

Ubicación optimizada de sincrofasores en áreas de corte para la implementación de protecciones de área amplia *Optimal location of synchrophasors in cutset area for implementation of widearea protection*

MARIO F. CIFUENTES PARDO

*Universidad Pontificia Bolivariana; Cir.1 #70-01, B11, Medellín, Colombia
mario881027@gmail.com*

Resumen: En el presente artículo se muestra el modelo de programación lineal binaria que permitió obtener una medida confiable del ángulo de corte, con un número limitado de PMUs ubicadas estratégicamente. Además se presenta la implementación del modelo de programación lineal binaria en la interfaz gráfica GUIDE del software MATLAB (MathWorks, 2015) y la aplicación a las metodologías de protección sistémica desarrolladas en (Lopez, 2012) *Copyright © 2015 UPB KOSMOS*

Abstract: *In this article shown the binary linear programming model that allow a reliable measure of the cutset angle, with a limited number of PMUs strategically located. Addition to shown the implementation of the binary linear programming model in the graphic user interface GUIDE of the MATLAB software (MathWorks, 2015) and application of the methodologies implemented in Colombian electric system by (Lopez, 2012).*

Keywords: Cuset angle, Cuset area, binary linear programing, scheme protection systematic

1. INTRODUCCIÓN

Actualmente sobre el sistema eléctrico Colombiano, se ha empezado a implementar unidades de medición fasorial, con el fin de supervisar su estado en tiempo real. La utilidad de esta decisión permite que por medio de algoritmos, parámetros de operación normal, esquemas de protección suplementarios, entre otros, se detecte los posibles estados que el sistema experimenta respecto a su comportamiento estático o dinámico. Por lo tanto se puede decir que las unidades medición fasorial son una herramienta que permite que el operador de red pueda responder de forma coherente ante eventos que atenten con la integridad del sistema.

El presente artículo propone un modelo matemático que permita la optimización de la cantidad y ubicación de las unidades de medición fasorial en áreas de corte previamente definidas, con el fin de obtener una medida confiable del ángulo de corte, para que todo tipo de aplicaciones, como los esquemas de protección suplementaria puedan ser viables técnico-económicamente.

Los esquemas de protección suplementaria son un conjunto de elementos de protección y control diseñados para detectar condiciones anormales en la red y tomar acciones correctivas, con el fin de conservar la integridad del sistema, evitando la extensión del evento y garantizando un desempeño aceptable, que reduce el colapso, por medio de acciones como cambios en la carga, topología y generación, de tal manera que se puedan conservar niveles aceptables de tensión y flujo de potencia (Cigre, 2001)

Un ejemplo de estos esquemas son las metodologías propuestas en (Lopez, 2012), las cuales toman acciones de control aplicadas al sistema eléctrico Colombiano, como deslastre de carga, rechazo generación y aislamiento de área operativas, de acuerdo a la magnitud de ciertos indicadores que están basados en la teoría de ángulo de corte y central. Sin embargo en este artículo solo se trabajara el concepto de ángulo de corte propuesto en (Dobson, 2010), el cual se obtienen por medio de un proceso matemático, que se alimenta por los datos suministrados de las unidades de medición fasorial. Pero este procedimiento supone PMUs en todas las barras del sistema a analizar, lo cual no puede ser viable por variables económicas o de carga computacional. Por tal motivo se evidencia la importancia de la presente investigación, ya que puede ser una gran base para la viabilidad de trabajos, propuestas, investigaciones, entre otras.

De igual forma se presenta el desarrollo de una herramienta de computo, que permita el cálculo del ángulo de corte para áreas de corte predefinidas, esta herramienta se desarrolló en la interfaz gráfica GUIDE del software MATLAB (MathWorks, 2015).

Esto resulta muy importante para las empresas del sector eléctrico, especialmente para los operadores de red y usuarios, ya que ante posibles situaciones que sean perjudiciales para el sistema, se tomaría acciones, respaldadas por un proceso matemático, que garantiza el cálculo del ángulo de corte, con un número limitado de PMUs, con el fin de eliminar variables de latencia o de costo. Por ende ante una situación indeseada se tendrían herramientas que

pueden ser de gran utilidad a la hora de salvaguardar el sistema, lo cual se traduce a un menor número de usuarios afectados, e implica menores pérdidas para las empresas relacionadas con el transporte y generación de energía eléctrica.

