM.2012.6344754
- Sou, K.C., Sandberg, H., Johansson, K.H., 2012. Computing critical-tuples in power networks. *Power Syst. IEEE Trans.* 27, 1511–1520.
- Tranchita, C., Hadjsaid, N., Torres, A., 2006. Ranking Contingency Resulting from Terrorism by Utilization of Bayesian Networks. *Electrotech. Conf. 2006 MELECON 2006 IEEE Mediterr.* 964–967. doi:10.1109/MELCON.2006.1653259