

otros clusters. Entre más cercano se encuentre el índice a 1, los datos están mejor agrupados. El indicador generalmente se resume como el promedio de los índices calculados para cada dato. En la gráfica 4.8 se muestra un ejemplo ilustrativo del indicador silueta para datos agrupados en 4 clusters.

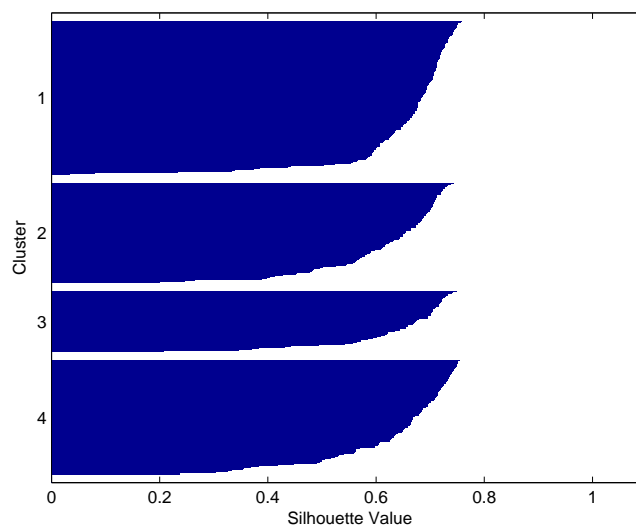


FIGURA 4.8: Indicador silueta para datos agrupados en 4 clusters

### 3. *Relación Inter-intra Cluster.*

En este indicador se calcula la proporción que hay entre el promedio de la distancia de los datos a los respectivos centroides y la mínima distancia que hay entre los centroides.

Para una agrupación adecuada, se tiene como objetivo maximizar el valor del indicador silueta; por otro lado el objetivo que se tiene para el indicador intra-inter clusters es minimizar su valor.

Teniendo las cinco componentes principales de la matriz de hundimientos en tensión simulados, se procede a ejecutar el algoritmo kmeans para diferentes cantidades de grupos ( $k$ ) de entrada, calculando los indicadores explicados con el ánimo de hallar la cantidad apropiada de clusters para clasificar la información.

Los resultados de los indicadores para agrupaciones con valores de  $k$  entre 2 y 100 se muestran a continuación:

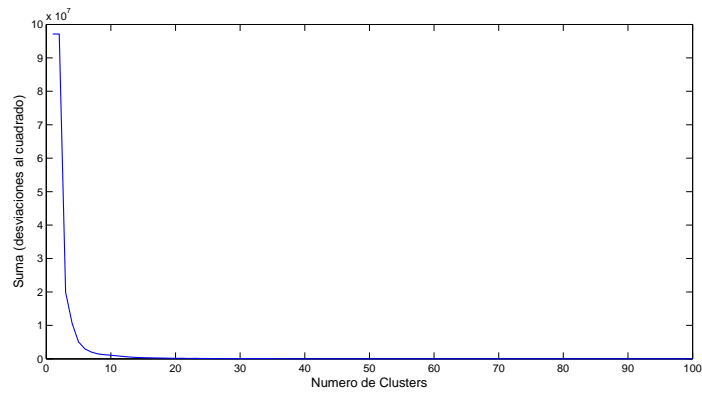


FIGURA 4.9: Indicador R para datos de hundimientos en tensión

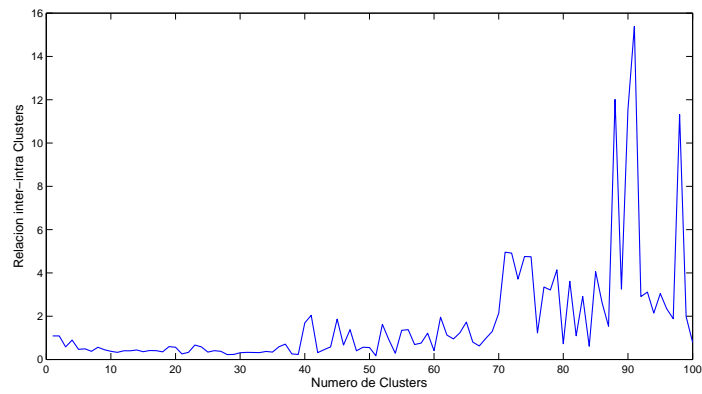


FIGURA 4.10: Relación inter-intra clusters para datos de hundimientos en tensión

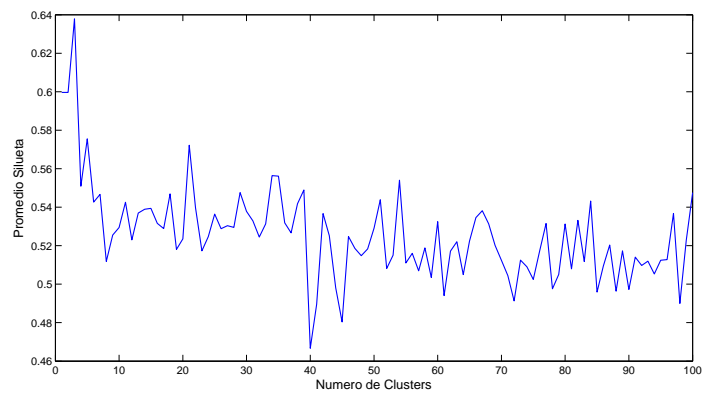


FIGURA 4.11: Promedio indicador silueta para datos de hundimientos en tensión

De las figuras 4.9, 4.10 y 4.11 podemos observar lo siguiente:

- Para el caso del indicador R, se tiene que el codo de la curva está cercano a 10 clusters por lo que éste puede ser un posible valor para (k).
- Para el caso de la relación inter-intra clusters a minimizar, tenemos que no hay un valor concreto identificado de (k), además después de  $k=60$  el indicador aumenta su variabilidad, esto quiere decir que después de  $k=60$  las distancias entre los datos y el respectivo centroide son comparables con la distancia mínima entre dos centroides.
- El indicador silueta a maximizar tampoco muestra un valor concreto de k para realizar la agrupación de los datos de hundimientos. Aunque existen algunos valores máximos cercanos a  $k= 20, 55$  y  $85$  en general no hay diferencias considerables del indicador.
- En conjunto, los indicadores propuestos no concuerdan en un valor para k tal que los hundimientos en tensión sean correctamente agrupados.
- De acuerdo con los resultados del conjunto de indicadores podemos decir que las observaciones de hundimientos *no se encuentran naturalmente agrupadas*, es decir que no hay grupos evidentemente diferenciados.

Teniendo en cuenta que los anteriores resultados no son concluyentes, es posible realizar una clasificación de los datos en una cantidad de grupos apropiada según el objetivo de la clasificación. Para esto se debe recordar que:

*La agrupación de los hundimientos representa una clasificación de las fallas (lugar y tipo) de acuerdo con su impacto (perfil de hundimientos).*

De esta manera, la cantidad de clusters está relacionada con el tamaño de las zonas donde ocurren las fallas que ocasionan hundimientos similares, por ende, si se tienen pocos clusters, habrán pocas zonas con un gran tamaño y no será posible discriminar zonas en las que ocurren fallas con diferente impacto en las barras. Por otro lado, si la cantidad de clusters es demasiada, entonces la zonas serán muy pequeñas y la clasificación sería ineficiente.

Después de ensayar varias cantidades de clusters observando para cada una el tamaño de las zonas resultantes, se seleccionó finalmente un valor para k de 50 clusters, con el cual se logran zonas con tamaño apropiado en el sistema simulado.

Al aplicar kmeans a las componentes principales obtenidas anteriormente, se obtiene un vector  $6355 \times 1$  que indica en cuál cluster está clasificada cada observación de la matriz de hundimientos y de la matriz de fallas. Al agrupar las posiciones de falla mediante este vector, se pueden determinar zonas cuyas fallas tienen impacto similar, tal como se muestra en la figura 4.12.

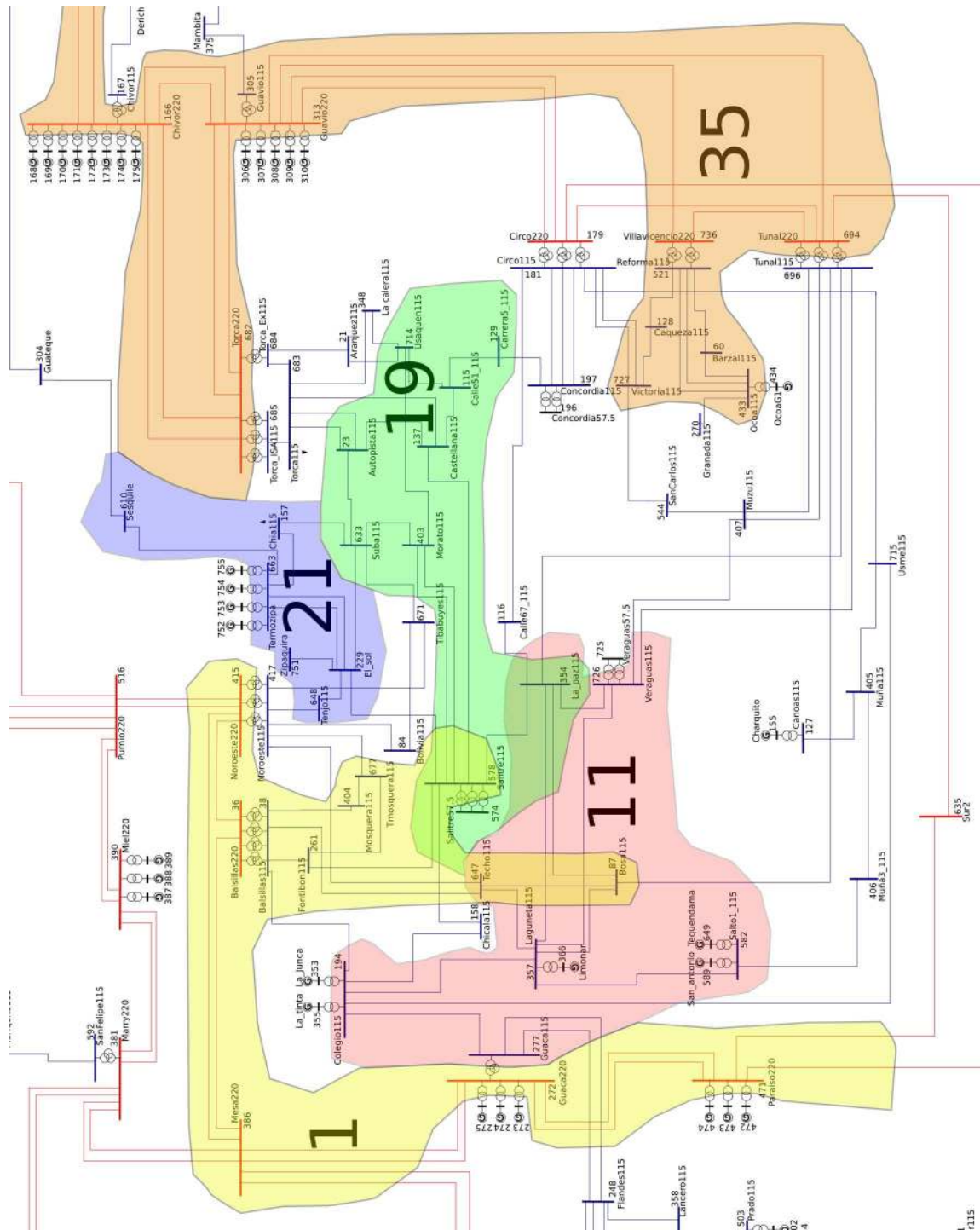


FIGURA 4.12: Agrupación de zonas cuyas fallas tienen impacto similar en los hundimientos en tensión de las barras de CODENSA

En la figura 4.12 se ilustran algunas zonas de ejemplo. Cada zona hace referencia a un cluster de fallas y por ende a uno de hundimientos con magnitudes similares. De la misma manera que el vector de salida de kmeans es usado para agrupar posiciones de falla, también es usado para agrupar tipos de falla, por lo que cada zona en el sistema también representa la ocurrencia de cierto tipo de falla.

En la tabla 4.2 vemos los tipos de falla (1= monofásica, 2= bifásica, 3= trifásica y 4= bifásica a tierra) que están agrupados para cada cluster. Nótese que en algunos clusters pueden ocurrir varios tipos de falla, es decir que al igual que en las posiciones de falla los grupos pueden estar superpuestos.

TABLA 4.2: Agrupación del tipo de Falla

Cluster	Tipo Falla	Cluster	Tipo Falla
1	3	26	3
2	1,2,4	27	2,4
3	3	28	3
4	1,2,3,4	29	2,4
5	1	30	3,4
6	1	31	3
7	1,2,4	32	1
8	3	33	1,2,3,4
9	1	34	3
10	3	35	1,2,3,4
11	2,4	36	3
12	3	37	1,2,4
13	3	38	3
14	1,2,4	39	1
15	2,4	40	3
16	2,4	41	3
17	3	42	2,4
18	3	43	1,2,4
19	4	44	3
20	3	45	4
21	1,2	46	4
22	4	47	2,4
23	2,4	48	1,2,3,4
24	2,4	49	2,4
25	1	50	1

De acuerdo con lo anterior, podemos observar por ejemplo, que el cluster (11) agrupa los hundimientos ocasionados por fallas bifásicas y bifásicas a tierra en la zona 11 de la figura 4.12.

#### 4.4.1. Validación del agrupamiento para clasificación de datos reales

El agrupamiento obtenido en secciones anteriores será empleado para clasificar datos reales de hundimientos de tal manera que se puede estimar el tipo de falla ocurrido y la posible

ubicación [Hiu X. 2006]. El procedimiento para esto es el siguiente:

1. Se toma un dato real de hundimientos en tensión (1 x 144), ocurridos en las barras de 115kV de CODENSA en algún momento específico.
2. Se calculan las distancias entre los centroides de cada uno de los 50 clusters y el dato real ingresado.
3. El dato real es asignado al cluster con el centroide más cercano a él. Por lo que el dato queda relacionado con una zona de ubicación de falla y un tipo de falla.

Para validar este procedimiento primero tomamos una muestra aleatoria de 10 % de los datos simulados, con el fin de ingresarlos como datos reales y verificar en qué cluster quedan asignados. Posteriormente se verifica que cada uno de los datos de la muestra quede asignado al cluster correcto. Una medida del error de este procedimiento se obtiene de la ecuación 4.7.

$$\%error = \frac{Num.datoscorrectamenteclasificados}{Num.totaldedatos} * 100 \% \quad (4.7)$$

Realizando la validación con 100 muestras aleatorias distintas observamos que el error promedio es 2.56 % y el error máximo es 5.23 %. Este error es debido a que las componentes principales con las que se realizaron los clusters representaban en 89.45 % de la información total, sin embargo la magnitud del error es considerablemente baja.

## 4.5. Clasificación datos reales con simulaciones

En esta sección se usará la agrupación de hundimientos en tensión lograda en secciones anteriores para clasificar datos reales que ocurren en las barras de CODENSA. Para esto, es necesario en primera medida organizar la información real de tal manera que la podamos correlacionar con la información simulada.

### 4.5.1. Descripción y procesamiento de la información

La información real de hundimientos es registrada por CODENSA, con medidores de calidad de potencia instalados en barras con tensiones mayores a 1kV. El método para la detección de hundimientos en tensión es especificado por la norma IEC 61000-4-30 y está acorde con el marco teórico mencionado en el primer capítulo de este documento. La información de hundimientos en tensión es registrada por cada uno de los medidores y centralizada hacia una base de datos. Posteriormente esta información se procesa para

generar reportes que el operador de red envía al ente regulador. En esta investigación se tiene acceso a dichos reportes gestionándolos en bases de datos dentro de la Universidad Nacional de Colombia, por lo que para este trabajo se cuenta con información de 48 barras de 115kV en un periodo de tiempo entre enero de 2008 y diciembre de 2009.

En los registros de hundimientos en tensión se encuentra información sobre:

- El lugar donde el hundimiento en tensión se registra.
- Fecha y hora en la que sucedió el evento.
- Tensión de cada una de las fases durante el evento y por último
- Duración del evento.

Con el ánimo de obtener una matriz de N observaciones x 144 variables, la información es procesada mediante una serie de pasos dentro de los cuales, debido a las características de la información, se hicieron las siguientes suposiciones:

**SUPOSICIÓN 1.** *Los Hundimientos en tensión que ocurren dentro de una ventana de tiempo de 1 minuto son ocasionados por un mismo evento.* Revisando la información de fecha y hora de ocurrencia del evento, se encontró que no se incluye el dato de segundos. Por esta razón, el criterio para establecer si dos o más hundimientos en tensión ocurren al mismo tiempo es que dichos eventos se encuentren en una misma ventana de 1 minuto. El posible error que se puede cometer al realizar esto es que dos o más eventos distintos sean considerados uno solo, sin embargo la información no permite una ventana de tiempo más precisa.

**SUPOSICIÓN 2.** *Varios hundimientos en tensión en la misma ventana en la misma barra son ocasionados por el mismo evento.* Existen ventanas de tiempo de un minuto donde para una misma barra se tienen registrados varios eventos. En este caso, si los hundimientos en tensión tienen la misma magnitud entonces se establece que éstos son debidos al mismo evento. Si por el contrario los hundimientos en la ventana de tiempo tienen diferentes magnitudes, éstos son excluidos del análisis.

**SUPOSICIÓN 3.** *Si una barra no registra hundimientos en tensión en una ventana de tiempo determinada entonces no ocurrió algún hundimiento en dicha barra para esa misma ventana de tiempo.* Este caso particular está relacionado con el **no registro** de hundimientos de tensión en ciertas barras por problemas de configuración de equipos o comunicación, por lo cual, en la realidad es posible que el hundimiento haya ocurrido pero éste no se haya registrado.

El resultado final del procesamiento de información es una matriz con 1955 observaciones reales de 144 variables, las cuales serán clasificadas usando en los clusters identificados.

#### 4.5.2. Análisis de la clasificación de hundimientos reales

Una vez obtenida la matriz de hundimientos en tensión reales, clasificamos cada una de las observaciones en los clusters identificados. Los resultados de esto se encuentran en la tabla 4.3.