2. MODELO DE OPTIMIZACIÓN DE PMUs CON RESTRICCIÓN DE ÁNGULO DE CORTE

En el presente literal se presenta el modelo de programación lineal binaria utilizado para obtener una medida confiable del ángulo de corte con un número limitado de PMUs instaladas en las barras fronteras del área de corte.

$$\text{MIN } Z = f(x) = \sum_{k=1}^N x_k \quad (1)$$

Donde

N: número de nodos que limitan el área de corte

Z: Número de PMUs instaladas a lo largo del área de corte

X: Variable binaria de decisión, donde 1 es PMU instalada en el nodo k y 0 es PMU no instalada en el nodo k

Restricciones:

Restricción de observabilidad del sistema de potencia apoyada en la referencia (Bei, 2008) :

$Ax \geq b$ (restricción)

Donde :

A Matriz de conexión del sistema de dimensión (NxN) donde N=número de nodos del sistema analizar

$$A_{ij} = \begin{cases} 1 & \text{si } i=j \\ 1 & \text{si } i \text{ y } j \text{ están conectados} \\ 0 & \text{para cualquier otro caso} \end{cases} \quad (2)$$

$$x = [x_1, x_2, \dots, x_N]^T$$

$$b = [1, 1, \dots, N]^T$$

Esta restricción garantiza que cada nodo que compone al sistema se observable. Ya sea por el mismo o por al menos uno de los nodos que están conectados del nodo analizar

Restricción de ángulo de corte

$$|\theta(t)_{real} - \theta(t)_{medido}| \leq Tolerancia$$

Donde :

$$\theta(t)_{real} = \frac{\sigma_a B \theta_{barras}}{\sigma_a B \sigma_a^T} \quad k = \frac{\sigma_a B}{\sigma_a B \sigma_a^T} \text{ dimensión } (1 \times N) \quad (3)$$

$$\theta(t)_{medido} = k \theta_{barras} x^T \rightarrow x \in \{0, 1\}$$

Aplicando propiedades de valor absoluto la anterior expresión se convierte en dos restricciones:

$$(\theta(t)_{real} - \theta(t)_{medido}) \geq -tol \quad \text{o} \quad (\theta(t)_{real} - \theta(t)_{medido}) \leq tol \quad (4)$$

Aplicando el modelo de optimización al área de corte de la Figura 1 el problema de optimización queda de la siguiente manera:

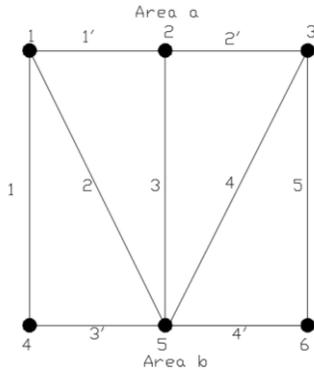


Figura 1. Área de corte

Función objetivo:

$$\text{MIN } Z = f(x) = x_1 + x_2 + x_3 + x_4 + x_5 + x_6$$

Restricciones de observabilidad

$$\begin{bmatrix} 1 & 1 & 0 & 1 & 1 & 0 \\ 1 & 1 & 1 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 1 & 1 & 0 & 1 & 1 \\ 1 & 0 & 0 & 1 & 1 & 0 \\ 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 1 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X_1 \\ X_2 \\ X_3 \\ X_4 \\ X_5 \\ X_6 \end{bmatrix} \geq \begin{bmatrix} 1 \\ 1 \\ 1 \\ 1 \\ 1 \\ 1 \end{bmatrix}$$

Restricciones de ángulo de corte para el instante de tiempo 1

$$\left(\begin{array}{cccccc} \theta_1(t_1) & & & & & \\ & \theta_2(t_1) & & & & \\ & & \theta_3(t_1) & & & \\ & & & \theta_4(t_1) & & \\ & & & & \theta_5(t_1) & \\ & & & & & \theta_6(t_1) \end{array} \right) \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \\ x_3 \\ x_4 \\ x_5 \\ x_6 \end{bmatrix} \geq -tol$$

$$\left(\begin{array}{c} \theta_{real} - k \\ \theta_1(t_1) \\ \theta_2(t_1) \\ \theta_3(t_1) \\ \theta_4(t_1) \\ \theta_5(t_1) \\ \theta_6(t_1) \end{array} \right) \begin{array}{c} \left[\begin{array}{c} x_1 \\ x_2 \\ x_3 \\ x_4 \\ x_5 \\ x_6 \end{array} \right] \leq tol \end{array}$$

Como se puede observar el problema propuesto anteriormente se compone de una función objetivo, 6 ecuaciones de observabilidad y dos ecuaciones de ángulo de corte para el instante t_1 , sin embargo, en un evento que experimente el sistema se va tener un número de muestras considerables de registros de los ángulos en las barras.

En otras palabras, para este problema se tiene el mismo número de restricciones más (N- muestras angulares) por 2=número de restricciones de ángulo de corte.

Como se puede observar se convierte en un problema lineal con un gran número de variables, el cual se puede resolver por distintos solvers desarrollados para resolver problemas de programación lineal:

Solver típicos:

- Método gráfico de desigualdades lineales

- Simplex
- Dual simplex
- Punto interior
- Cplex

Estos se escogen de acuerdo al performance que se necesite para la solución.