TABLA 4.3: Asignación de clusters para datos reales de hundimientos

Cluster	Número eventos
2	24
4	1726
5	1
7	3
13	3
14	1
25	1
29	1
33	106
35	17
37	1
47	1
48	70

De la tabla 4.3 podemos observar que la mayoría de las fallas se encuentran ubicadas en el cluster 4 (1726 de 1955 totales), mientras el resto de fallas (229) se encuentran distribuidas en los demás clusters. Este resultado causó curiosidad por lo que se analizó de manera detallada la información de hundimientos en el cluster 4 identificando los siguientes items:

1. En el cluster 4 se agrupan entre otras, observaciones que sólo tuvieron hundimientos en una sola barra para una ventana de tiempo determinada. Comparando esto con la simulaciones, sólo en 5 casos específicos es posible que una falla en 115kV o 220kV genere un hundimiento en una sola barra. Sin embargo, en los datos reales no sucedió ninguno de estos casos, por lo tanto, dichos hundimientos en tensión son atribuidos a eventos ocurridos aguas abajo de las barras y no a fallas en 115kV y 220kV.
2. En el cluster 4 se agrupan entre otras, observaciones de hundimientos que ocurrieron en barras aisladas, esto quiere decir que para una misma ventana de tiempo se observaron hundimientos en tensión en dos o más barras que no se encuentran conectadas entre si. De igual manera, analizando la información simulada de hundimientos en tensión, este caso no es posible, Esto quiere decir que esos

hundimientos en tensión no fueron ocasionados por el mismo evento lo cual desmiente la suposición 1 mencionada en la anterior sección. Otra posibilidad es la ausencia de la información de alguna barra que se conecta con las demás, lo cual desmiente la suposición 3. Estos eventos no se podrán analizar porque como ya se mencionó no es posible obtener una ventana de tiempo más pequeña.

Por lo anterior se decidió excluir de la información real, las observaciones que sólo incluyen un hundimiento en una barra para un intervalo de tiempo determinado, por lo que se asume que estos hundimientos son ocasionados por fallas u otro tipo de eventos aguas abajo del nivel de tensión 115kV. También son excluidas las observaciones que incluyen hundimientos en barras aisladas entre si . El flujo y las cantidades de información analizada se muestra en la figura 4.13.

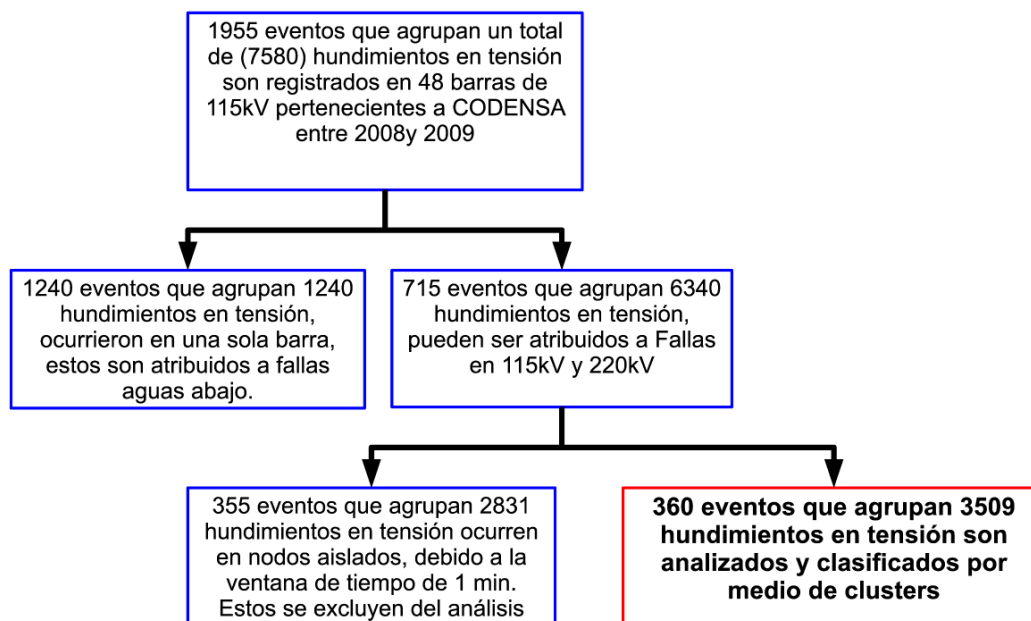


FIGURA 4.13: Información de hundimientos en tensión analizada.

Tal como lo indica la figura 4.13, la información analizada por medio de algoritmos de agrupamiento corresponde a 360 eventos (que se atribuyen a fallas), los cuales ocasionaron 3509 hundimientos en tensión en barras de 115kV pertenecientes a CODENSA.

El resultado del análisis se observa en la tabla 4.4.

TABLA 4.4: Resultado del agrupamiento de hundimientos en tensión ocurridos en barras 115kV de CODENSA

Número de cluster	Número de eventos (Fallas)	Porcentaje de fallas	Tipo de Falla	Número total de hundimientos	Promedio barras afectadas x falla
2	21	5,83 %	1,2,4	727	35
4	225	62,50 %	1,2,3,4	848	4
7	1	0,28 %	1,2,4	47	47
13	3	0,83 %	3	108	36
14	1	0,28 %	1,2,4	46	46
25	1	0,28 %	1	37	37
29	1	0,28 %	2,4	29	29
33	65	18,06 %	1,2,3,4	543	8
35	4	1,11 %	1,2,3,4	82	21
37	1	0,28 %	1,2,4	27	27
47	1	0,28 %	2,4	32	32
48	36	10,00 %	1,2,3,4	983	27

De la tabla 4.4 podemos analizar lo siguiente:

- Los 360 eventos atribuidos a fallas, son clasificados en 12 clusters distintos, el cluster 4 es el que tiene más eventos (225). por otro lado, existen 6 clusters que sólo tienen un evento.
- Para los clusters 4, 33, 35 y 48 no se tiene indicios del tipo de falla sucedido.
- Las fallas que producen más hundimientos están agrupadas en los clusters 48, 4 y 2 con 986, 848 y 727 hundimientos en tensión respectivamente.
- Aunque en el cluster 2 ocurren pocas fallas (21), éstas afectan muchas barras (35), por lo tanto, la cantidad de hundimientos generados es relativamente alta (727).
- De los clusters 2, 7, 14 y 37 se puede determinar que las fallas NO son trifásicas.
- De los clusters 29 y 47 se puede determinar que las fallas son bifásicas o bifásicas a tierra.
- Los clusters 7 y 14 agrupan fallas que ocurren muy poco pero su impacto en las barras es el más alto con 47 y 46 barras promedio afectadas por falla respectivamente.
- Aunque las fallas del cluster 4 ocurren frecuentemente, éstas son las que menos impacto tienen con sólo 4 barras promedio afectadas por falla.

En las figuras 4.14, 4.15, 4.16, 4.17 y 4.18 se observan 5 zonas perturbadoras del sistema que corresponden a la posible ubicación de las fallas de cada cluster.

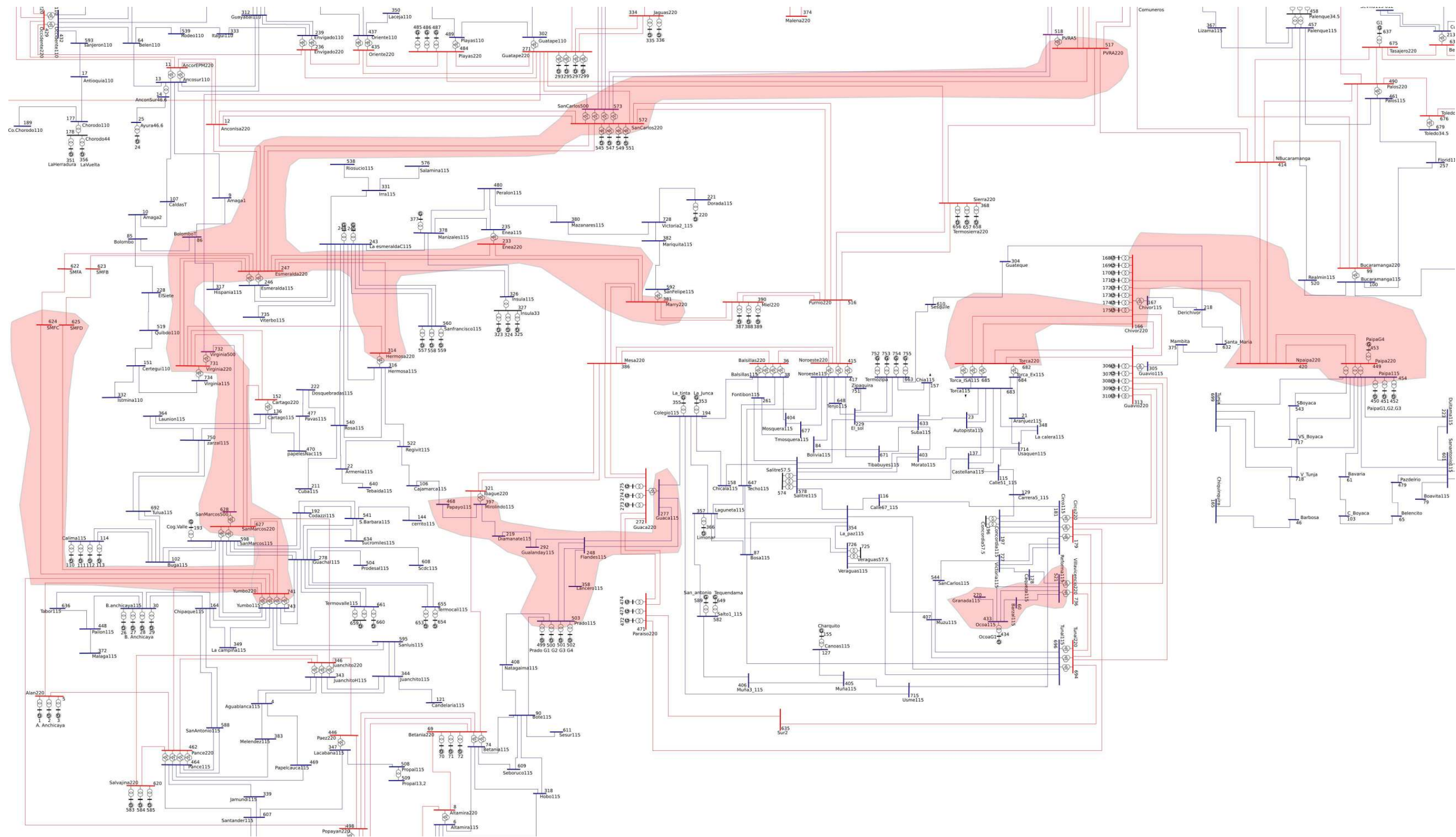


FIGURA 4.14: Zona perturbadora para cluster 4.

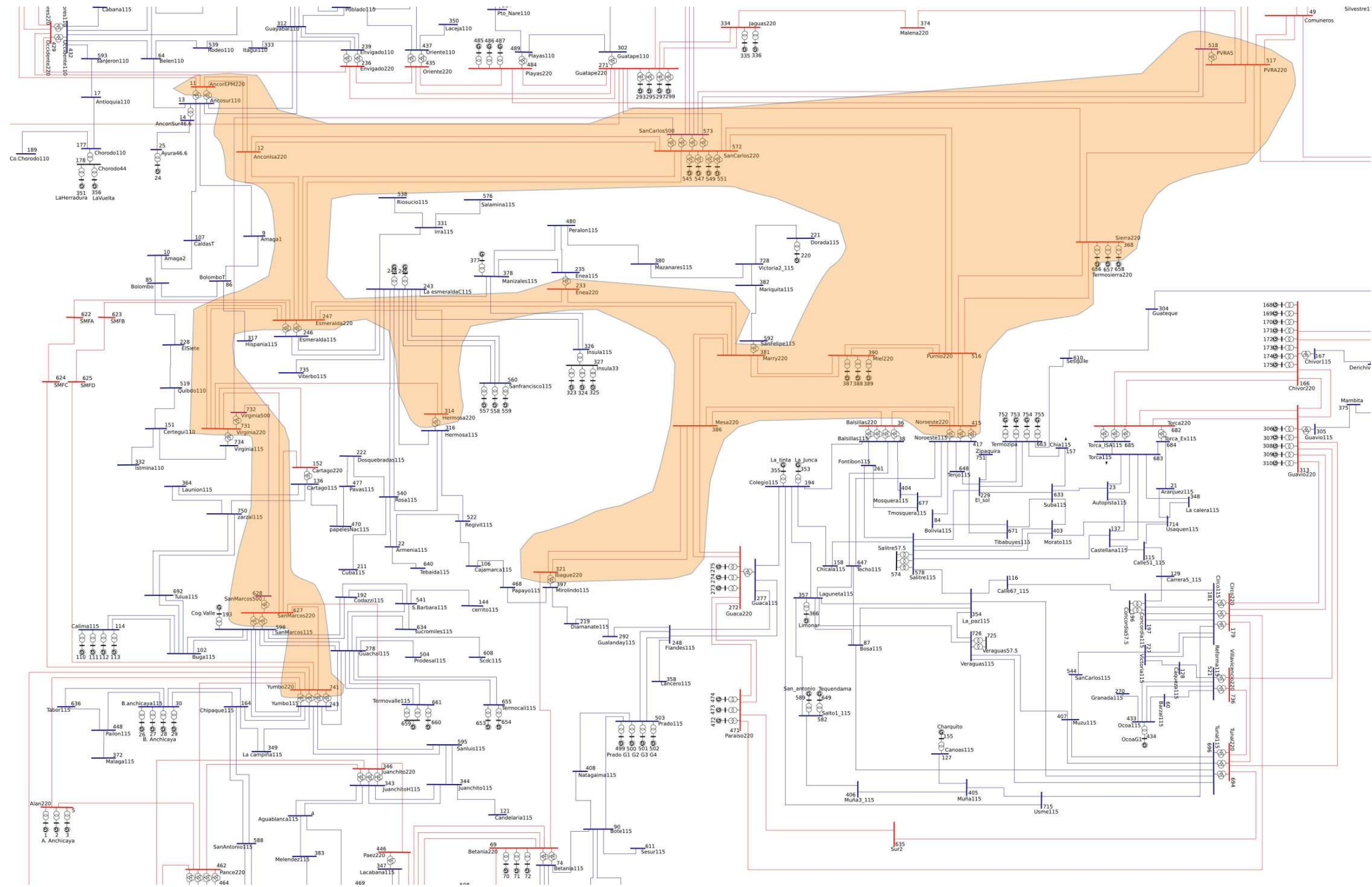


FIGURA 4.15: Zona perturbadora para cluster 33.

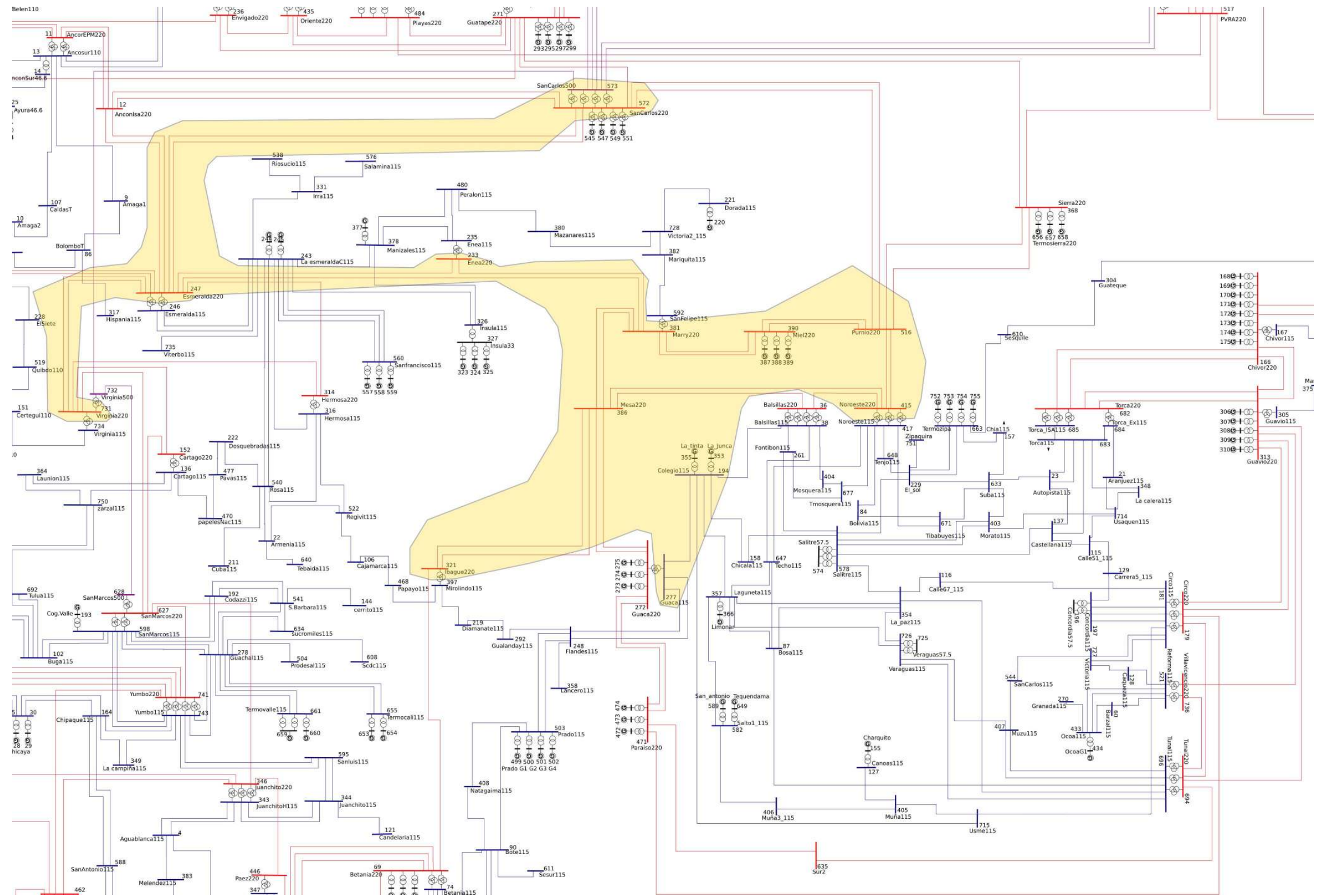


FIGURA 4.16: Zona perturbadora para cluster 48.