3. APLICATIVO

En el presente literal se muestra el desarrollo del software implementado a lo largo de la investigación realizada. Este consiste en una interfaz gráfica desarrollada en el entorno GUIDE del software MATLAB (MathWorks, 2015). Esta se compone internamente de funciones, que tienen como fin, desarrollar el modelo de optimización expresado en las ecuaciones (1), (2) y (3) del literal 2 del presente documento. Sin embargo no todo el proceso es llevado a cabo en el entorno de MATLAB, ya que la resolución del problema de optimización, se realizó en el software GAMS (GAMS Home Page, 2015), en otras palabras el entorno gráfico actúa como un administrador de la información, porque este tiene que llevar los datos necesarios al compilador de GAMS para que se ejecute el proceso de optimización. Posteriormente a este proceso MATLAB toma los resultados obtenidos y los presenta

adecuadamente, para que el usuario los interprete de la manera correcta.

En la Figura 2, se puede observar la interfaz gráfica desarrollada, para el presente proyecto. En donde las primeras casillas N_Barras, N_Líneas_AC y Error, corresponden al número de barras fronteras que tiene el área de corte, número de líneas de transmisión que se encuentran dentro del área de corte y tolerancia en grados con que se desea que el ángulo de corte optimizado respectivamente; esta tolerancia es +/- respecto al ángulo de corte ideal o medido pero suponiendo medidas sincrofasoriales en todas las barras.

Posteriormente de estos campos se ilustra la conexión i,j de cada una de las N_Líneas_AC con su respectiva susceptancia, en el lado derecho se tiene una matriz de ángulos, correspondientes a las medidas angulares registradas en cada barra del área de corte ante un evento estático o dinámico.

En la parte final se ilustra el resultado de la optimización, en donde "1" equivale a la PMU instalada del nodo (índice de la fila). Por último se muestra una gráfica que expresa el comportamiento del ángulo de corte medido y optimizado, ante el evento estático o dinámico escogido, que en este caso corresponde a una contingencia de la línea de transmisión 2-25, del sistema de potencia IEEE de 39 barras, el cual se trabajó con la siguiente nomenclatura.

En la Tabla 1 se puede observar la nomenclatura o equivalencia de los nombres de las barras para un sistema IEEE de 39 barras, ya que en el software se tiene que enumerar las barras que componen el área de corte de forma numérica y empezando desde 1.

Tabla 1. Nomenclatura para área de corte del sistema IEEE 39 barras

Índice de barra sistema IEEE	Equivalente para resultado de simulación
9	1
39	2
5	3
4	4
14	5
16	6
17	7

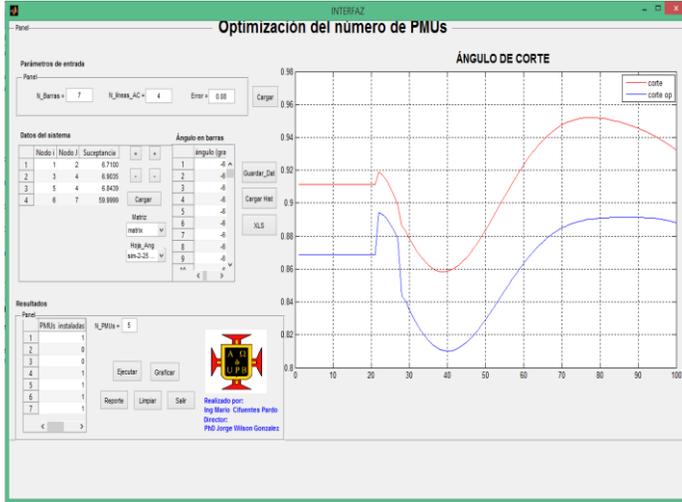


Figura 2. Interfaz Gráfica

En la Figura 3 se puede observar, el diagrama unifilar del sistema utilizado para la simulación realizada con anterioridad. A continuación en la Figura 4, se pueden observar las curvas obtenidas del ángulo de corte, ante contingencias de las LT que se encuentran contenidas en el área de corte y fuera de ella. Para cada caso se utiliza un valor de tolerancia en donde se pueda obtener cualquier reducción de cantidad de PMUs instaladas.

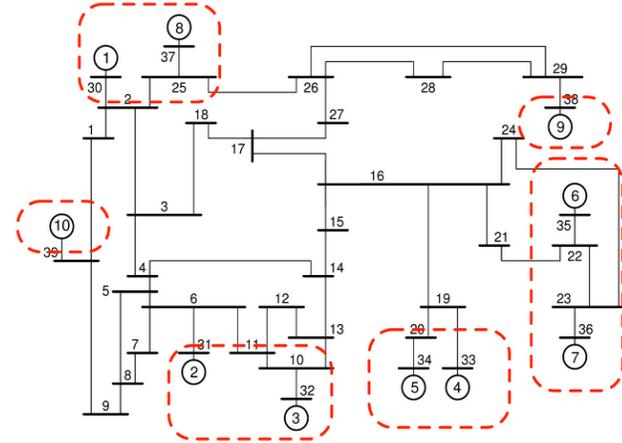


Figura 3. Sistema IEEE de 39 barras (New England Power Grid Model)