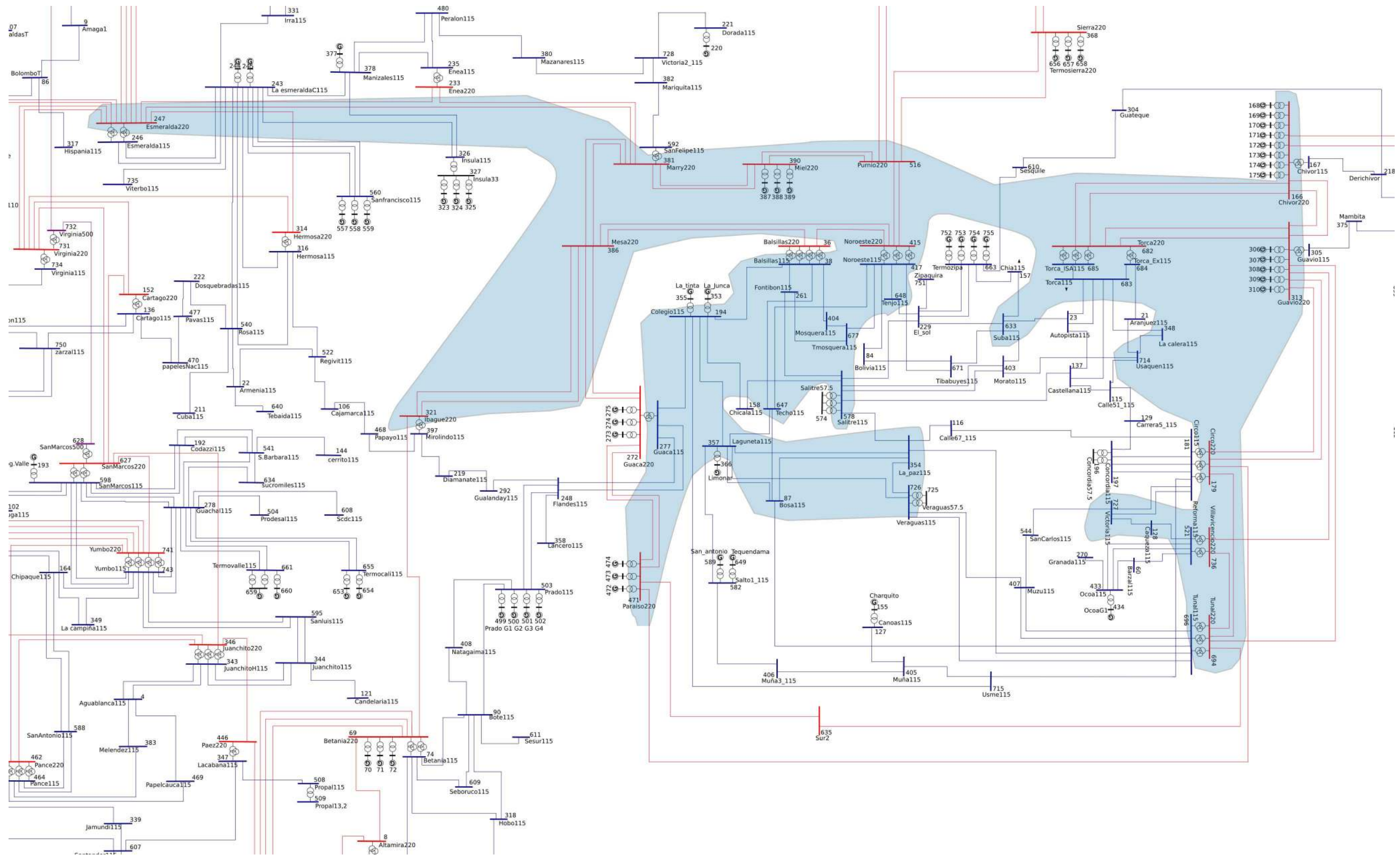


FIGURA 4.17: Zona perturbadora para cluster 2.

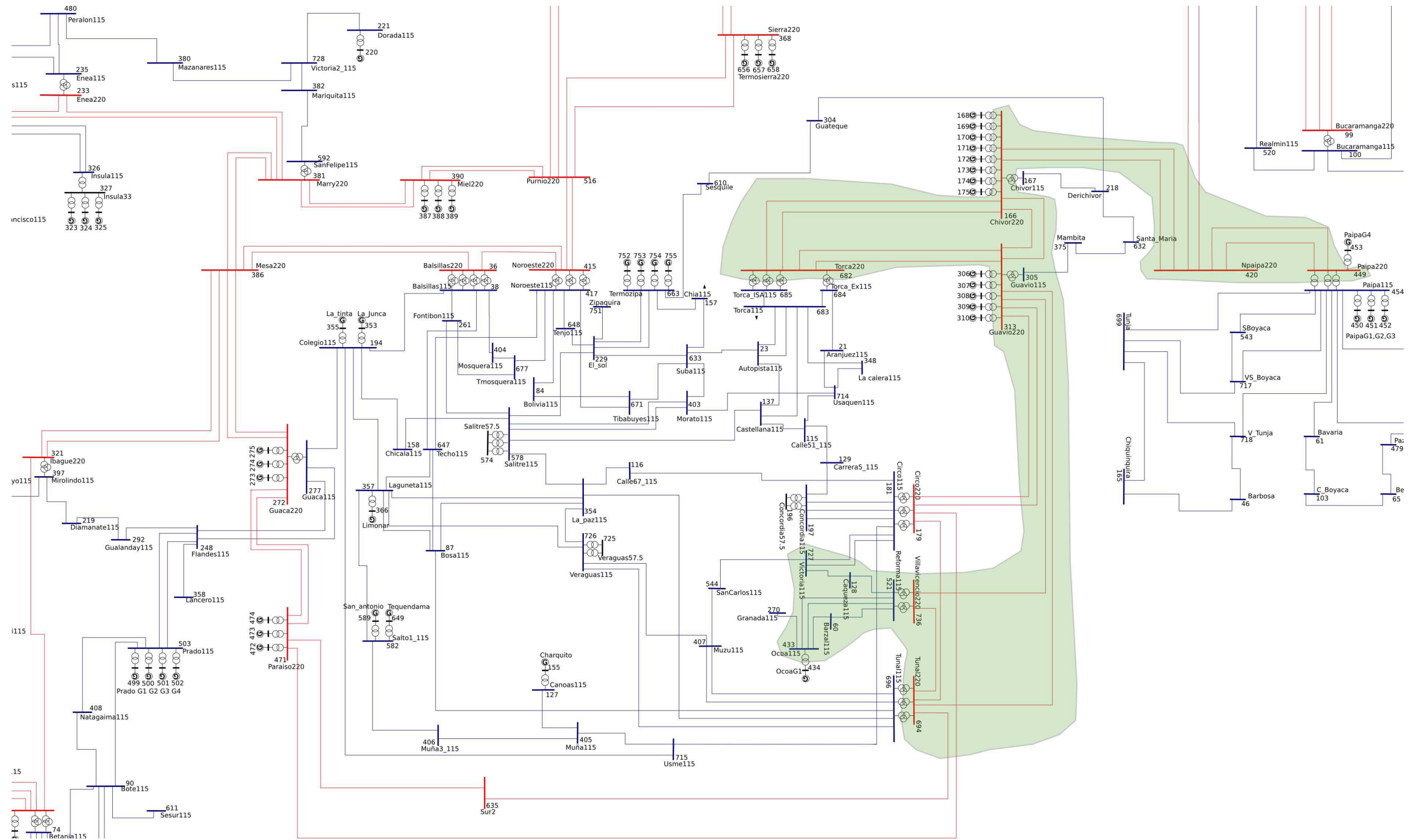


FIGURA 4.18: Zona perturbadora para cluster 35.



En las figuras 4.14, 4.15, 4.16, 4.17 y 4.18 podemos observar lo siguiente:

- Los clusters 4 y 33 agrupan zonas de ocurrencia de falla lejanas en el sistema de transmisión a nivel de 220kV, esto tiene coherencia con la tabla 4.4 donde muestra que estas fallas afectan sólo a unas pocas barras de 115kV de CODENSA.
- El cluster 2 hace referencia a fallas cercanas a las barras de CODENSA, si analizamos nuevamente la tabla 4.4 vemos que fallas en esta zona afectan gran cantidad de barras de 115kV de CODENSA.
- Los clusters 35 y 48 hacen referencia a zonas intermedias del sistema de transmisión cuyas fallas afectan en promedio entre 21 y 27 barras de 115kV de CODENSA. Es de notar que las fallas en el cluster 48 son las que más ocasionan hundimientos en tensión (983).



# Capítulo 5

## Propuesta de evaluación de hundimientos en tensión y desarrollo de software *PQmanager*

En los capítulos anteriores se hicieron distintos análisis de los hundimientos en tensión usando criterios de severidad diferentes. En el capítulo 3 se analizó cómo son los hundimientos en tensión observados en las barras de 115kV y 220kV de Bogotá a partir de fallas simuladas en el sistema Colombiano. Como resultado se identificaron las barras críticas o más perjudicadas evaluando únicamente la profundidad del hundimiento, es decir, que las barras con hundimientos en tensión más profundos se consideran más críticas. Por otro lado en el capítulo 4 se identificaron en cuáles zonas del sistema ocurren las fallas que provocan los hundimientos en tensión registrados por CODENSA S.A. En éste, las fallas que se consideran más críticas son las que generan más hundimientos en tensión en las barras de interés, por lo que podemos interpretar que entre más hundimientos tenga una barra, ésta se considera más crítica, evaluando de esta manera únicamente la cantidad de hundimientos.

Otro aspecto importante que se debe tener en cuenta para la evaluación de hundimientos en tensión es la duración, por lo tanto, con el ánimo de analizar integralmente el impacto de los hundimientos en tensión evaluando magnitud, duración y cantidad, se propone una metodología para el cálculo de un indicador que permite realizar análisis comparativo de hundimientos en tensión entre barras del sistema. Este indicador puede emplearse como una herramienta para el diagnóstico de calidad de potencia en grandes redes de distribución.

En este capítulo se explica detalladamente cómo se pueden evaluar los hundimientos en tensión ocurridos en las barras teniendo en cuenta valores de magnitud, duración y cantidad de hundimientos. En primer lugar se definen diferentes zonas de severidad en cuanto a magnitud y duración de hundimientos en tensión a partir de curvas de inmunidad de distintos equipos eléctricos y electrónicos, con el fin de identificar la severidad de los

hundimientos de acuerdo a su impacto en el funcionamiento de los equipos.

Posteriormente para cada zona se definen valores de referencia en cuanto a cantidad de hundimientos, los cuales se basan en mediciones reales en las barras de CODENSA S.A. Finalmente se propone un indicador de actividad de hundimientos en tensión *IAS* que pondera cada una de las zonas de severidad y caracteriza los hundimientos ocurridos en cada una de las barras del sistema [Romero M. 2010]. Este indicador será de utilidad para realizar análisis comparativos entre barras e identificar zonas críticas, dando soporte al operador de red para aplicar los correctivos necesarios y mejorar la calidad ofrecida a los clientes.

Finalmente en este documento se propone el desarrollo de una herramienta de software para el manejo de información de hundimientos en tensión (además de otras perturbaciones), con la cual los indicadores se calculan de manera práctica y sistemática. En esta herramienta se pone en marcha la propuesta de visualización del indicador *IAS* usando el desarrollo de contornos hecho en el capítulo 3 e integrando nuevas tecnologías de visualización como *Google Maps*.

Esta herramienta puede ser empleada fácilmente por las empresas de distribución de energía en Colombia para hacer seguimiento a los indicadores de calidad de potencia, además puede ser de gran utilidad al ente regulador para establecer los límites para hundimientos de tensión en los sistemas de distribución colombianos.

## 5.1. Definición de regiones de severidad

En la actualidad existen diferentes normas y recomendaciones para clasificar los hundimientos en tensión en una red de distribución, sin embargo existen dificultades a la hora de interpretar los registros obtenidos por los equipos de medida y no siempre resulta fácil determinar cuándo una zona tiene hundimientos de mayor severidad que otra. A manera de ejemplo, en [IEEE1159. 1995] se presenta una clasificación de las variaciones de corta duración como lentas, rápidas y muy rápidas, pero no es posible identificar si es más severo un hundimiento en tensión rápido de 0.15 p.u que uno lento de 0.85 p.u. Por otra parte, no se presentan valores de referencia que permitan determinar cuántos eventos son aceptable en cada categoría. En la referencia [NRS048-2. 1996] y en la versión más reciente [NRS048-2. 2007] se presentan valores de referencia anuales para los hundimientos en tensión clasificados en varias categorías, pero no es posible calificar si un hundimiento de una categoría es más severo que uno de otra, ni tampoco permite comparar la severidad de dos categorías diferentes. La recomendación [IEEE1346. 1996] presenta una metodología muy clara para la construcción de cartas de hundimientos, las cuales superpuestas con las curvas de inmunidad de equipos permiten determinar el número de eventos en tensión perjudiciales para ese equipo anualmente, sin embargo desde el punto de vista práctico podría resultar dispendiosa su aplicación en un gran sistema de distribución, sobre todo

a la hora de realizar análisis comparativos. Para clasificar los hundimientos se harán las siguientes consideraciones:

1. La Duración del sag se entiende como la diferencia en tiempo entre el momento en que el valor eficaz de alguna de las fases cae por debajo del nivel de detección y el momento en que los valores eficaces de todas las fases se han recuperado [IEC61000-4-30. 2003].
2. Tal como se mencionó en el capítulo 1, la Magnitud del hundimiento se entiende como la mínima tensión detectada en las fases durante el hundimiento en tensión, medida en porcentaje o en por unidad con respecto a una tensión de referencia.
3. La severidad de un hundimiento en tensión depende tanto de su duración como de su magnitud.
4. hundimientos en tensión con diferentes características de magnitud y duración pueden tener la misma severidad.
5. La severidad de un hundimiento en tensión es mayor respecto a otro, para mayores profundidades con la misma duración o para mayores duraciones con la misma profundidad.

Teniendo en cuenta lo anterior, consideramos  $S$  como cierto nivel de severidad, en función de la duración y la magnitud  $S(d_i, m_i)$ , por lo que existe un conjunto de parejas  $(d_i, m_i)$  que tienen un mismo nivel de severidad. Este conjunto de parejas, describe una curva iso-severidad para cierto nivel  $S_k$  tal como se muestra en la figura 5.1.

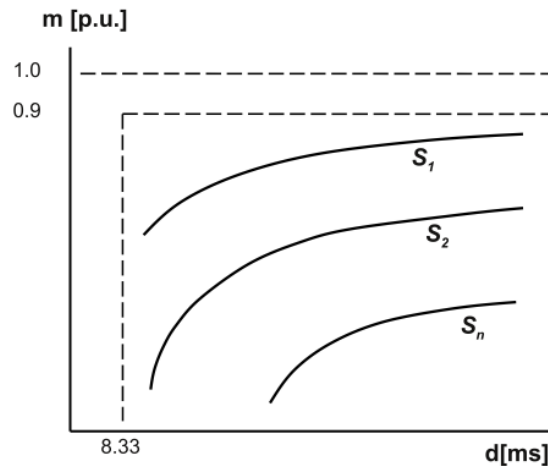


FIGURA 5.1: Curvas iso-severidad de hundimientos en tensión

Así como lo indica la figura 5.1 debe cumplirse  $S_1 < S_2 < \dots < S_n$ , y por lo tanto para  $n$  curvas se delimitan  $n + 1$  zonas de severidad de hundimientos en tensión. Teniendo en

cuenta lo anterior, podemos considerar que una curva iso-severidad es equivalente a una curva de inmunidad de algún equipo conectado a un sistema de distribución. Con el ánimo de establecer curvas con distinto nivel de severidad, se hizo una compilación de curvas de inmunidad típicas para los equipos eléctricos y electrónicos más comunes. Las curvas consideradas son:

1. Curva ITIC [ITIC. 2000] aplicable a equipos de tecnología de información
2. La curva SEMI aplicable a semiconductores [IEEE1100. 2005]
3. Curvas de lámparas de sodio de alta presión [Douglas S. 1997]
4. Variadores de velocidad [Bollen M. 2000]
5. Controlador lógico programable PLC [IEEE1346. 1996, EPRI. 2000]

Las curvas mencionadas se resumen en la figura 5.2.

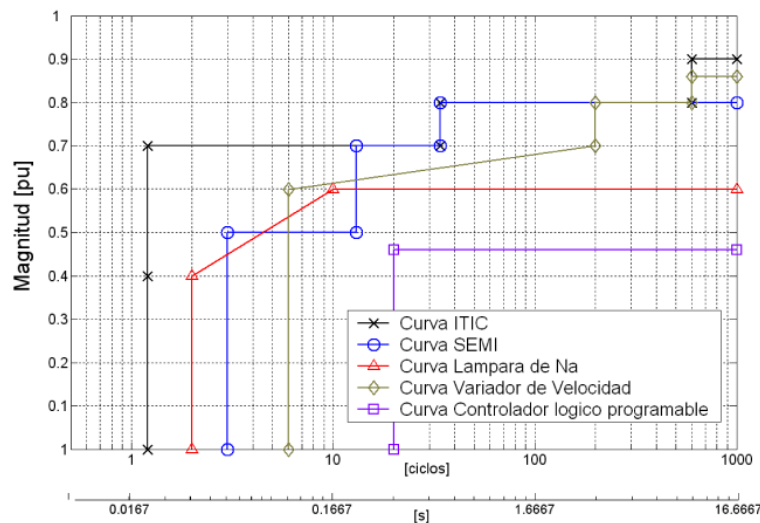


FIGURA 5.2: Comparación de curvas de inmunidad de equipos típicos

Al comparar estas curvas, es posible considerar tres regiones delimitadas por dos curvas extremas:

- Curva de menor inmunidad, Está formada por la curva ITIC con parte de la SEMI y la de variadores de velocidad.
- Curva de mayor inmunidad, Está formada por la curva de controladores lógicos programables-PLC.

A continuación se propone utilizar las dos curvas de inmunidad identificadas a manera de curvas iso-severidad, como se muestra en la figura 5.3 , las cuales describen el comportamiento para los equipos más y menos robustos de la red de distribución ante hundimientos en tensión. Tomando estas dos curvas iso-severidad se establecen tres regiones:

- Región de hundimientos en tensión tipo *M* (moderados). En la cual, a pesar de que ocurran hundimientos en tensión, se tiene una baja probabilidad de que algún equipo vea afectada su operación o condición de funcionamiento.
- Región de hundimientos en tensión tipo *S* (severos). En la cual los hundimientos en tensión pueden sacar de funcionamiento a algunos equipos pero a otros no.
- Región de hundimientos en tensión tipo *C* (críticos). En la cual un hundimiento en tensión saca de funcionamiento a cualquier equipo del sistema.