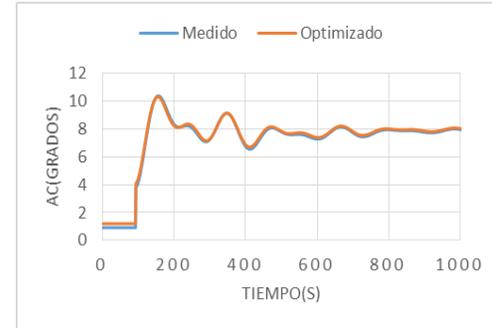
En la Tabla 2, se presentan las contingencias realizadas al sistema de la Figura 3. En esta tabla se puede observar las PMUs instaladas, para la determinación del ángulo de corte con un valor de tolerancia respecto al ideal. Este valor fue asignado de modo que se pudiera observar una reducción de PMUs, en otras palabras entre más alto el valor de tolerancia, se obtiene un menor número de PMUs instaladas.

Tabla 2. Contingencias sistema IEEE 39 Barras

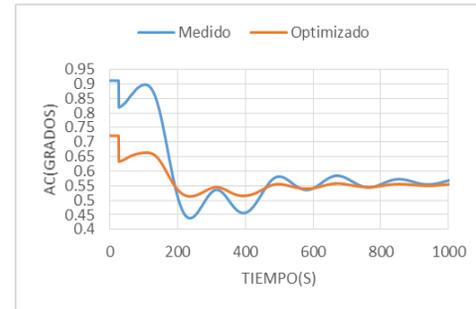
Figura 4	Contingencia	PMUs- Instaladas	Tolerancia(°)
(a)	16-17	4	0,3
(b)	9-39	5	0,25
(c)	4-14	5	0,25
(d)	4-5	5	0,09

Nota: Las contingencias realizadas fueron ante un evento de falla trifásica, en donde se dispararon forzosamente las protecciones de la LT perturbada de 100 a 200 ms, posteriormente esta cierra. Esto con el fin de mirar la evolución del ángulo de corte ante tal perturbación.

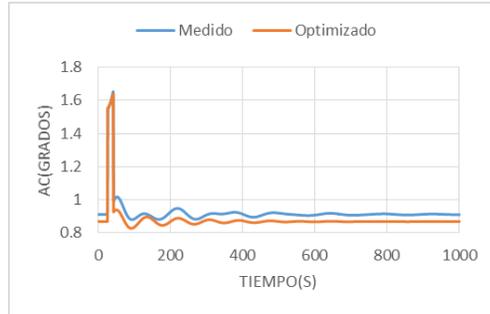
En la Figura 4 se observa las curvas de ángulo de corte obtenidas para cada caso en donde el objetivo principal consiste en el seguimiento de la señal ideal de acuerdo a la tolerancia asignada. Por otro lado en la Figura 5 se ilustra el diagrama de flujo correspondiente a la lógica de funcionamiento del aplicativo realizado, para la presente investigación.



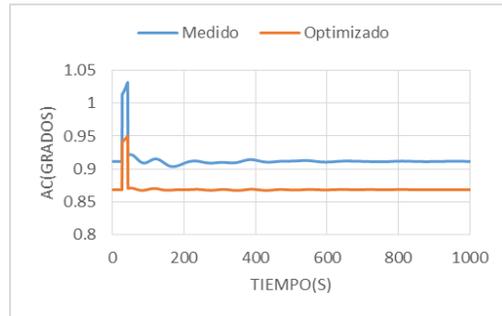
(a)



(b)



(c)



(d)

Figura 4. Simulaciones realizadas sistema IEEE 39 Barras

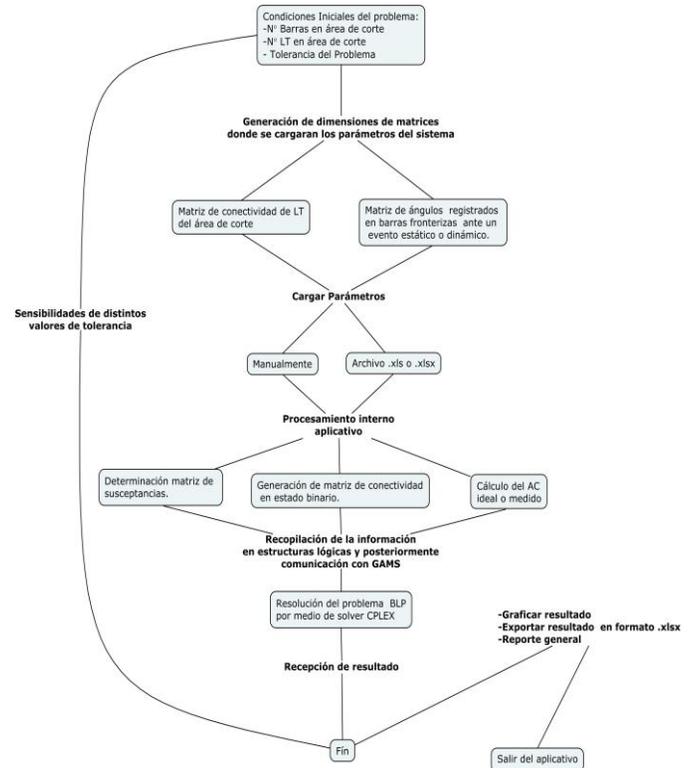


Figura 5. Diagrama de flujo de funcionamiento del software

4. APLICACIÓN EN ESQUEMA DE PROTECCIÓN SUPLEMENTARIO

La efectividad del modelo propuesto también se estudiará en una red de grandes dimensiones. Este es el caso del Sistema Interconectado Nacional de Colombia, o STN. El análisis tendrá un segundo objetivo que tiene que ver con el análisis de la efectividad de sistemas de protección de área amplia. Dichas protecciones se presentan en la referencia (Lopez, 2012), en donde estas protecciones toman acciones de control sobre el sistema eléctrico Colombiano, ante el estado de sus indicadores, basados en la teoría de ángulo de corte y ángulo central.

Para la comprobación de compatibilidad se decidió desactivar la actuación de la protección sistémica ante los indicadores basados en la teoría de ángulo central, con el fin de analizar los resultados obtenidos respecto a la optimización de las ecuaciones de ángulo de corte, que constituye el objetivo del presente trabajo.

En la Tabla 3, se puede observar el área de corte que se utilizó para la comprobación de compatibilidad de la protección sistémica, esta fue seleccionada al azar entre las 28 áreas propuestas en (Lopez, 2012). En la Figura 6, se puede observar el diagrama unifilar para esta área de corte.

Para determinar la validación de resultados, se elijo realizar varias simulaciones sobre el área de corte propuesta, con distintos valores de tolerancia para la precisión de cálculo del ángulo de corte. Con esto se busca encontrar el valor mínimo de PMUs instaladas para

esta área y determinar cómo afecta los parámetros y la actuación de la protección sistémica propuesta.

Tabla 3. Área de corte zona Antioquia.

Área de corte	Líneas de transmisión
Antioquia	Ancon Sur - Esmeralda 1 220
	Ancon Sur - Esmeralda 2 220
	Ancon ISA 220 - San Carlos 1 220
	Ancon ISA 220 - San Carlos 2 220
	Barbosa - Guatape 1 220
	Envigado - Guatape 1 220
	Guatape - Miraflores 1 220
	Guatape - Oriente 1 220
	Oriente - Playas 1 220
	Apartado - Caucheras 1 110
El Siete - Quibdo 1 110	

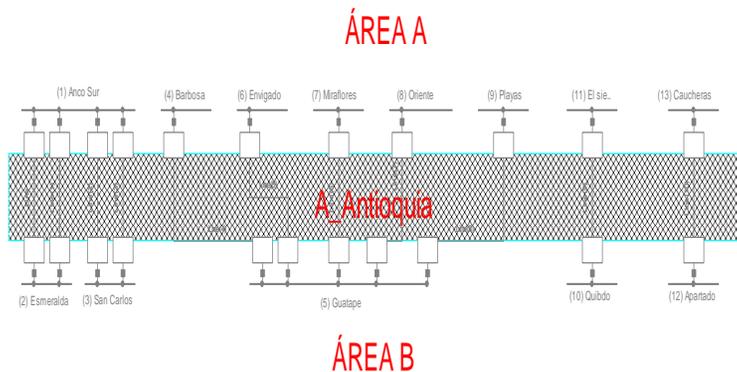


Figura 6. Área de corte implementada.

En la Figura 7, se puede observar el funcionamiento lógico de la metodología propuesta según (Lopez, 2012), donde el parámetro clave a evaluar es la tasa de crecimiento del ángulo de corte, ya que si se excede, se acciona la función de aislar áreas operativas. Para alterar este parámetro se procedió a realizar una perturbación, la cual consistió en la indisponibilidad de la S/E de CERROMATOSO de 500 kV, en la Tabla 11, se ilustran los elementos que conforman dicha S/E. Donde los nombres de los elementos están de acuerdo a la base de datos Colombiana implementada en el software Power Factory Digsilent (DigSILENT Power Factory, 2015)