En la Figura 5.3 se presentan las zonas descritas.

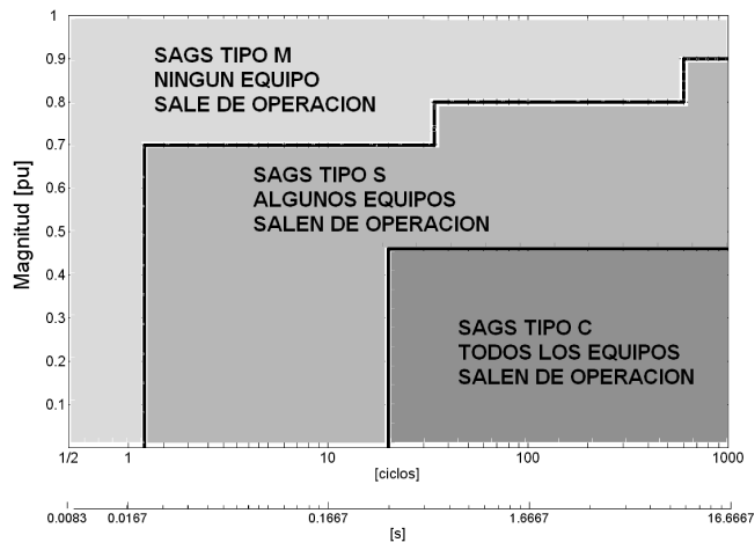


FIGURA 5.3: Categorías de Sags M, S y C propuestas

Es posible considerar que desde el punto de vista de la operación de un equipo, es preferible estar expuesto a un hundimiento en tensión moderado que a uno severo, es preferible estar expuesto a un hundimiento en tensión severo que a uno crítico o a uno moderado que a uno crítico. Por lo tanto, el ordenamiento de las preferencias se puede expresar según (5.1):

$$M \prec S \prec C \quad (5.1)$$

En donde la ocurrencia de un hundimiento en tensión tipo C debe ser considerada como un evento de mayor severidad con respecto a la ocurrencia de uno tipo S, y de igual manera en los otros casos.

## 5.2. Valores de referencia para las categorías de sags

Para el análisis comparativo es necesario definir valores de referencia que sirvan para establecer cuándo una subestación o un circuito tiene niveles aceptables o inaceptables de hundimientos en tensión. Existen pocas referencias al respecto, entre ellas está la norma surafricana [NRS048-2. 1996] y su versión más reciente [NRS048-2. 2007]. En estas normas se definen rangos de profundidad y duración para los sags, la Tabla 5.1 muestra los rangos vigentes actualmente, denominados  $Y$ ,  $X_1$ ,  $X_2$ ,  $S$ ,  $T$ ,  $Z_1$  y  $Z_2$ . Estas categorías están relacionadas con posibles causas de hundimientos en tensión, de manera que su utilización no sólo permite clasificar los hundimientos sino también asociarlos con alguna causa posible.

TABLA 5.1: Rangos de tensión residual  $U$  en % y duración para hundimientos de tensión según la norma NRS 048-2 2007

$U$ [%]	Duración		
	$20 < t \leq 150\text{ms}$	$150 < t \leq 600\text{ms}$	$0.6 < t \leq 3\text{s}$
$90 > U \geq 85$	$Y$		
$85 > U \geq 80$			
$80 > U \geq 70$	$X_1$	$S$	$Z_1$
$70 > U \geq 60$			
$60 > U \geq 40$			$Z_2$
$40 > U \geq 0$	$T$		

En [NRS048-2. 2007] se presentan valores característicos de hundimientos para el 95 % y el 50 % de los sitios en los sistemas de distribución sudafricanos, resumidas en la tabla 5.2, que representan la cantidad de hundimientos que experimentan, a lo sumo, el 95 % o el 50 % de los sitios medidos. Para comparar los datos de actividad de hundimientos en Bogotá se empleará el percentil de 95 %.

A partir de la exigencia por parte de la CREG de instalar equipos de medición en los sistemas de distribución, empresas de distribución como CODENSA en Bogotá han hecho un esfuerzo para en instalar y poner en funcionamiento tales sistemas de medición. Actualmente la empresa dispone de casi dos años continuos de medición de parámetros de calidad de energía eléctrica, entre ellos hundimientos en tensión. El Grupo de

TABLA 5.2: Valores característicos de hundimientos en tensión relacionados en la norma NRS-048-2 2007 para el 95 % de sitios y 50 % en paréntesis

Tensión Nominal	Número de hundimientos por año					
	Categoría de hundimiento					
	$X_1$	$X_2$	$T$	$S$	$Z_1$	$Z_2$
6.6-44 kV (rural)	85 (13)	210 (12)	115 (10)	400 (13)	450 (11)	450 (10)
6.6-44 kV	20 (7)	30 (7)	110 (7)	30 (6)	20 (3)	45 (4)
44-132 kV	35 (13)	35 (10)	25 (5)	40 (7)	40 (4)	10 (2)
220-765 kV	30 (8)	30 (9)	20 (3)	20 (2)	10 (1)	5 (1)

Investigación PAAS a través del proyecto [CLUSTERS. 2010] tiene información disponible de hundimientos en tensión detectados durante dos (2) años en las barras de 11.4kV, 13.2kV, 34.5kV, 57.5kV y 115kV del sistema eléctrico de distribución en Bogotá.

Vale la pena observar que en la norma sudafricana se definen hundimientos a partir de 20ms, periodo de la señal de 50Hz, hasta 3 segundos. Dado que en Colombia se ha definido la duración del sag entre 8.33ms y 60s, se definen algunas categorías complementarias que permitan incluir toda la información registrada, denominadas  $Y$ ,  $X_{1A}$ ,  $X_{2A}$ ,  $T_A$ ,  $Y_M$ ,  $Z_{1M}$  y  $Z_{2M}$ , en la Fig.5.4 se ilustran gráficamente estas categorías adicionales.

Por otra parte, con el fin de obtener análisis periódicos de los hundimientos en tensión, se establece que el periodo de evaluación de hundimientos en tensión puede ser:

- *Mensual.* De tal manera que se reporten los hundimientos en tensión con el resto de perturbaciones de calidad de Potencia.
- *Trimestral.* Con el ánimo de armonizar la información de hundimientos con respecto a la de interrupciones, que en Colombia se evalúan en intervalos de tiempo trimestrales.

Se considerarán en esta sección valores de referencia trimestrales. Los valores de la norma sudafricana son solamente anuales por lo que en este trabajo se divide por cuatro el valor anual para obtener un estimado de los valores trimestrales. Las Tablas 5.3 y 5.4 muestran la cantidad de eventos permitida para cada tipo de hundimiento.

TABLA 5.3: Valores de referencia propuestos por la norma surafricana NRS 048-2 2007 (cantidad de hundimientos)

Categoría	Media Tensión		Alta Tensión	
	Año	Trimestre	Año	Trimestre
Y	-	-	-	-
$X_1$	20	7	35	12
$X_2$	30	10	35	12
T	110	37	25	9
S	30	10	40	14
$Z_1$	20	7	40	14
$Z_2$	45	15	10	4
$Y_A$	-	-	-	-
$X_{1A}$	-	-	-	-
$X_{2A}$	-	-	-	-
$T_A$	-	-	-	-
$Y_M$	-	-	-	-
$Z_{1M}$	-	-	-	-
$Z_{2M}$	-	-	-	-

TABLA 5.4: Valores de referencia para Bogotá basados en la norma sudafricana NRS048-2 2007(cantidad de hundimientos)

Categoría	Media Tensión		Alta Tensión	
	Año	Trimestre	Año	Trimestre
Y	540	240	345	160
$X_1$	20	8	5	2
$X_2$	15	5	4	2
T	45	10	15	1
S	55	20	10	5
$Z_1$	25	6	4	1
$Z_2$	25	8	4	1
$Y_A$	190	60	145	95
$X_{1A}$	4	1	4	1
$X_{2A}$	4	1	4	1
$T_A$	10	1	10	1
$Y_M$	15	2	10	10
$Z_{1M}$	4	1	4	1
$Z_{2M}$	15	5	4	1

Comparando los valores anteriores se puede observar que, en general, existen diferencias significativas entre los valores de referencia de Bogotá y los presentados en [NRS048-2. 2007], por lo cual no es recomendable emplear estos últimos como referencia normativa o regulatoria en Colombia. Es importante resaltar que los valores presentados en el presente documento son una primera aproximación de valores de referencia para hundimientos en tensión en Colombia.

Para poder definir valores de referencia de hundimientos en tensión en cada una de las categorías de severidad definidas en la figura 5.3, se analizaron gráficamente las categorías de severidad y las categorías de hundimientos en tensión propuestas en [NRS048-2. 2007]. Se asumió que los eventos se distribuyen uniformemente con respecto a la duración y

la magnitud, como se ilustra en la Figura 5.4. Se debe tener en cuenta que esta norma está diseñada para sistemas a 50 Hz, por lo cual las categorías propuestas se han marcado con la duración en ciclos y también su correspondiente valor en milisegundos, permitiendo considerar un sistema con frecuencia nominal de 60Hz como el caso colombiano.

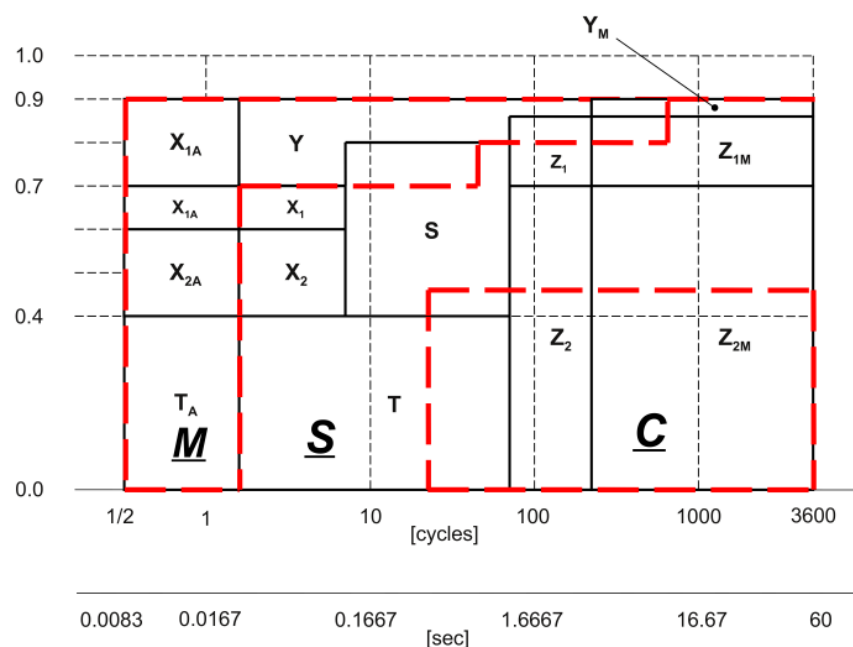


FIGURA 5.4: Superposición de categorías de la NRS 048-2 y las propuestas

Teniendo en cuenta que [CREG 024. 2005] exige reportes semanales, es muy fácil para una empresa de distribución construir consolidados trimestrales o anuales de hundimientos de tensión por punto de medida para hacer diagnóstico del sistema.

Con base en el análisis gráfico, se determinan los valores de referencia anuales y trimestrales para Bogotá en cada categoría de severidad propuesta<sup>1</sup>, los resultados son presentados en la Tabla 5.5.

Los resultados muestran, como es de esperarse, un valor de referencia mayor para hundimientos en tensión moderados, menor para hundimientos severos y mucho menor para críticos. De igual manera se observa menos cantidad de eventos en mayores niveles de tensión.

<sup>1</sup>En la NRS 048-2:2007 los límites se presentan para tensiones entre 6.6kV y 44kV que equivalen a los sistemas de distribución colombianos en 11.4kV, 13.2kV y 34.5kV, en este documento se denominarán (MT), y los límites de 44kV-132kV que equivalen a los sistemas de distribución colombianos a 44kV, 57.5kV y 115kV se denominarán (AT).

TABLA 5.5: Valores de referencia para las categorías  $M$ ,  $S$  y  $C$  basado en las mediciones en Bogotá para Media Tensión (MT) y Alta Tensión (AT)

Categoría	Anuales		Trimestrales	
	MT	AT	MT	AT
$M$	769	513	309	261
$S$	148	43	44	19
$C$	50	13	14	2
TOTAL	967	568	368	282

### 5.3. Definición del Índice de Actividad de Sags IAS

Dado que se busca obtener un indicador general de calidad en términos de hundimientos en tensión siguiendo a [Cajamarca. 2006], se debe establecer una relación funcional que asigne un valor real al índice  $IAS$  entre cero y uno, donde  $1$  representa el mejor escenario de calidad y  $0$  el peor escenario de calidad.

$$IAS^i = \sum_{x \in I} w_x A_x^i \quad (5.2)$$

Donde:

- $IAS^i$ : Índice de actividad de Sags en el punto de medida  $i$ .
- $A_x^i$ : Calificación de la categoría  $X$  de sags en el punto de medida  $i$  (entre 0 y 1).
- $w_x$ : Ponderación de la categoría  $x$  de Sags (entre 0 y 1).
- $I$ : Categorías de Sags,  $I = \{M, C, S\}$ .

Se debe encontrar entonces la manera de definir la ponderación y después hacer una normalización del atributo o calificación de la categoría [Cajamarca. 2006], lo cual se desarrollará en las siguientes secciones.

#### 5.3.1. Definición de ponderadores para cada una de las categorías

En la ponderación se debe tener en cuenta que los hundimientos críticos deben ser castigados de una manera más estricta que los moderados o severos. Por otra parte, dado que se requiere un indicador  $IAS$  normalizado, los pesos de cada categoría de hundimientos se establecen como porcentaje de un gran total.

Para la determinación de las ponderaciones, se propone en esta investigación emplear una ponderación inversa, tomando como referencia los valores listados en la Tabla 5.5, los cuales se nombran como  $M_{ref}$ ,  $S_{ref}$ ,  $C_{ref}$ . En (5.3) se muestra a manera de ejemplo el cálculo del

ponderador para hundimientos moderados.

$$w_M = \frac{1/M_{ref}}{1/M_{ref} + 1/S_{ref}1/C_{ref}} \quad (5.3)$$

Los resultados obtenidos son presentados en la tabla 5.6 para análisis anuales y en la Tabla 5.6 para análisis trimestrales. Con el ánimo de evitar el empleo de factores con muchas cifras significativas, se propone adicionalmente una ponderación aproximada.

TABLA 5.6: Valores de referencia, ponderaciones calculadas según (5.3) y ponderaciones para cada categoría de severidad según nivel de tensión, valores anuales

Categoría	Media Tensión			Alta Tensión		
	Valor	$w_x$	$w_x$ prop	Valor	$w_x$	$w_x$ prop
<i>M</i>	769	0.0464	5 %	513	0.0186	2 %
<i>S</i>	148	0.2415	25 %	43	0.2232	23 %
<i>C</i>	50	0.7121	75 %	13	0.7582	75 %
TOTAL	967	1.0000	100 %	568	1.0000	100 %

TABLA 5.7: Valores de referencia, ponderaciones calculadas según (5.3) y ponderaciones para cada categoría de severidad según nivel de tensión, valores trimestrales

Categoría	Media Tensión			Alta Tensión		
	Valor	$w_x$	$w_x$ prop	Valor	$w_x$	$w_x$ prop
<i>M</i>	309	0.0339	4 %	261	0.0072	1 %
<i>S</i>	44	0.2355	23 %	19	0.0974	9 %
<i>C</i>	14	0.7306	73 %	2	0.8953	90 %
TOTAL	368	1.0000	100 %	282	1.0000	100 %

El cálculo del *IAS* para MT será, por ejemplo para cantidades trimestrales, como aparece en (5.4) y para AT como aparece en (5.5).

$$IAS^i = 0,04A_{M_{MT}}^i + 0,23A_{S_{MT}}^i + 0,73A_{C_{MT}}^i \quad (5.4)$$

$$IAS^i = 0,01A_{M_{AT}}^i + 0,09A_{S_{AT}}^i + 0,90A_{C_{AT}}^i \quad (5.5)$$

### 5.3.2. Normalización del número de hundimientos por cada categoría de severidad

Para la normalización del número de hundimientos observados en cada categoría de severidad, se emplea la expresión propuesta en [Cajamarca. 2006], la cual es presentada nuevamente en (5.6):

$$A_X^i = \frac{1}{A_0} \left[ 1 - \frac{1}{e^{2(\Delta - kX_{meas}^i)} + 1} \right] \quad (5.6)$$

$$A_0 = \frac{e^{2\Delta}}{e^{2\Delta} + 1}$$

Donde:

- $k$ ,  $\beta$  y  $\Delta = kX_{ref}$ : Parámetros de ajuste de la función de normalización
- $X_{ref}$ : Nivel de referencia o valor crítico para sags  $X \in \{M, C, S\}$  (valor de referencia trimestral o anual).
- $X_{meas}^i$ : Nivel de la perturbación en el punto  $i$ , es decir, número de sags de categoría  $X$  medidos en el trimestre o en el año de estudio en el punto  $i$ .
- $A_X^i$ : Atributo normalizado en el punto  $i$  para la categoría de sags  $X$ .

La función anterior arroja una valoración de los hundimientos en tensión con respecto al valor de referencia. Si el número de hundimientos de categoría  $X$  detectados en el punto  $i$  es igual al valor de referencia, la función  $A_X^i$  tendrá un valor de 0.2, para valores de hundimientos detectados mayores la función tendrá valores que tienden a cero. Para números de hundimientos inferiores se tienen valores de la función mayores, particularmente para  $X_{ref}/(1 + \beta)$  la función es aproximadamente 0.5. La Figura 5.5 muestra un ejemplo de función de normalización con parámetros  $\beta = 0,5$ ,  $k = 0,1452$  y  $\Delta = 1,4525$ .