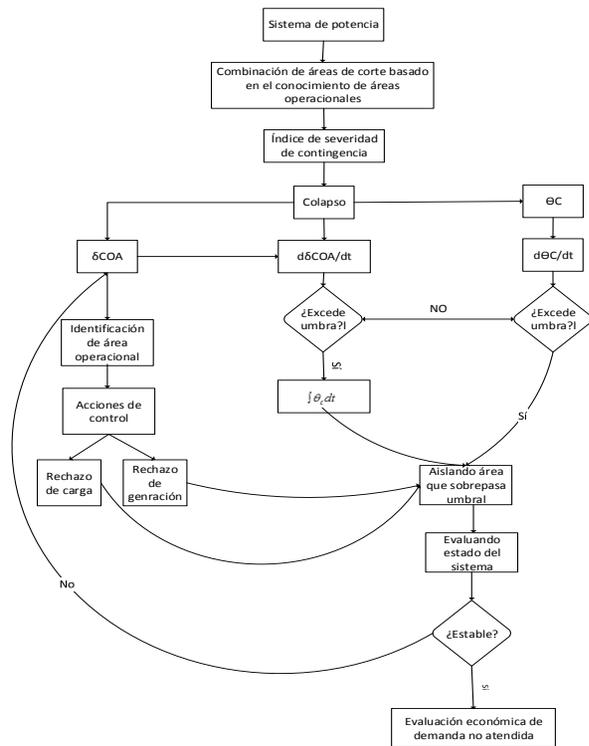


Figura 7. Diagrama de flujo general de las metodologías propuestas según (Lopez, 2012)

Tabla 4. Salida de S/E CERROMATOSO 500 kV

ÍTEM	TIEMPO[s]	Elementos
Falla0	0.1	CMT_B1_500
Falla1	0.1	Cerro - Primavera 1 500 T1
Falla2	0.1	Cerromatoso 1 500/110
Falla3	0.1	Cerromatoso 2 500/110
Falla4	0.1	Cerromatoso 500/230
Falla5	0.1	Cerro - Chinu 1 500 T1
Falla6	0.1	Cerro - Chinu 2 500 T1
Falla7	0.1	Cerro - Porce 3 1 500 T1
Falla8	0.1	Cerromatoso 3 500/110
Falla9	0.1	Cerro - Gecelca 1 500
Falla10	0.1	CMT_B2_500

En la siguiente tabla se muestra la ubicación de las PMUs instaladas con distintos valores de tolerancia en grados respecto al ángulo de corte ideal o medido con todas las PMUs instaladas.

Tabla 5. PMUs Instaladas para distintos valores de tolerancia

Barra/Tol	0,1-0,4	0,425	1,5
1	Ins	Ins	Ins
2	Ins	Ins	No Ins
3	Ins	No Ins	No Ins
4	Ins	Ins	Ins
5	Ins	Ins	Ins
6	Ins	No Ins	No Ins
7	Ins	No Ins	No Ins
8	Ins	No Ins	No Ins
9	Ins	No Ins	No Ins
10	Ins	Ins	Ins
11	No Ins	No Ins	No Ins
12	Ins	Ins	Ins
13	Ins	Ins	Ins
PMUs_Ins	12	7	6

Nota: las abreviaciones “Ins y No Ins”, quiere decir PMU instalada y PMU no instalada respectivamente.

La metodología propuesta en la Figura 7 toma acciones de aislamiento cuando una de las derivadas de los ángulos de corte de las distintas áreas sobrepasa un umbral determinado. Por tal motivo, se redujo el valor de umbral del área Antioquia, con el fin de forzar la actuación de la protección por el sobrepaso del umbral de esta área, ya que la rata de crecimiento del ángulo de corte no era suficiente para que la protección actuara por la salida de la subestación CERROMATOSO. Con esto se pretende caracterizar el funcionamiento de la protección y observar hasta qué número mínimo de PMUs instaladas la protección actúa adecuadamente.

Los umbrales que se utilizaron fueron:

- 2,4 grados/segundos
- 2,7 grados/segundos

Tabla 6. Valor de $d\theta_c/t$ para t después de falla dividido por umbral de 2,4 grados/segundos

área/tolerancia	0,1-0,4	0,425	1,5
s:dAbAO1	0,3184	0,3184	0,3184
s:dAbAO2	1,4746	1,0328	1,2206

área/tolerancia	0,1-0,4	0,425	1,5
s:dAbAO3	0,0732	0,0732	0,0732
s:dAbAO4	0,1214	0,1214	0,1214
s:dAbAO5	0,0144	0,0144	0,0144
s:dAbAO6	0,0367	0,0367	0,0367
s:dAbAO7	0,0000	0,0000	0,0000
s:dAbAO8	0,0486	0,0486	0,0486
s:dAbAO9	0,2044	0,2044	0,2044
s:dAbAO10	0,0000	0,0000	0,0000
s:dAbAO11	0,1612	0,1612	0,1612
s:dAbAO12	0,0146	0,0146	0,0146
s:dAbAO13	0,0075	0,0075	0,0075
s:dAbAO14	0,0941	0,0941	0,0941
s:dAbAO15	0,0146	0,0146	0,0146
s:dAbAO16	0,0177	0,0177	0,0177
s:dAbAO17	0,0367	0,0367	0,0367
s:dAbAO18	0,0703	0,0703	0,0703

área/tolerancia	0,1-0,4	0,425	1,5
s:dAbAO19	0,0003	0,0003	0,0003
s:dAbAO20	0,0378	0,0378	0,0378
s:dAbAO21	0,2044	0,2044	0,2044
s:dAbAO22	0,0041	0,0041	0,0041
s:dAbAO23	0,0051	0,0051	0,0051
s:dAbAO24	0,0146	0,0146	0,0146
s:dAbAO25	0,0941	0,0941	0,0941
s:dAbAO26	0,0703	0,0703	0,0703
s:dAbAO27	0,0146	0,0146	0,0146
s:dAbAO28	0,0003	0,0003	0,0003

Nota: La columna para los valores de tolerancias 0,1 y 0,4 grados, equivale a la columna de caso base o ideal, ya que los valores del caso ideal no difieren significativamente respecto a este.