Los parámetros de las funciones de normalización para cualquier categoría o valor de referencia se pueden obtener por medio del siguiente procedimiento:

1.  $k^0 = 0,1$ ,  $\beta = 0,5$ ,  $\Delta^0 = k^0 X_{ref}$ ,  $A_0^0 = \frac{e^{2\Delta^0}}{e^{2\Delta^0} + 1}$

2. despejar  $k^1$  a partir de:

$$\ln \left[ \frac{A_X(X_{ref})A_0^0}{1 - A_X(X_{ref})A_0^0} \right] = -2k^1\beta X_{ref}$$

donde  $A_X(X_{ref}) = 0,2$

3.  $\Delta^1 = k^1 X_{ref}$ ,  $A_0^1 = \frac{e^{2\Delta^1}}{e^{2\Delta^1} + 1}$

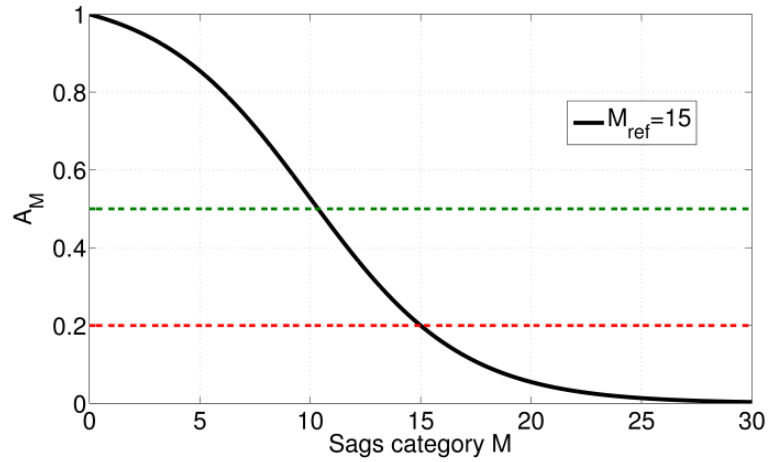


FIGURA 5.5: Función de normalización

4. Volver a 2. y 3. para obtener  $k^2$  y  $\Delta^2$
5. Continuar hasta que  $|k^{i+1} - k^i| < 0,00005$  y  $|\Delta^{i+1} - \Delta^i| < 0,00005$ .

Las funciones de normalización calculadas para los valores de referencia de las Tablas 5.6 y 5.7, se muestran en las Figuras 5.6 y 5.7, respectivamente.

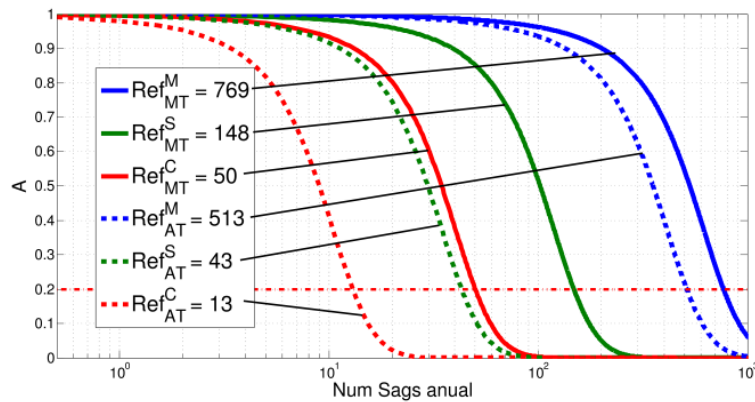


FIGURA 5.6: Funciones de normalización anuales para MT y AT

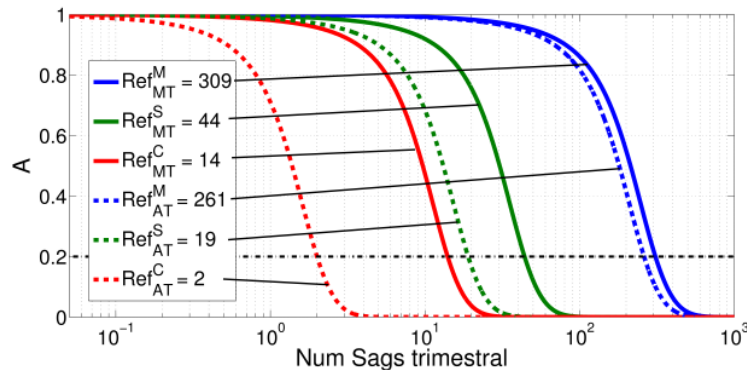


FIGURA 5.7: Funciones de normalización trimestrales para MT y AT

### 5.4. Ejemplo de comparación de hundimientos en tensión entre subestaciones

En las tablas 5.8 y 5.9 se presentan ejemplos de evaluaciones en el primer trimestre del año 2009 del indicador *IAS* en cuatro puntos de medida distintos para cada nivel de tensión. Para dar una interpretación cualitativa del *IAS* se puede decir que valores por encima de 0.70 son aceptables, ya que estos valores se dan cuando no hay eventos críticos y hay eventos moderados o severos, en este escenario muchos equipos serán capaces de tolerar los hundimientos en tensión y algunos pocos no, por esta razón se considera a este rango de *IAS* aceptable. Por el otro extremo, el mayor valor de *IAS* posible cuando se presentan eventos críticos es 0.25, asociado a este escenario cualquier equipo que experimente los hundimientos en tensión saldrá de operación, de manera que este rango es inaceptable. Para valores de *IAS* entre 0.25 y 0.70 una cantidad considerable de equipos se verán afectados, muchos más que en el rango aceptable, por esto se puede denominar a este rango conflictos con clientes. La tabla 5.10 resume la interpretación descrita.

TABLA 5.8: Evaluación del indicador *IAS* en cuatro puntos de medida en subestaciones distintas de MT en el primer trimestre de 2009

Categoría	Nivel Ref	Pond [%]	S/E 1		S/E 2		S/E 3		S/E 4	
			Sags	$A_X$	Sags	$A_X$	Sags	$A_X$	Sags	$A_X$
M	309	4.0	36	0.967	162	0.686	154	0.713	71	0.918
S	44	23.0	96	0.001	41	0.253	37	0.336	18	0.796
C	14	73.0	51	0.000	7	0.711	3	0.926	0	1.000
IAS			0.039		0.604		0.782		0.950	

A continuación, se analizan los resultados del ejemplo. Para media tensión, Tabla 5.8 la subestación 1 tiene una actividad de hundimientos elevada, mayor que la de la subestación 2, que a su vez es mayor que la de las subestaciones 3 y 4. Las subestaciones 3 y 4 tienen *IAS*

5.4. EJEMPLO DE COMPARACIÓN DE HUNDIMIENTOS EN TENSIÓN ENTRE SUBESTACIONES

TABLA 5.9: Evaluación del indicador  $IAS$  en cuatro puntos de medida en subestaciones distintas de AT en el primer trimestre de 2009

Categoría	Nivel Ref	Pond [%]	S/E 1		S/E 2		S/E 3		S/E 4	
			Sags	$A_X$	Sags	$A_X$	Sags	$A_X$	Sags	$A_X$
M	261	1.0	1421	0.000	35	0.960	21	0.979	9	0.992
S	19	9.0	30	0.019	3	0.951	2	0.971	0	1.000
C	2	90.0	0	1.000	0	1.000	0	1.000	0	1.000
IAS			0.902		0.995		0.997		1.000	

TABLA 5.10: Interpretación de los valores entregados por el índice  $IAS$

Rango $IAS$	Interpretación
$1,00 \geq IAS > 0,70$	Aceptable
$0,70 \geq IAS > 0,25$	Conflictos con clientes
$0,25 \geq IAS \geq 0,00$	Inaceptable

por encima de 0.70, de manera que esas subestaciones están en una condición aceptable. La subestación 2 tiene un  $IAS$  valores menor que 0.70 y mayor que 0.25, esto indica una actividad de hundimientos que puede afectar a gran cantidad de usuarios, algunos de los cuales se verán significativamente afectados. La subestación 1 tiene la peor condición de calidad, con un  $IAS$  menor que 0.25. Para los puntos de alta tensión relacionados en la tabla 5.9 se tiene que todas tienen valores de  $IAS$  por encima de 0.70, de manera que la valoración será aceptable. Vale la pena resaltar los hundimientos experimentados por la subestación 1, la categoría de hundimientos moderados tiene valor  $A_M = 0,0$ , efecto de una actividad de hundimientos muy intensa, sin embargo el indicador  $IAS$  sigue siendo aceptable.

La Fig. 5.8 muestra la función de probabilidad del indicador  $IAS$  para todos los puntos de medida de MT en Bogotá. La gráfica muestra que no menos del 92% de los puntos de medida están por encima de 0.70 en  $IAS$ , y menos del 3% por debajo de 0.25.

La tabla 5.11 muestra el porcentaje de puntos de medida evaluados de la ciudad de Bogotá de acuerdo con la valoración de la Tabla 5.10.

De acuerdo con lo anterior es necesario resaltar que la calificación del  $IAS$  puede ser

TABLA 5.11: Evaluación trimestral del índice  $IAS$  en todas los puntos de medida en MT y AT de Bogotá

Valoración	Punto de medida		
	Todas	MT	AT
Aceptable	90.61 %	91.40 %	100.00 %
Conflictos con clientes	6.63 %	5.91 %	0.00 %
Inaceptable	2.76 %	2.69 %	0.00 %

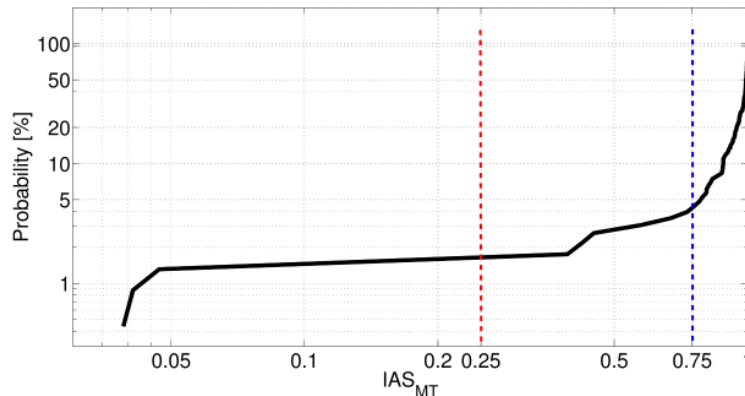


FIGURA 5.8: Probabilidad trimestral *IAS* MT

aceptable aunque la actividad de hundimientos sea muy intensa en la categoría de severidad moderada, lo cual es resultado de la ponderación. Por otra parte, la calificación del *IAS* puede ser la misma entre dos puntos de medida, por ejemplo, en un primer punto de medida puede ocurrir un único hundimiento muy severo, y en otro punto de medida pueden presentarse muchos hundimientos moderados, la interpretación que puede darse a esta situación es que ambas condiciones pueden ser igualmente perjudiciales. Teniendo en cuenta lo anterior, la valoración del indicador *IAS* queda abierta para discusión.

Empleando esta metodología, es posible identificar qué áreas geográficas tienen una actividad de hundimientos en tensión aceptable o inaceptable. A continuación se muestra el desarrollo de una herramienta de software donde se aplica esta metodología de evaluación de hundimientos en tensión de manera rápida y sistemática, permitiendo visualizar distintos tipos de indicadores estadísticos para un intervalo de tiempo determinado. La herramienta también permite identificar zonas geográficas con problemas de hundimientos en tensión a partir de contornos iso-*IAS* desarrollados sobre la plataforma *GOOGLE MAPS*.

## 5.5. Diseño de la herramienta de software *PQmanager*

Con el fin de aplicar la metodología para evaluar los hundimientos en tensión de manera sistemática en los datos reales registrados por CODENSA S.A., se propone este documento la implementación de un sistema de gestión de información web para el cálculo y evaluación de índices de calidad de potencia y detección de zonas críticas en el sistema de distribución de la ciudad. El sistema propuesto integra herramientas de software libre tales como *MYSQL*, *PHP5* y *APACHE* para recoger, filtrar y guardar en una base de datos la información de perturbaciones de calidad registradas continuamente en las barras del sistema de distribución.

Con la información recopilada, se realizan los análisis estadísticos apropiados para

determinar índices de calidad de potencia en cuanto a hundimientos en tensión (entre otros Pst, Desbalance, Elevaciones de tensión) y establecer las condiciones de cada una de las barras del sistema. Los resultados se pueden visualizar como mapas de calidad de potencia donde se pueden detectar zonas con condiciones críticas. Esta puede ser una herramienta útil y fácil de implementar por el operador de red.

El aplicativo es diseñado de acuerdo a las perturbaciones que deben registrar los operadores de red según la resolución CREG 024 de 2005. El sistema de medición implementado por CODENSA S.A. debe registrar perturbaciones de estado estacionario cada 10 minutos y eventos de tensión cada vez que estos ocurren. Por lo tanto dentro del aplicativo se implementan las herramientas para centralizar la información de calidad de potencia y archivarla de una manera fácil y práctica para realizar el respectivo cálculo de índices de calidad. El operador de red puede aplicar las metodologías de análisis sistemáticamente y evaluar distintos datos a través del tiempo.

### 5.5.1. Estructura del aplicativo propuesto

El sistema web de administración gestiona información de calidad de potencia del operador de red CODENSA S.A. el cual tiene en funcionamiento desde octubre de 2007 un sistema de medición y adquisición de perturbaciones de calidad. Este sistema cuenta con 290 medidores de calidad de potencia los cuales están distribuidos en el área urbana de Bogotá y en zonas rurales aledañas. En las áreas urbanas, los medidores de calidad son conectados a través del sistema de comunicaciones de cada subestación por medio de redes de fibra óptica, posteriormente la información es centralizada en el centro de control a través de redes LAN. En las áreas rurales cercanas los medidores de calidad de potencia son interconectados por medio de tecnología GPRS por lo que la información es llevada al centro de control.

El sistema de adquisición de información es configurado para registrar perturbaciones de estado estable cada 10 minutos y eventos en tensión según el standard IEC61000-4-30 donde se mencionan las especificaciones para equipos clase A.

El aplicativo propuesto consta de un servidor donde se almacena toda la información que viene de los medidores de calidad. Esta información puede ser gestionada a través de una interfaz gráfica tipo web dentro aplicativo. Cualquier usuario que cuente con una conexión a Internet y los respectivos privilegios de administración o visualización puede realizar las actividades necesarias sobre la información de calidad.

La aplicación consta inicialmente de 5 pestañas para realizar las actividades de manejo de datos de calidad de potencia:

1. **Home.** Se mencionan las características del aplicativo, el alcance y el proyecto en donde se desarrolla esta actividad.

2. **Administración.** El usuario puede administrar la entrada de datos a la base, revisar información errónea y obtener información detallada de cada barra registrada.
3. **Indicadores Calidad de Potencia.** El usuario puede calcular los indicadores de calidad para todas las subestaciones, para un grupo de barras o para un punto específico del sistema de distribución en un intervalo de tiempo determinado.
4. **Mapas de calidad de potencia.** El usuario puede visualizar los indicadores de cada perturbación en mapas geográficos en los cuales se pueden identificar zonas críticas del sistema.
5. **Medición eficiente.** El usuario puede visualizar detalladamente los fenómenos de tensión que ocurren en una zona crítica determinada en la cual se está midiendo con los equipos instalados en los usuarios.

En la figura 5.9 se puede observar un resumen de indicadores cuando se realiza una consulta de hundimientos en tensión dentro de la pestaña de indicadores.

### 5.5.2. Base de datos y entrada de información

Debido a la gran cantidad de datos de calidad de potencia que se obtienen semanalmente del sistema de información de CODENSA S.A., es necesario establecer las herramientas de gestión y almacenamiento de información necesarias para:

- Ingresar los registros de perturbaciones de calidad de potencia de manera sistemática.
- Filtrar información correspondiente a errores de formato, comunicación o medición.
- Organizar los datos eficientemente con el fin de calcular indicadores y realizar los análisis respectivos.
- Administrar el tamaño de la base y el manejo de grandes cantidades de información.

El primer aspecto para tener en cuenta en el diseño de la base de datos, es el tipo de información que se va a almacenar, por lo tanto se analiza la cantidad de subestaciones registradas, los tipos de perturbaciones registradas por subestación y cantidad de registros por unidad de tiempo. El formato de dichos datos es el mencionado en la resolución CREG 024 de 2005 en archivos de texto plano separados por comas.

Cada subestación registra información de estado estacionario e información de perturbaciones temporales. Para estado estacionario, cada 10 minutos habrá un registro de Pst para cada una de las fases de un punto de medida, y un valor de desbalance en tensión. Para los eventos temporales como hundimientos en tensión, se tendrá un registro en cada subestación cada vez que la tensión del punto registrado supere ciertos umbrales definidos

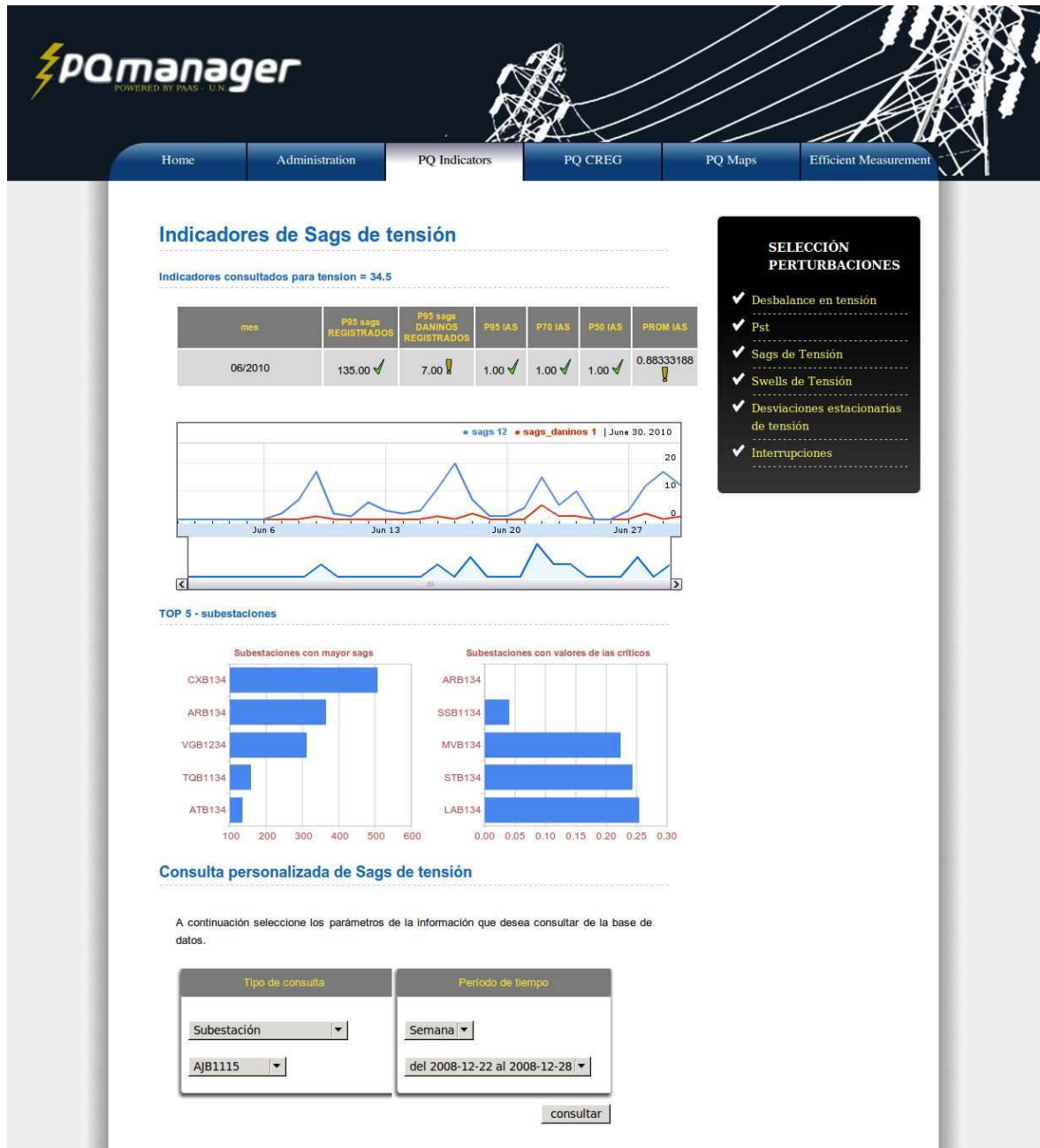


FIGURA 5.9: Visualización del aplicativo en consulta de hundimientos en tensión

para captar elevaciones y hundimientos en tensión, +10% y -10% respectivamente.

De acuerdo a lo anterior, se propone una estructura de tablas relacionales desarrolladas en MYSQL para organizar la información. La herramienta seleccionada se considera indicada

debido a sus ventajas en cuanto administración de grandes cantidades de información. Además, el hecho de ser software libre y código abierto permite realizar las modificaciones convenientes para el correcto funcionamiento de todas las herramientas planteadas en este aplicativo. Otro punto importante de la base de datos, es que esta permite una alta integración con otros tipos de software, lo cual es necesario para el desarrollo del aplicativo web. De acuerdo a lo anterior, la estructura inicial de la base de datos es mostrada en la figura 5.10.

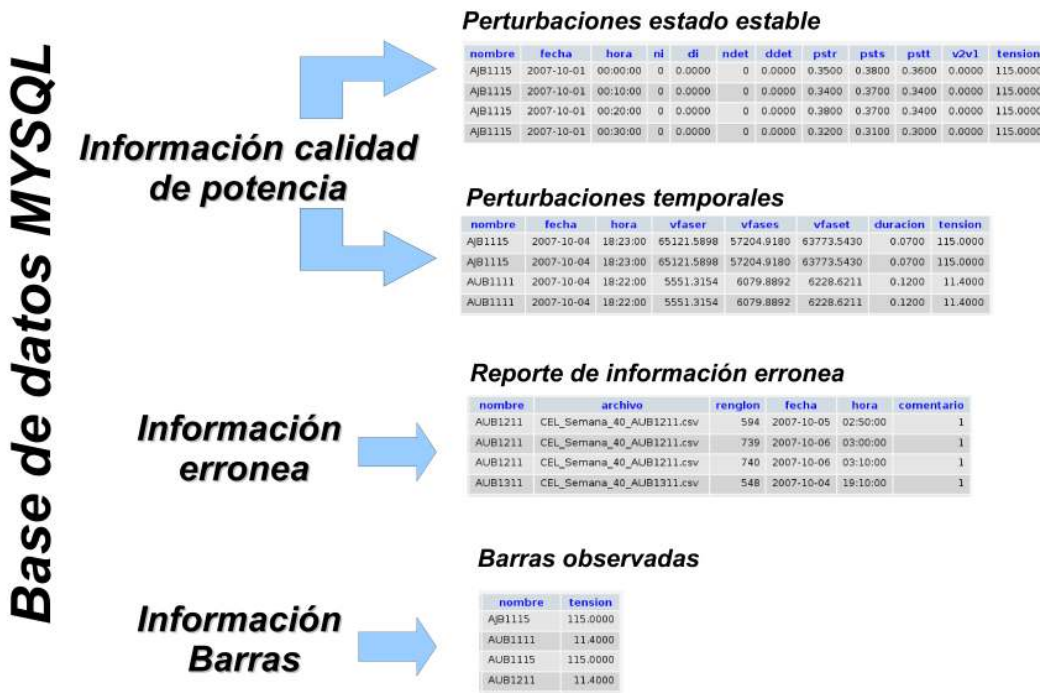


FIGURA 5.10: Estructura de la base en Mysql.

Las tablas que componen la base de datos son:

1. Una tabla de datos de Estado estable. (cada 10min).
2. Una tabla de datos de eventos de corta duración.
3. Una tabla de errores registrados en la información.
4. Una tabla con la información de las subestaciones.
5. Unas tablas anexas donde se maneje la información de los usuarios y permisos de gestión.

Cada uno de los campos de cada tabla tiene un tipo de formato distinto, el cual permite a Mysql asignar un determinado espacio para cada dato registrado. La correcta asignación del tipo de campo reduce notablemente la cantidad de espacio en el disco duro que se utiliza para guardar la información. Es importante mencionar también que debido a algunos errores en la información registrada, se permite que algunos campos tengan valor NULL lo cual significa que el dato de la correspondiente celda nunca fue registrado.

### 5.5.3. Entrada de información

Para la entrada de la información en la base de datos los archivos de calidad que reporta el operador de red deben estar en un formato determinado, para poder usar siempre los mismos algoritmos de extracción de información. El formato inicial es el indicado por la CREG en la resolución 025 de 2005 donde se registran dos archivos con formato CSV separados por comas. La cantidad de archivos depende de la cantidad de puntos que el sistema de adquisición de información reporte al ente regulador, por lo tanto se propone:

- Comprimir todos los datos de los archivos de calidad de potencia en una carpeta llamada CEL\_Semana\_XX.zip
- Comprimir todos los datos de los archivos de Eventos en Tensión en una carpeta llamada ET\_Semana\_XX.zip
- Comprimir todas las carpetas anteriores en un archivo llamado Semana\_XX.zip

La carpeta final será la entrada de los algoritmos que filtran la información y la almacenan eficientemente en la base de datos de Mysql.

El algoritmo propuesto para subir información a la base sigue los pasos mencionados a continuación:

1. Traslado de información de PC-cliente a PC-servidor y verificación.

En esta parte la información comprimida es trasladada desde un computador cliente al servidor y se ubica en una tabla temporal. Posteriormente los archivos son descomprimidos y distribuidos en carpetas temporales con el ánimo de revisar paso a paso los datos de cada archivo. Como se esta registrando la información de las barras y de los circuitos, entonces se procede a identificar cuales de los archivos registrados corresponden a barras y cuales corresponden a circuitos de tal forma que solo se tiene en cuenta la información registrada en barras del sistema.

2. Carga de información en archivos temporales.

Una vez identificados los archivos correspondientes a las subestaciones, se procede a abrir archivo por archivo y revisar linea por linea para filtrar los posibles errores

de información o formato que se tengan. En este punto, la información de calidad es enviada al archivo temporal Calidad.txt, la información de eventos al archivo temporal eventos.txt y la información errónea al archivo temporal error.txt. La información comprimida es eliminada de la carpeta temporal.

### 3. Carga de información en la base de datos.

Los tres archivos temporales mencionados anteriormente son cargados directamente a la bases de datos. Todos los archivos temporales son eliminados y el algoritmo queda en estado inicial para cargar nueva información

Actualmente la administración y consulta de la base de datos se puede realizar de manera directa desde consola de Mysql, con aplicativos de Internet diseñados con php tales como phpMyadmin o desde la herramienta PQmanager.

## 5.6. Propuesta de consulta y visualización de índices en plataforma web

Con el fin de evaluar la información de hundimientos en tensión ingresada al aplicativo, se propone la implementación de índices calculados para cada barra, nivel de tensión o para todas las barras, evaluados para diferentes intervalos de tiempo. A continuación se explica cuales son los indicadores utilizados y como debe ser su interpretación.

### 5.6.1. Indicadores de cantidad de hundimientos y cantidad de hundimientos dañinos

Estos indicadores son el Número de eventos y Números de hundimientos dañinos. El índice consiste en (i) contar la cantidad de hundimientos en tensión y (ii) la cantidad de hundimientos en tensión que están por debajo de la curva ITI, que ocurren en cada barra, nivel de tensión o en todas las barras. Para cada nivel de observación (barras, Nivel de tensión o todos) se tienen las siguientes consideraciones.

- Una Barra. El indicador número de hundimientos y el indicador número de hundimientos dañinos muestran la dichas cantidades registradas en la barra para un periodo determinado de tiempo.
- Nivel de tensión. El indicador número de hundimientos y el indicador número de hundimientos dañinos, calculan dichas cantidades para cada barra del nivel de tensión. Luego se muestran la cantidades de hundimientos del 95 % de las barras en dicho nivel de tensión.
- Todas las barras. El indicador número de hundimientos y el indicador número de hundimientos dañinos, calculan dichas cantidades para todas las barras. Luego se muestran la cantidades de hundimientos para el 95 % de todas las barras .

Los posibles intervalos de tiempo para el cálculo de estos indicadores son semana, mes o año.

### 5.6.2. Índice de actividad de Sags IAS

El indicador IAS evalúa los hundimientos ocurridos en cada barra con la metodología propuesta anteriormente en este capítulo. Este indicador solo es visible cuando se realizan consultas por mes, ya que este es el periodo de agregación para el cálculo del indicador. Para cada nivel de observación (barras, Nivel de tensión o todos) se tienen las siguientes consideraciones.

- Una Barra. El indicador evalúa los hundimientos registrados en la barra para un periodo de un mes.
- Nivel de tensión. El indicador evalúa los hundimientos registrados en cada una de las barras del nivel de tensión para un periodo de un mes. Luego se calcula el valor de IAS del 95 % de las barras en dicho nivel de tensión.
- Todas las barras. El indicador evalúa los hundimientos registrados en todas las barras para un periodo de un mes. Luego se calcula el valor de IAS del 95 % de todas las barras.

Tal como se mencionó anteriormente, este indicador solo es evaluado para el intervalo de tiempo de un mes.

### 5.6.3. Visualización de indicadores

Los indicadores mencionados anteriormente se pueden visualizar en el aplicativo a través de (i) tablas de índices, en las cuales se muestra el valor de los indicadores y el periodo de tiempo para el cual fueron calculados. (ii) perfil de cantidad de hundimientos en el cual, se muestra en detalle cuando ocurrieron los hundimientos en tensión. A continuación se muestran algunos ejemplos de consultas para información de hundimientos registrados durante el 2010.

#### Consulta de indicadores por barra.

En la figura 5.11 se muestra el resultado de una consulta de indicadores de hundimientos para la barra FOB1111 para el mes de junio de 2010.

De la figura 5.11 podemos observar:

- El indicador P95 sags registrados, muestra para este caso la cantidad de hundimientos registrados (563) para el mes de junio en FOB1111.
- El indicador P95 sags dañinos registrados, muestra para este caso la cantidad de hundimientos registrados por debajo de la curva ITIC (365) para el mes de junio en FOB1111.

mes	P95 sags REGISTRADOS	P95 sags DANINOS REGISTRADOS	IAS
06/2010	563 ✗	365 ✗	0.7300 !



FIGURA 5.11: Indicadores calculados para la barra FOB1111 para el mes Junio de 2010.

- El indicador IAS califica a la barra con un valor 0,73 lo que significa que esta barra está cercana a considerarse como problemática y podría tener problemas con los usuarios conectados a dicha barra.
- En el perfil de cantidad de hundimientos vemos dos curvas, azul para cantidad de hundimientos y roja para cantidad de hundimientos dañinos. Estas indican la cantidad de hundimientos registrados día a día, con lo cual se puede identificar días críticos con mucha ocurrencia de eventos. En la gráfica se observa que el Junio 14 ocurrieron gran cantidad de hundimientos en tensión.

### Consulta de indicadores por nivel de tensión.

En la figura 5.12 se muestra el resultado de una consulta de indicadores de hundimientos para las barras en el nivel de tensión 34.5kV para el mes de abril de 2010.

De la figura 5.12 podemos observar:

- El indicador P95 sags registrados, muestra que la cantidad máxima de hundimientos registrados en el 95 % de las barras de 34.5kV para el mes de abril de 2010 es de 52.
- El indicador P95 sags dañinos registrados, muestra que la cantidad máxima de hundimientos por debajo de la curva ITI registrados en el 95 % de las barras de 34.5kV es de 14.

mes	P95 sags REGISTRADOS	P95 sags DANINOS REGISTRADOS	P95 IAS	P70 IAS	P50 IAS	PROM IAS
04/2010	52.00 ✓	14.00 ✗	1.00 ✓	1.00 ✓	0.99 ✓	0.88261200 !

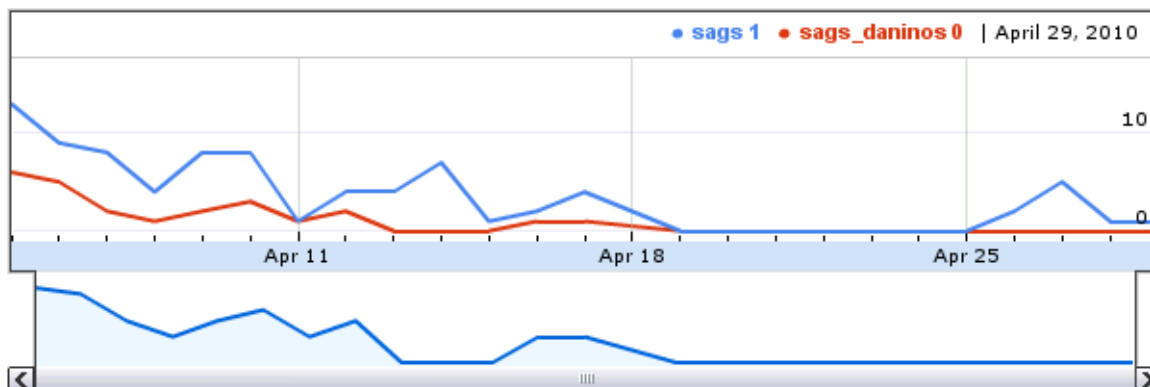


FIGURA 5.12: Indicadores calculados para el nivel de tensión 34.5kV para el mes abril de 2010.

- El indicador IAS P95 P70 P50 y PROM, muestra la calificación máxima del 95 %, 70 % 50 % y promedio, de las barras de nivel de tensión 34.5kV. De aquí podemos interpretar que el 50 % de las barras de 34.5kV tienen a lo sumo un valor de IAS de 0,99.
- En el perfil de cantidad de hundimientos vemos que la curva azul indica la cantidad de hundimientos máxima diaria del 95 % de las barras de 34.5kV. Por otro lado la curva roja indica la cantidad de hundimientos por debajo de la curva ITI máxima diaria del 95 % de las barras de 34.5kV.

### Consulta de indicadores para todas las barras.

En la figura 5.13 se muestra el resultado de una consulta de indicadores de hundimientos para las todas las barras para el mes de abril de 2010.

De la figura 5.13 podemos observar:

- El indicador P95 sags registrados, muestra que la cantidad máxima de hundimientos registrados en el 95 % de todas las barras para el mes de abril de 2010 es de 54.
- El indicador P95 sags dañinos registrados, muestra que la cantidad máxima de hundimientos por debajo de la curva ITI registrados en el 95 % de las barras de 34.5kV es de 11.

mes	P95 sags REGISTRADOS	P95 sags DANINOS REGISTRADOS	IAS
04/2010	54 ✓	11 ✗	1.0000 ✓

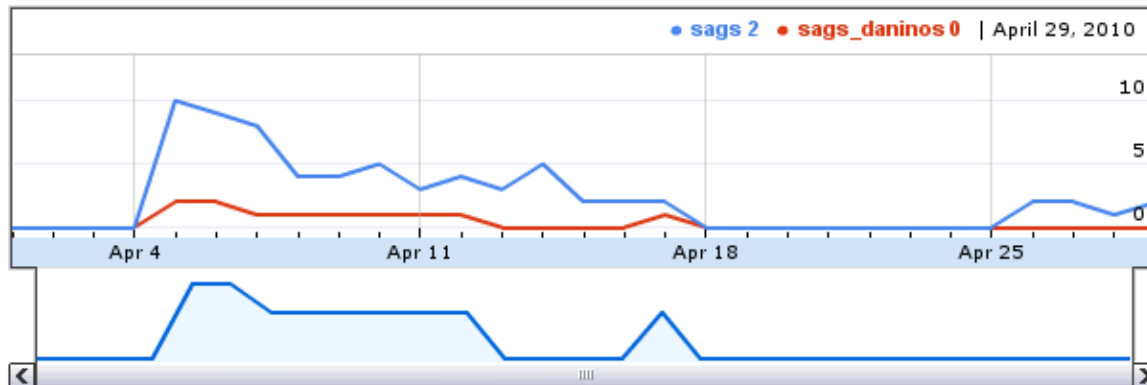


FIGURA 5.13: Indicadores calculados para todas las barras para el mes abril de 2010.

- El indicador IAS califica muestra el valor máximo del 95 % de las todas las barras (1).
- En el perfil de cantidad de hundimientos vemos que la curva azul indica la cantidad de hundimientos máxima diaria del 95 % de todas las barras. Por otro lado la curva azul indica la cantidad de hundimientos por debajo de la curva ITI máxima diaria del 95 % de todas las barras.

En las tablas anteriores se puede observar que cada indicador es acompañado icono que evalúa el indicador de manera cualitativa en (✓ bueno, ! precaución y ✗ crítico). Esta valoración cualitativa indicaría las condiciones de calidad en hundimientos en tensión una vez sean definidos los límites de las perturbaciones para el caso colombiano por parte del ente regulador. Los índices cualitativos se interpretarían de la siguiente manera:

- Cumple ✓. Quiere decir que el indicador evaluado cumple con el límite establecido por el ente regulador.
- Precaución !. Quiere decir que el indicador evaluado está muy cercano al límite establecido por el ente regulador. Por lo tanto, el operador de red podría establecer las acciones necesarias para prevenir que estos índices superen los límites en los próximos periodos de tiempo.