En la Tabla 6, se puede observar que la protección sistémica sigue actuando por el área 2, a pesar de que se tenga una diferencia de 0,4418 °/s respecto al caso base, ya que sigue siendo el área de corte que supera el umbral en primera instancia. Por otro lado en la Tabla

7, se tiene que para un valor de tolerancia de 0,425 grados, la protección sistémica empieza a fallar sin importar que para 1,5 grados sí actué. Por ende se puede concluir que para la contingencia planteada, se debe trabajar con 7 PMUs instaladas sin que las actividades del área 2 se vean perjudicadas para un valor de umbral de 2,4 °/s. Se puede observar que para este caso, se obtiene una mayor precisión de la rata de crecimiento del ángulo de corte para 1,5 grados respecto a 0,425 grados. Sin embargo, es un resultado mentiroso, ya que para 0,425 grados se obtiene mejor seguimiento de la señal de ángulo de corte ideal. Por ende se concluye que este “mejor seguimiento” para la tolerancia de 1,5 grados, es el resultado de un ruido de la señal optimizada, ya que en ese instante de muestra, la señal optimizada de 1,5 grados tenga una mayor magnitud que la señal optimizada de 0,425 grados y por eso la rata de crecimiento es mayor, pero no quiere decir que el seguimiento a la señal ideal sea mejor.

Para un valor de umbral mayor a 2.4 °/s se recomienda trabajar con un valor de 12 PMUs instaladas para que las actividades del área dos no se pongan en riesgo, ya que para tolerancias mayores la protección sistémica empieza a fallar.

Tabla 7. Valor de $d\Theta_c/t$ para t después de falla dividido por umbral de 2,7 grados/segundos

área/tolerancia	0,1-0,4	0,425	1,5
s:dAbAO1	0,318	0,318	0,318
s:dAbAO2	1,311	0,918	1,085
s:dAbAO3	0,073	0,073	0,073
s:dAbAO4	0,121	0,121	0,121
s:dAbAO5	0,014	0,014	0,014
s:dAbAO6	0,037	0,037	0,037
s:dAbAO7	0,000	0,000	0,000
s:dAbAO8	0,049	0,049	0,049
s:dAbAO9	0,204	0,204	0,204
s:dAbAO10	0,000	0,000	0,000
s:dAbAO11	0,161	0,161	0,161
s:dAbAO12	0,015	0,015	0,015
s:dAbAO13	0,008	0,008	0,008
s:dAbAO14	0,094	0,094	0,094

s:dAbAO15	0,015	0,015	0,015
s:dAbAO16	0,018	0,018	0,018
s:dAbAO17	0,037	0,037	0,037
s:dAbAO18	0,070	0,070	0,070
s:dAbAO19	0,000	0,000	0,000
s:dAbAO20	0,038	0,038	0,038
s:dAbAO21	0,204	0,204	0,204
s:dAbAO22	0,004	0,004	0,004
s:dAbAO23	0,005	0,005	0,005
s:dAbAO24	0,015	0,015	0,015
s:dAbAO25	0,094	0,094	0,094
s:dAbAO26	0,070	0,070	0,070
s:dAbAO27	0,015	0,015	0,015
s:dAbAO28	0,000	0,000	0,000

5. RECOMENDACIONES PARA TRABAJOS FUTUROS

En el presente literal se plantean ideas que podrían llevar la investigación realizada a fines aplicativos para sistemas de protección de área amplia.

1) Se recomienda implementar modelos no lineales y heurísticos aplicados a la ubicación óptima de PMUs en un sistema de potencia, con el fin de comparar variables como:

- Rapidez de ejecución (grado de complejidad del algoritmo)
- Rapidez de convergencia (número de iteraciones hasta llegar al óptimo)
- Equivalencia en la ubicación PMUs (como ubica PMUs los otros métodos)
- Consumo de recursos informáticos (costo)

Con el fin de escoger la opción técnico-económica más viable para solucionar el problema.

2) Modificar la función objetivo implementando una variable de peso, la cual sea el costo de instalación (ej: $\min z = \sum_{i,j=1}^{nodos} costo_j x_i$), además de plantear distintas restricciones diferentes a la observabilidad sencilla como:

- Redundancia de Medición.

- Consideración de pérdida de línea de transmisión.
- Definición de la función costo, de acuerdo a la naturaleza del sistema a trabajar.

Esto con el fin de obtener una solución más robusta, la cual considere distintas variables como la pérdida de información, ya sea por el daño de una PMU o salida de una línea, con el fin de que el problema no se base solo en mantener la señal del ángulo de corte sino también en considerar variables externas que pueden ocurrir.