- No cumple **X**. Quiere decir que el indicador evaluado sobrepasó el límite establecido por el ente regulador. Por lo tanto, es necesario que el operador de red inicie las acciones urgentes con el ánimo de mejorar los indicadores obtenidos.

Para el caso del indicador IAS, se usó como límite el valor 0,7 obtenido de la tabla 5.10 de este capítulo. Se considera un escenario de precaución cuando el indicador está por debajo de 0.9. Por otro lado, como ya se mencionó anteriormente, los límites de los indicadores de cantidad de hundimientos y cantidad de hundimientos dañinos no han sido establecidos, sin embargo, en el aplicativo se utilizaron de manera ilustrativa los siguientes límites provisionales:

- Límite para cantidad de hundimientos en tensión 150 eventos. Se considera en estado de precaución cuando la cantidad de hundimientos en tensión pasa de 100 eventos.
- Límite para cantidad de hundimientos en tensión 10 eventos. Se considera en estado de precaución cuando la cantidad de hundimientos en tensión pasa de 5 eventos.

Para cada consulta realizada, es posible determinar cuales son las barras con los peores indicadores. En este caso, los indicadores evaluados son la cantidad de hundimientos en tensión y el índice IAS. Un ejemplo de esto se observa en la figura 5.14, en la cual se identifican las barras con mayor cantidad de hundimientos (gráfica izquierda) y las barras con peor índice IAS (gráfica derecha) de nivel de tensión 13.2kV para el mes de junio de 2007.

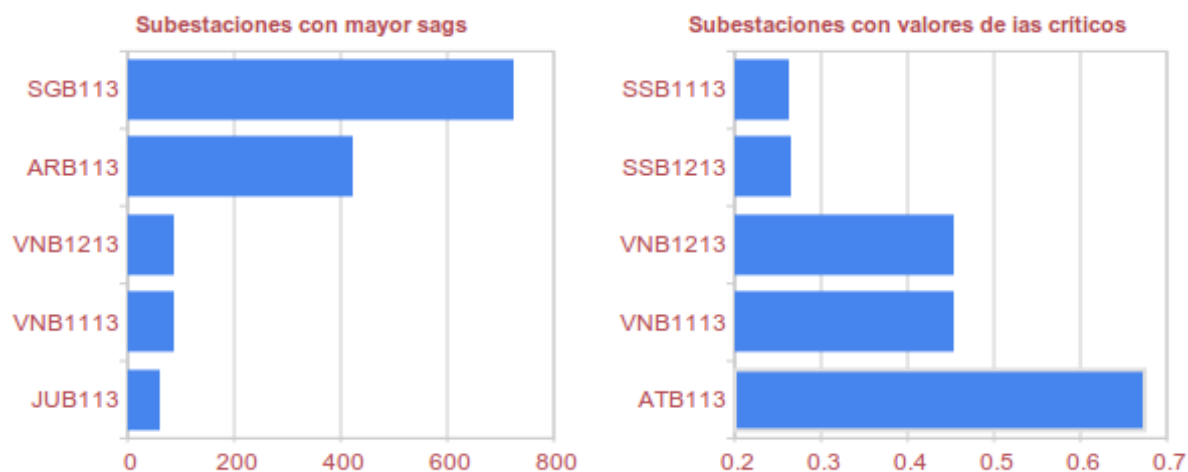


FIGURA 5.14: Barras críticas según índice de cantidad de hundimientos e IAS.

De la figura 5.14 podemos observar que:

- La barra con mas hundimientos en tensión es la SGB1113 con alrededor de 700 eventos.

- La barra con peor índice IAS es la SSB1113.
- Hay barras que consideradas críticas por un indicador pero por el otro no (SGB1113). Esto es debido a dos situaciones distintas: (i) Hay barras en donde ocurren muchos hundimientos en tensión, sin embargo al evaluar su profundidad y duración, no se consideran críticos. Por ende el índice IAS no es tan bajo como en otras barras. (ii) Hay barras donde ocurren pocos hundimientos en tensión (SSB1213), sin embargo, al evaluar su profundidad y duración estos eventos se consideran críticos. Por lo que el indicador IAS puede ser muy bajo.
- Hay barras que son críticas según los dos índices (VNB1113). Esto significa que además de que ocurrieron muchos hundimientos en tensión, al evaluar magnitud y duración, dichos eventos son considerados críticos.

## 5.7. Visualización geográfica de indicadores de hundimientos en tensión usando Google Maps.

Con el fin de identificar zonas del sistema de CODENSA S.A. con condiciones de calidad críticas en cuanto hundimientos en tensión, se desarrolla dentro de la herramienta de software *PQmanager* un algoritmo para observar geográficamente contornos isoperturbación.

Este desarrollo retoma el algoritmo de contornos explicado en la sección 3.4 y posteriormente lo integra con la herramienta Google maps para visualización geográfica de indicadores. Este proceso de integración implica las siguientes actividades:

- Analizar los API<sup>2</sup> de google para establecer cual es el más indicado para la plataforma.
- Generar archivos de texto plano con información de contornos (extraído del algoritmo desarrollado en secciones anteriores).
- Desarrollar los algoritmos para interpretar los contornos en texto plano y posteriormente generar polígonos no superpuestos codificados para el API de google.
- Integrar los archivos modificados a las estructuras de consulta php para el módulo google maps.

En este caso particular la integración se realizó mediante el API java-script de google.

Finalmente la implementación del google maps en este módulo permite realizar las consultas de los indicadores por niveles de tensión para diferentes intervalos de tiempo (semana, mes o año). A continuación en las figuras 5.15, 5.16, 5.17 y 5.18.

---

<sup>2</sup>API: Interfaz para Programación de Aplicaciones. Permite la comunicación entre el aplicativo google maps y los aplicativos desarrollados de manera independiente.

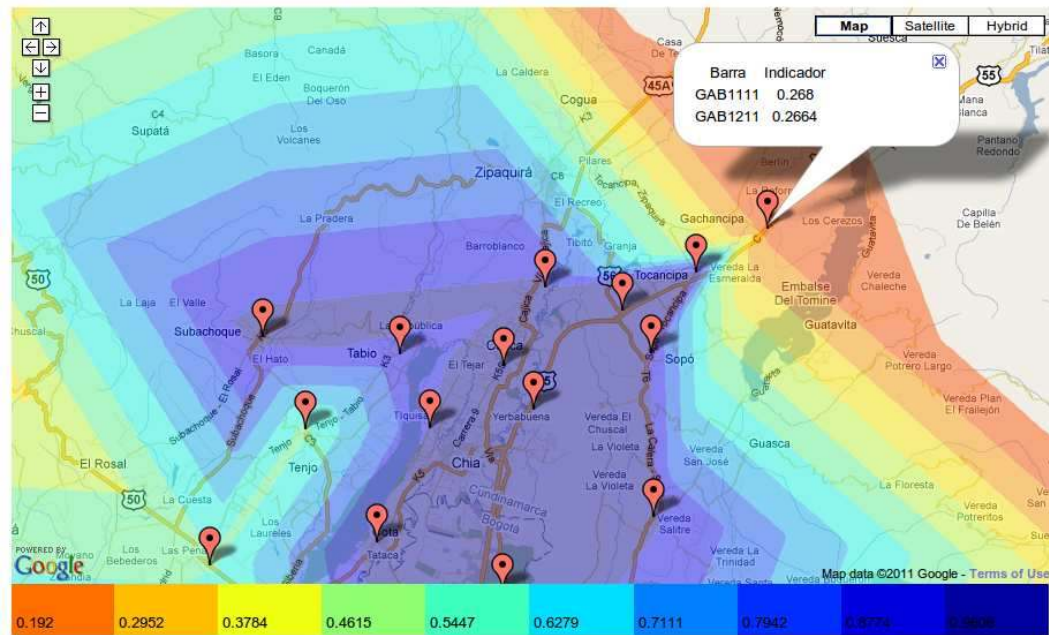


FIGURA 5.15: Mapa de Contornos IAS para barras de 11.4kV para julio de 2010

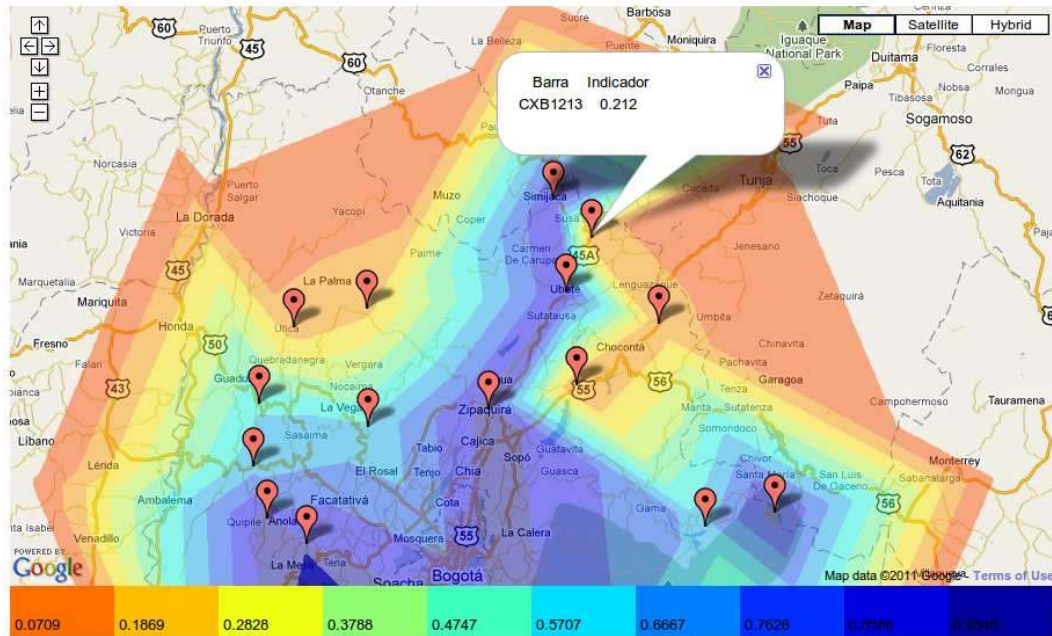


FIGURA 5.16: Mapa de Contornos IAS para barras de 13.2kV para julio de 2010

De las anteriores figuras podemos observar que:

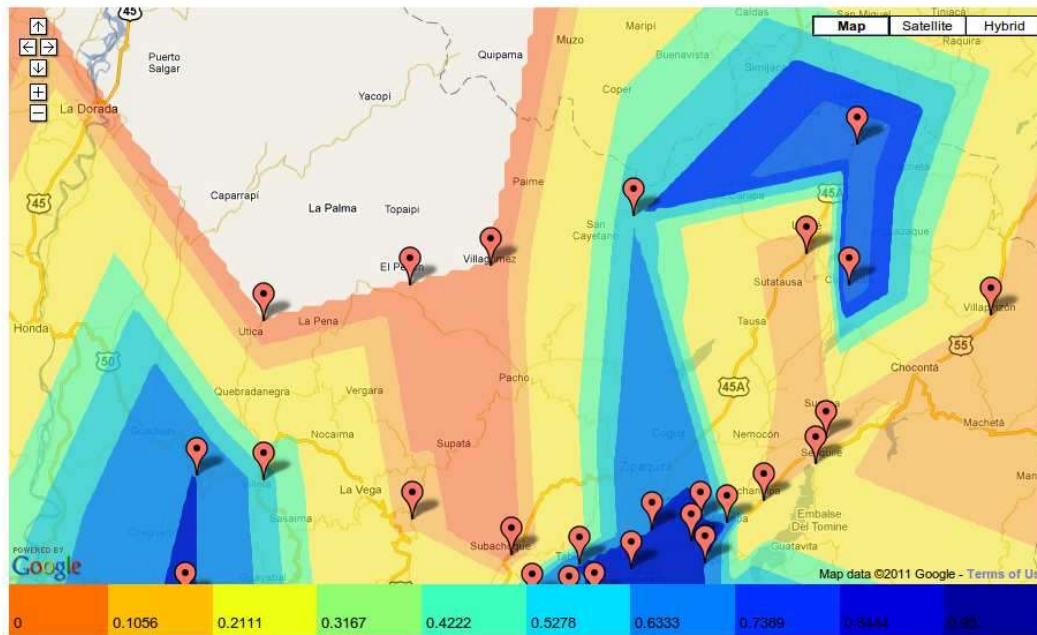


FIGURA 5.17: Mapa de Contornos IAS para barras de 34.5kV para julio de 2010



FIGURA 5.18: Mapa de Contornos IAS para barras de 57.5kV para julio de 2010

- De la figura 5.15 la mayoría de barras de 11,4kV tiene un valor de IAS mayor que 0.88. Se identifica una barra crítica fuera del perímetro urbano de Bogotá, con valor de IAS igual a 0,268 (Gachanzipa).
- De la figura 5.16 hay varias barras críticas de 13.2kV con valores de IAS menores a 0,28. Entre estas se encuentran Lenguazaque, Chocontá, La palma, Útica.
- De la figura 5.17 varias barras de 34,5kV tienen valor de IAS menor a 0,21, todas por fuera del perímetro urbano de Bogotá.
- De la figura 5.18. Las barras de 57,5 tienen valores de IAS mayores a 0,8. En particular la barra SFB1157 tiene valor IAS de 0.909.



# Conclusiones

En esta tesis de maestría se propuso como objetivo general, *diseñar una metodología de análisis de la información hundimientos en tensión, con el fin de obtener mapas de hundimientos en tensión para las barras de 220kV y 115kV de Bogotá*. El resultado es la metodología descrita en la figura 6.1.

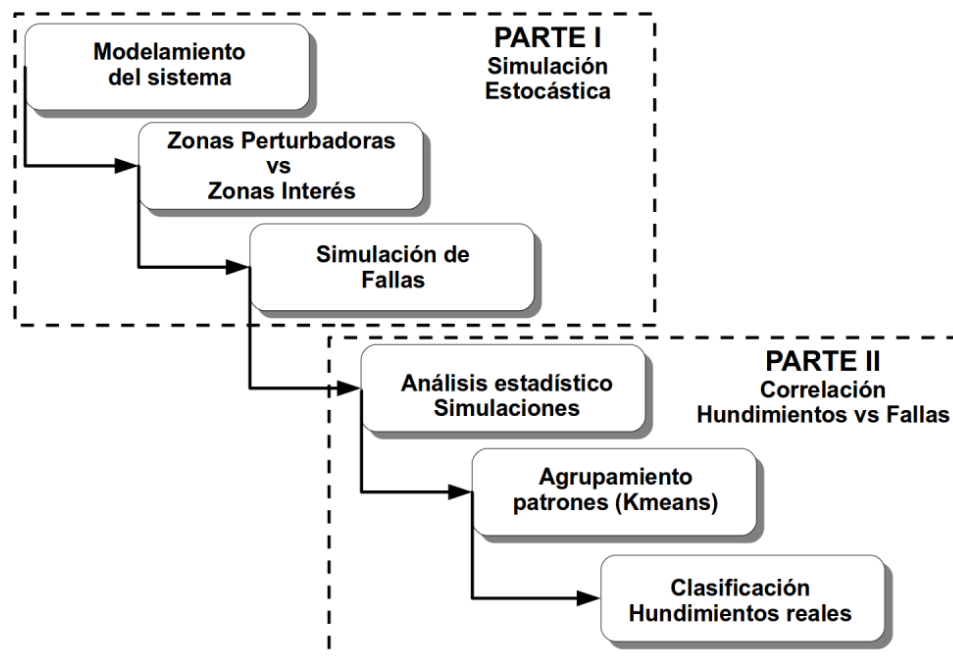


FIGURA 6.1: Metodología propuesta para análisis de hundimientos en tensión

Esta metodología permitió simular fallas en las redes del sistema colombiano identificando las zonas perturbadoras para las subestaciones de 220kV y 115kV de Bogotá. Los hundimientos generados fueron evaluados estadísticamente permitiendo caracterizar el impacto de las fallas ocurridas en el sistema. Posteriormente la metodología permitió, a través de algoritmos de clustering, integrar las simulaciones de fallas con datos reales,

identificando las posibles zonas donde ocurren fallas reales que ocasionan los hundimientos en tensión registrados por CODENSA ESP. S.A. Finalmente se integraron los desarrollos realizados en una herramienta de software con el fin de evaluar de manera continua los indicadores de hundimientos en tensión que ocurren y que se registran por parte de los operadores de red.

A continuación se mencionan detalladamente otras conclusiones obtenidas a partir de los objetivos específicos propuestos.

## OBJETIVO 1

El primer objetivo consistía en *realizar un modelado de la red de distribución de Bogotá para los niveles de 115kV y 220kV que permita simular sistemáticamente fallas a lo largo de los distintos tramos para observar el impacto sobre la magnitud de la tensión en diferentes puntos de la red.*

Para identificar todas la posibles zonas en las que pueden ocurrir fallas que afectan los nodos de 115kV y 220kV de Bogotá, se decidió extender el modelamiento del sistema de 115kV y 220kV de Bogotá, a todo el sistema colombiano para niveles de tensión de 115kV y 220kV.

Para la realización del modelamiento del sistema, se estudiaron varias herramientas de simulación encontrando limitaciones como:

- Software propietario con cantidad limitada de nodos para simulación.
- Dificultades para realizar simulación de fallas sistemáticamente.
- Dificultades para entrada y extracción de información de hundimientos en tensión de todas las barras.
- Imposibilidad de integración con otras herramientas de análisis y gestión de información para el desarrollo de la metodología propuesta.

Esto conformó un problema significativo dentro del desarrollo de este proyecto, ya que la propuesta mencionaba la realización de un modelamiento para generar fallas en el sistema, pero el software disponible para ello no cumple los requerimientos para lograr esta tarea a satisfacción. Por lo tanto, para superar estas limitaciones, se implementaron las siguientes herramientas:

- Se desarrolló un algoritmo AGM (*Algoritmo para Generación de Matrices*), cuyo resultado es el modelo en secuencias positiva, negativa y cero del sistema. Este algoritmo, al ser desarrollado por el autor, logra solventar las limitaciones expuestas por los software analizados, y logra adaptarse a las particularidades del sistema colombiano. Este algoritmo permite realizar el modelamiento para la simulación de

fallas propuesta en la metodología y conforma además un aporte fundamental que, aunque no estaba planeado inicialmente en esta tesis, constituye una herramienta práctica para procesos metodológicos que impliquen un nivel de requerimientos tan específicos como éste.

- Para realizar las simulaciones de fallas de manera sistemática, el autor desarrolló enteramente el algoritmo AGF (*Algoritmo para Generación de Fallas*) basado en la teoría de fallas, demostrando su completa aplicabilidad por medio de este trabajo, mediante la utilización del mismo en la metodología de simulación estocástica de fallas para análisis de hundimientos en tensión.
- Se construyó el diagrama unifilar en modo gráfico, lo cual permitió identificar posteriormente zonas del sistema con condiciones de calidad diferenciadas, asociando los nodos de los algoritmos con un posición dentro del diagrama.

Con esto, no solo se cumplen los objetivos iniciales en cuanto al modelamiento para la generación de fallas, sino que va más allá desarrollando todas las herramientas para permitir modelamientos sin limitación en el número de nodos, y permitiendo la integración con otros algoritmos que hacen parte de la metodología, características que no se podrían lograr desde el software existente para ello.

## OBJETIVO 2

Otro objetivo específico era *analizar la influencia de las fallas sobre los eventos en tensión registrados en las subestaciones por medio del empleo de herramientas de análisis y simulación estocástica para modelar de manera aleatoria la ocurrencia de tales fallas en el sistema.*

Para esto, parte de la metodología propuesta analiza la relación entre fallas y hundimientos en tensión. En ésta, se lograron identificar :(i) zonas perturbadoras, a partir del cálculo de matrices de hundimientos en tensión. En éstas ocurren las fallas que generan los hundimientos en tensión en las barras de interés; y (ii) barras de interés, en donde se observan los hundimientos en tensión generados por las fallas en las zonas perturbadoras. Posteriormente se simularon fallas en las zonas perturbadoras, lo que permitió analizar y caracterizar los hundimientos en tensión de las barras de 115kV y 220kV, ocurridos por las fallas que suceden en las zonas perturbadoras, determinando así la influencia de las fallas en los hundimientos en tensión.

Debido a la escasa información real que se tiene de fallas del sistema, la simulación estocástica presenta una gran ventaja, ya que permite generar datos de hundimientos en tensión en los nodos a evaluar. Los mapas de profundidad de hundimientos en tensión

obtenidos, son el resultado de aplicar la metodología a dichas simulaciones, lo que permitió una clara caracterización del comportamiento del sistema, con la cual se puede predecir rangos de magnitud de hundimientos en tensión ante una situación de fallas real.

### **OBJETIVO 3**

El objetivo específico era *analizar estadísticamente los eventos en tensión observados, extrayendo indicadores estadísticos básicos, percentiles y distribuciones de probabilidad.*

Para analizar eventos y extraer indicadores y distribuciones de probabilidad, se realizó un estudio de los hundimientos generados en la simulación estocástica. con lo cual.

- Se encontraron las distribuciones de profundidades de los hundimientos en tensión observados en las barras de 115kV y 220kV cercanas o dentro de Bogotá.
- Se encontraron las diferencias de los índices de hundimientos en tensión registrados en barras de distintos nivel de tensión.
- Se determinaron cuáles son las barras más afectadas y barras menos afectadas por hundimientos en tensión

### **OBJETIVO 4**

En este objetivo se *propone una representación gráfica de los hundimientos en tensión medidos y analizados con el fin de observar sobre un mapa las zonas con IAS (índices de actividad de sags) diferenciados.*

A partir de un desarrollo paso a paso de algoritmos para generar contornos, este trabajo consiguió la elaboración de mapas que permiten, comparado con una lista de datos que contenga información de indicadores de hundimientos en tensión, identificar asociaciones de una manera gráfica y fácil. De esta manera se identificaron zonas perturbadoras, barras problemáticas, los hundimientos más críticos y sus asociaciones pudiendo identificar posibles problemas comunes.

## **RESULTADOS ADICIONALES**

### **Correlación de fallas vs Hundimientos usando algoritmos kmeans**

Uno de los aportes más interesantes de esta tesis es el desarrollo de una novedosa metodología para correlacionar fallas con hundimientos en tensión basada en algoritmos de agrupamientos kmeans. Con esta metodología se logró establecer una nueva forma de correlacionar los hundimientos de tensión reales con las fallas simuladas. La metodología está dividida en 2 partes, (i) primero se conforman clusters de hundimientos en tensión simulados, que indican indirectamente 50 áreas del sistema donde ocurren las fallas que

generan dichos hundimientos.(ii) Posteriormente, estos clusters se establecen como un clasificador de hundimientos en tensión reales. Al analizar información real de CODENSA, se obtuvo que 3509 hundimientos reales son clasificados en 12 de los 50 clusters, logrando identificar las zonas donde posiblemente ocurren las fallas que ocasionan dichos hundimientos registrados por el operador de red.

De esta manera, esta investigación demuestra que el acercamiento a través de estrategias de clustering, permite generar correlaciones aplicables al análisis de información de fallas, lo cual tiene claramente, importantes repercusiones para el avance de las investigaciones futuras en este campo.

Aunque los resultados de la clasificación de hundimientos reales son afectados por los cambios topológicos de la redes modeladas, estos valores siguen siendo válidos, y tanto la metodología como las herramientas desarrolladas para ésta, se construyeron de forma abierta lo que permite que las actualizaciones en las redes de transmisión y distribución, puedan ser analizadas eventualmente.

### **Desarrollo de Software para evaluación de calidad PQmanager**

De la misma manera, un gran aporte de esta investigación fué la integración de una plataforma de gestión de información y cálculo de indicadores de calidad *PQmanager*, la cual entre otros, logra implementar la metodología de visualización de contornos en herramientas de información geográfica basadas en google maps. El desarrollo de esta herramienta permitió sistematizar el análisis de perturbaciones como hundimientos en tensión, algo de especial importancia hoy en día y un gran aporte al desarrollo de software de análisis de datos, así como permitió asociar de una manera más precisa las zonas vulnerables con zonas geográficas, logrando análisis más certeros y fácilmente aplicables a nueva información.

A través de la implementación de los indicadores propuestos en el aplicativo web *PQmanager*, se consiguió, en primera medida sistematizar el cálculo de los indicadores para los hundimientos reales reportados por el operador de red, lo cual generó ventajas para estimar indicadores de cada barra, e identificar zonas críticas realizando el mismo análisis periódicamente.

### **Propuesta de Índice de hundimientos IAS (Índice de Actividad de Sags)**

Se realizó una rigurosa revisión bibliográfica sobre caracterización y análisis de hundimientos en tensión, que determinaron criterios de severidad basados en la caracterización de hundimientos por medio del análisis de su magnitud, frecuencia de ocurrencia y duración, lo que abrió el espacio para configurar un nuevo indicador IAS (Índice de Actividad de Sags), que da cuenta de la severidad de un escenario de hundimientos evaluando la posibilidad de

afectar un equipo conectado a la red.

La aplicación de la nueva herramienta de análisis de hundimientos IAS a la información real de hundimientos en tensión registrada por CODENSA, permitió evaluar diferentes barras pertenecientes a este operador de red y realizar análisis comparativos entre subestaciones, demostrando así la importancia, valor y pertinencia para el sector eléctrico del nuevo indicador desarrollado.

Por otro lado, basados en mediciones reales de hundimientos, se logró determinar valores de referencia para las categorías de hundimientos en tensión definidas en el índice IAS. Esto, tiene un fuerte impacto en el sector eléctrico siendo un primer acercamiento para determinación de límites para hundimientos en posteriores propuestas regulatorias.

### **APORTES EN BIBLIOGRAFÍA GENERADA**

Durante el desarrollo de esta tesis de maestría se tuvo la oportunidad de realizar los siguientes artículos de investigación.

- Determination of Sag Disturbing and Sag Vulnerable Zones in a distribution network using Stochastic Fault Simulation [Romero M. 2008].
- Evaluation and Identification of Critical Zones due to Sag Activity. [Romero M. 2010-2]
- A new methodology for the comparative analysis of sags among substations in a distribution network in Colombia. [Romero M. 2010].

Los cuales fueron presentados en los eventos internacionales (i) “ *Power and Energy Society General Meeting - Conversion and Delivery of Electrical Energy in the 21st Century, 2008 IEEE, (Pittsburgh, PA, USA)*”, y (ii) “ *14th International Conference on Harmonics and Quality of Power (ICHQP), 2010 (Bergamo-Italy)*”.

# Bibliografía

- [Abbas K. 2008] Abbas Khosravi, Joaquim Melendez, Joan Colomer, and Jorge Sanchez. Multiway Principal Component Analysis (MPCA) for Upstream/Downstream Classification of Voltage Sags Gathered in Distribution Substations. Universitat de Giron. Spain, Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2008.
- [Anderson P. 1973] Anderson P. Analysis of Faulted Power Systems. IEEE Press Series on Power Engineering. Paul M. Anderson series Editor 1973.
- [Berzal F. 2005] Berzal Fernando Clustering. Fundamentos de Minería de Datos. Department of computer science and artificial intelligence Ingeniería Informatica, Universidad de Granada. 2005
- [Bollen M. 2000] Bollen M. Understanding power quality problems. Voltage sags and interruptions. Wiley-IEEE Press editorial Board. Piscataway. 2000
- [Bollen M. 1999] Bollen, M. Additions to the method of critical distances for stochastic assessment of voltage sags. Power Engineering Society 1999 Winter Meeting, IEEE .1999 , Page(s): 1241 - 1246 .
- [Busarello. 2005] Busarello Cott Partner Inc. NEPLAN Power System Analysis and Engineering, Planning and information system software for electrical transmission, distribution and industrial networks, 2005.
- [Cajamarca. 2006] Cajamarca, Torres, Pavas, Urrutia, Gallego, Delgadillo. Impact Assessment of Power Quality Limits in Colombia: a Regulatory Approach. IEEE Latin America Transm. and Distrib. Conference. Caracas (Venezuela). 2006.
- [CLUSTERS. 2010] PAAS-UN. Innovación tecnológica en identificación y medición de clusters de calidad de potencia para Bogota. Proyecto de Investigación financiado por COLCIENCIAS, CODENSA S.A. E.S.P. y la Universidad Nacional de Colombia. 2008 - 2010.
- [CREG 024. 2005] Comisión de Regulación de Energía y Gas. Resolución CREG 024 de 2005.

- [CREG 106. 2006] Comisión de Regulación de Energía y Gas. Resolución CREG 106 de 2006.
- [Davies D. 1979] Davies David , Donald Bouldin A cluster separation measure IEEE Transaction on pattern analysis and machine intelligence vol 1. 1979.
- [Deepak K. 2005] Deepak Krishnan, Power System Fault Analysis. Script from matlab central <http://www.mathworks.com/matlabcentral/fileexchange/8100-power-system-fault-analysis>. 2005.
- [Delio E. 2005] Delio E.B. Fernandes, Mario Fabiano Alves. A voltage sag pattern classification technique Pontifical Catholic University of minas gerais. Springer-Verlag Berlin Heidelberg 2005
- [Douglas S. 1997] Douglas s. Dorr, Arshad Mansoor, Allen G. Morinec, James C.Worley. Effects of Power Line Voltage Variations on Different Types of 400-W High-Pressure Sodium Ballasts. IEEE Trans. on Ind. App. Vol. 33, No. 2, March/April. 1997.
- [Duarte O. 2005] Duarte, Oscar G Estrella Parra Ricardo pardo, Análisis de los registros históricos de fallas en circuitos de distribución de CODENSA S.A. Universidad Nacionol de Colombia 29-11-05.
- [EPRI. 2000] EPRI. Electric Power Research Institute. Characterizing the impact of power quality on programmable logic controller with and without power-conditioning devices. Palo alto California. October 2000.
- [Gallego L. 2005] Gallego, L., Torres, H., Pavas, A., Cajamarca, G., Urrutia, D., Rondón, D. A methodological proposal for monitoring, analyzing and estimating Power Quality Indices: the case of Bogotá-Colombia. IEEE Power Tech. Saint Petersburg. Rusia. 2005.
- [Gallego L. 2008] Gallego Vega Luis Eduardo. Modelamiento del comportamiento de la oferta de energía eléctrica en el mercado colombiano Tesis (Doctor en Ingeniería). Universidad Nacional de Colombia. Facultad de Ingeniería, 2008
- [Hiu X. 2006] Hui Xiong, Junjie Wu, Jian Chen K-means Clustering versus Validation Measures: A Data Distribution Perspective KDD 2006, August 20-23 2006, Philadelphia, Pennsylvania, USA. 2006.
- [IEC61000-2-8. 2002] IEC 61000-2-8. Electromagnetic Compatibility (EMC) part 2-8. Enviroment - Voltage dips and short interruptions on public electric power supply systems with statistical measurements results. Pp 41,42. 2002-11.
- [IEC61000-4-30. 2003] IEC61000-4-30, Electromagnetic Compatibility (EMC) part 4-30, Testing and measurement techniques - Power quality measurement methods pp. 17 and 29, 2003.

- [IEEE1100. 2005] IEEE Std. 1100-2005. IEEE Recommended Practice for Powering and Grounding Electronic Equipment. December 2005.
- [IEEE1159. 1995] IEEE 1159, IEEE Recommended Practice for Monitoring Electric Power Quality. pp 5 and 16. IEEE Std.1159-1995, 1995.
- [IEEE1346. 1996] IEEE Std 1346-1996. IEEE Std 1346 - Recommended Practice for Evaluating Electric Power System Compatibility With Electronic Process Equipment. 1996.
- [ITIC. 2000] Information Technology Industry Council. ITIC Curve. <http://www.itic.org/archives/iticurv.pdf>
- [Kyei J. 2002] Kyei, J., Ayyanar, R. The design of power acceptability curves. IEEE Transactions on power delivery, vol. 17, No. 3, July 2002.
- [Kyei J. 2001] Kyei, J., Master Thesis, Final Project Report. Analysis and Design of Power Acceptability Curves for Industrial Loads. Power Systems Engineering Research Center. Cornell University. 2001
- [Simpower. 2009] Matlab simulink Toolbox. SimPowerSystems 5. The MathWorks, Inc. 1984-2009.
- [Meléndez J. 2007] Meléndez, j, Berjaga, X. Herraiz, S. Sánchez, S and M. Castro, Classification of Voltage Sags based on k-NN in the Principal Component Space Institut d Informatica i Aplicacions eXiT., Universitat de Girona (Spain) 2007
- [Milano F. 2006] Milano Federico, Power System Analysis Toolbox (PSAT). University of castilla - La Mancha. 2006
- [Mora F. 2009] Mora-Flórez Cormane-Angarita G. Ordóñez-Plata k-means algorithm and mixture distributions for locating faults in power systems Electric Power Systems Research 79 (2009) 714
- [NRS048-2. 1996] National Electricity Regulator South Africa. NRS 048-2:1996. Electricity Supply-Quality of Supply. Minimum Standards. 1996.
- [NRS048-2. 2007] National Electricity Regulator South Africa. NRS 048-2:2007. Electricity Supply-Quality of Supply. Minimum Standards. 2007.
- [NTC1340. 2003] NTC 1340. Norma Técnica Colombiana. Electrotecnia. Tensiones y frecuencia nominales en sistemas de energía eléctrica en redes de servicio público. 2003.
- [NTC5000. 2002] NTC 5000 Norma Técnica Colombiana. Calidad de la potencia eléctrica (CPE) Definiciones y términos fundamentales. Pag, 4. 2002.
- [NTC5001. 2008] NTC 5001 Norma Técnica Colombiana. Calidad de la potencia eléctrica (CPE) Límites y metodología de evaluación en el punto de conexión común. 2008

- [Peña D. 2002] Peña Daniel. Análisis de Datos Multivariantes. Mc Graw Hill, Universidad Carlos III de Madrid, 2002
- [PQB. 2005] PAAS-UN. Estimación de indicadores de calidad para Bogotá-Proyecto PQB. Proyecto de Investigación Financiado por COLCIENCIAS, CODENSA, CREG, ICONTEC y la Universidad Nacional de Colombia. 2005.
- [Queipo. 2001] Queipo y Pintos Fundamentos de Data Mining y sus Aplicaciones en la Gerencia Integrada de Yacimientos Clasificación no supervisada 2001
- [Ray D. 2007] Ray, D. Murillo, C. Matlab Power System simulation package MATPOWER, User manual, Version 3.2. Power Systems Engineering Research Center (PSERC). September 21 2007.
- [Ramos A. 2001] Ramos Dominguez Angel. Presentación en power Point, Curso de doctorado, Análisis conjunto. 2001
- [Reyes D. 2005] Reyes, D María T. Rueda de Torres, Álvaro Torres Impacto de los Sags en la Seguridad de los Sistemas Industriales III Simposio Internacional sobre Calidad de la Energía Eléctrica SICEL. Bogotá D.C., Colombia. Noviembre 16-18 2005
- [Romero M. 2006] Romero Miguel, Patiño Eduar, Niño Eduardo, Caracterización y análisis de SAGS causados por diferentes tipos de fallas en la red de media y baja tensión de la Universidad Nacional Colombia. Tesis (Ingeniero Electricista). Universidad Nacional de Colombia. Facultad de Ingeniería. Departamento de Ingeniería Eléctrica y Electrónica, 2006
- [Romero M. 2008] Romero, Miguel ; Murillo, O; Luna, L. ; Gallego, L. ; Parra, E. ; Torres, H. Determination of sag disturbing and sag vulnerable zones in a distribution network using stochastic fault simulation Power and Energy Society General Meeting - Conversion and Delivery of Electrical Energy in the 21st Century, 2008 IEEE , vol., no., pp.1-6, 20-24 July 2008
- [Romero M. 2010] Romero, Miguel.; Pavas, A.; Cajamarca, G.; Gallego, L.; , A new methodology for the comparative analysis of sags among substations in a distribution network in Colombia, Harmonics and Quality of Power (ICHQP), 2010 14th International Conference on , vol., no., pp.1-8, 26-29 Sept. 2010
- [Romero M. 2010-2] Romero Miguel, Gallego Luis, Luna Luis. Evaluation and identification of critical zones due to sag activity, Harmonics and Quality of Power (ICHQP), 2010 14th International Conference on , vol., no., pp.1-5, 26-29 Sept. 2010
- [SIGCE. 2008] PAAS-UN Sistema Integral de Gestión de Calidad de Energía. Proyecto de investigación. Universidad Nacional de Colombia. Grupo PAAS-UN. 2006-2008
- [Stevenson W. 1995] Stevenson W. Grainer J. Power System Analysis. MacGraw-Hill, Inc., U.S.A. 1995. pp-358-494.

[UPME. 2006] Unidad de planeación Minero Energética UPME. Plan de expansión de referencia. Generación y Transmisión 2006-2020 2006