3) Con el transcurrir del tiempo se observó que los dispositivos electrónicos, tienden a disminuir su precio, de tal forma que en un futuro puede ser viable económicamente tener PMUs en todas las barras. Sin embargo es un tema que de pronto no sería viable desde el punto de vista técnico, ya que la carga computacional para el manejo de todos los datos sería grande. Por tal motivo sería interesante proponer un esquema centralizado y descentralizado que vigile los estados de líneas y demás equipos que puedan influir en el cambio de topología del sistema, con el fin de que el algoritmo de optimización le diga al esquema de protección qué medidas tomar, garantizado la vigilancia del sistema en tiempo real y así poder disminuir la carga computacional y al momento de un evento estático o dinámico poder responder con la menor latencia de tiempo posible.

- 4) Implementar el trabajo realizado con las ecuaciones de ángulo central, con el fin de construir una protección sistémica más completa, que permita actuar ante situaciones de pequeño, mediano y gran impacto.

6. CONCLUSIONES

Se planteó un modelo matemático de programación lineal binaria, basado en ecuaciones de artículos IEEE, que determinan la ubicación óptima de unidades de medición sincrofasorial para áreas de corte previamente definida. Permitiendo obtener una medida confiable del ángulo de corte.

Se implementó una interfaz gráfica basada en los software de MATLAB y GAMS, que determina la ubicación óptima de unidades de medición sincrofasorial para áreas de corte previamente definidas. Lo cual abre la oportunidad a aplicaciones de protecciones de área amplia, ya que puede ser clave para la implementación de un SCADA, en donde se vigile el estado en tiempo real de las distintas áreas de corte, con el fin de poder tomar acciones predictivas o correctivas ante eventos estáticos o dinámicos en un sistema de potencia.

Se comprobó el funcionamiento del programa en un sistema de potencia IEEE de 39 barras, lo cual brinda soporte para futuras investigaciones. Además se adaptó en un esquema de protección sistémica implementado sobre la red nacional. Lo cual da valor

agregado al trabajo realizado, ya que funciona adecuadamente y da garantía de aplicaciones futuras que se base en la teoría de ángulo de corte.

Se realizó una investigación de la teoría de ángulo de corte más relevante para el presente trabajo y aplicaciones realizadas a nivel global como local. Lo cual fue de gran soporte para la elaboración del modelo de programación lineal binaria desarrollado en el presente trabajo. Además de que permitió visualizar los alcances futuros que puede tener el presente trabajo de acuerdo a los alcances logrados hasta el momento.

El producto desarrollado en el presente trabajo, puede tener grandes beneficios a futuro respecto a la carga computacional, ya que a medida que transcurre el tiempo, los sistemas de potencia son cada vez más monitoreados y extensos, lo cual se traduce a un mayor volumen de datos, que puede ser perjudiciales para el monitoreo por áreas de corte en tiempo real, ya que la latencia de las señales pueden marginar la operación a tiempo.

AGRADECIMIENTOS

Quiero agradecer especialmente a Dios, a mis padres, a mi esposa e hija por el apoyo incondicional durante estos años de vida, estudio y trabajo, el cual me ha llevado a que cada día sea un mejor ser humano.

Un agradecimiento muy especial a mí director de grado el PhD Jorge Wilson González, por el apoyo incondicional durante la realización del trabajo de grado y antes de este. Además por la enseñanzas y consejos brindados durante mi trayectoria de formación profesional. .

Igualmente extendiendo el agradecimiento al PhD Jairo José Espinosa Oviedo y a mis amigos y compañeros de maestría Daniel Díaz y Herman Foliaco por el conocimiento y amistad proporcionada, la cual fue de gran utilidad para la elaboración adecuada del presente trabajo de grado.

7. REFERENCIAS

Bei, G. (2008). Generalized Integer Linear Programming Formulation for Optimal PMU Placement. IEEE.

Cigre. (2001). SYSTEM PROTECTION SCHEMES IN POWER NETWORKS.

DigSILENT Power Factory. (2015). Recuperado el 24 de Febrero de 2015, de <http://www.digsilent.de/>

Dobson, I. (Aug de 2010). New angles for monitoring areas. *Bulk Power System Dynamics and Control (iREP) - VIII (iREP), 2010 iREP Symposium*, 1-13, 1-6 .

GAMS Home Page. (2015). Recuperado el 06 de Febrero de 2015, de <http://www.gams.com/>

Lopez, G. (2012). *Validation and evaluation of the cutset angle and central angle method for stability analysis of the colombian electric power network*. Medellín.

MathWorks. (2015). Recuperado el 02 de Febrero de 2015, de <http://www.mathworks.com/products/matlab/>

AUTOR



Mario Fernando Cifuentes Pardo. Estudiante de maestría de transmisión y distribución de energía eléctrica e ingeniero Electricista e Ingeniero Electrónico Universidad Pontificia Bolivariana.