



UNIVERSIDAD DE CHILE

FACULTAD DE CIENCIAS FÍSICAS Y MATEMÁTICAS

DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA ELÉCTRICA

**ESTIMACIÓN ESTOCÁSTICA DE HUECOS DE TENSIÓN
EN LAS BARRAS DEL SIC, MEDIANTE PAQUETE
COMPUTACIONAL**

MEMORIA PARA OPTAR ALTÍTULO DE INGENIERO CIVIL
ELECTRICISTA

SEBASTIÁN EDUARDO TAPIA HENRÍQUEZ

PROFESOR GUÍA:

GABRIEL OLGUÍN PARADA

MIEMBROS DE LA COMISION:

NELSON MORALES OSORIO

CLAUDIA RAHMANN ZUÑIGA

SANTIAGO DE CHILE

ENERO 2013

RESUMEN DE LA MEMORIA
PARA OPTAR AL TÍTULO DE
INGENIERO CIVIL ELECTRICISTA
POR: SEBASTIAN EDUARDO TAPIA HERNRIQUEZ
FECHA: 22 DE ENERO 2013
PROF. GUÍA: SR. GABRIEL OLGUIN PARADA

ESTIMACIÓN ESTOCÁSTICA DE HUECOS DE TENSIÓN EN LAS BARRAS DEL SIC, MEDIANTE PAQUETE COMPUTACIONAL

Para el sector industrial resulta de suma importancia la calidad y continuidad del suministro eléctrico. Principalmente debido a la alta sensibilidad de diferentes equipos a las variaciones rápidas de voltaje, ocasionando cuantiosas pérdidas monetarias por paradas intempestivas del proceso productivo. Una depresión rápida de la tensión o hueco de tensión se define como una caída momentánea del valor rms de voltaje, que puede producir la operación errónea o desconexión total de un equipo o sistema. Estimar la magnitud y frecuencia de estos fenómenos en las instalaciones del sistema interconectado central chileno se vuelve de gran utilidad a la hora de decidir invertir en nuevas instalaciones o seleccionar puntos de conexión para éstas.

El objetivo de este trabajo es estimar estocásticamente la ocurrencia de huecos de tensión en las barras del sistema troncal del SIC. La estimación estocástica emplea datos de falla de las instalaciones y pronostica la ocurrencia de los huecos a través de simulaciones de falla en el sistema, esto último requiere mucho menos tiempo que estimar los huecos de tensión mediante el monitoreo del sistema. Para realizar esta estimación estocástica se calculan las magnitudes del voltaje durante fallas en diversos puntos del sistema y se combina esta información con la tasa de falla de las posiciones de falla consideradas. Los resultados permiten caracterizar el sistema en términos frecuencia y magnitud de huecos de tensión en las distintas barras. De igual manera se encontraron las áreas donde al ocurrir una falla se afecta a barras sensibles del sistema, conocidas como áreas de vulnerabilidad, se contempló una para cada zona norte, centro y sur del sistema.

Los resultados muestran que la zona norte del sistema interconectado es la que experimenta más huecos de tensión de severidad media a profunda durante un año, y que la zona sur es la que menos se ve afectada por huecos severos. Lo anterior justificado por la topología del sistema en la zona norte, líneas largas de un circuito y poca generación. Las áreas de vulnerabilidad encontradas son extensas para las tres barras estudiadas, siendo las fallas en el sistema de transmisión de 500 kV las que afectan a mayores zonas geográficas en términos de huecos de tensión. Con esta información la planificación del sistema tiene otra herramienta para tomar decisiones técnico-económicas que ayuden al correcto desarrollo del sistema eléctrico.

Agradecimientos

Primero que todo quiero agradecer a mi familia, mis padres Eduardo y Lucy que desde siempre han creído en mí y siempre me han entregado apoyo y cariño incondicionales, este logro también es suyo. Mis hermanos Rodrigo y Cristóbal y mi abuelita Elba por toda la vida que hemos compartido y todas las veces que me dan alegría y cariño. En general a toda mi familia por convertirme en lo que soy.

Mi cabrita Viviana, mujer que amo y en la que encontré el amor y compañía desde que estábamos en el colegio, que me ha apoyado y comprendido desde siempre. Ella junto a su familia son también importantes y me han ayudado en este proceso.

A mis amigos de la U, a quienes los conozco de meches y hemos compartido desde estudio, los almuerzos, carretes, pichangas y un largo etcétera. Gracias por depositar en mí su amistad.

A mis amigos del colegio que siempre tuvieron palabras de apoyo y motivación para que siguiera adelante, en ellos encontré una linda amistad.

A mi profesor guía Gabriel Olgún que me propuso el tema desarrollado, gracias por su ayuda, la disposición y el tiempo.

Por último agradecer a la universidad, a cada profesor, compañero con los que compartí esta etapa de mi vida.

A todas las personas que de una u otra manera han forjado lo que soy, gracias totales!!!

Tabla de Contenido

RESUMEN.....	i
1 Introducción	1
1.1 Motivación	2
1.2 Objetivos	2
1.3 Estructura del documento.....	3
2 Revisión bibliográfica	4
2.1 Definición de huecos de tensión.....	4
2.2 Causas y consecuencias de un hueco de tensión	5
2.3 Caracterización de un hueco de tensión	5
2.3.1 Voltaje remanente y duración.....	5
2.3.2 Salto de fase (<i>phase-angle jump</i>)	7
2.4 Categorización de huecos de tensión.....	8
2.5 Huecos de tensión en las cargas	9
2.5.1 Caso falla monofásica	10
2.5.2 Caso falla bifásica	12
2.5.3 Caso falla trifásica.....	13
2.6 Comportamiento de los equipos.....	14
2.6.1 Computadores.....	14
2.6.2 Reguladores de velocidad.....	16
2.6.3 Motores de inducción	18
2.6.4 Estaciones convertidoras	20
2.7 Curvas de voltaje-tolerancia.....	23
3 Normativa sobre los huecos de tensión	25
3.1 Calidad de servicio, producto y suministro	25
3.2 Calidad del voltaje.....	26
3.3 Clasificaciones	28
4 Evaluación de los huecos de tensión	30
4.1 Métodos para calcular huecos de tensión	32
4.1.1 Método de las posiciones de falla.....	32
4.1.2 Método de las distancias críticas	32
4.2 Cálculo de huecos de tensión	32

4.2.1	Huecos de tensión balanceados	34
4.2.2	Huecos de tensión desbalanceados.....	36
4.3	Segmentación del sistema en función de los huecos de tensión.....	37
4.3.1	Área afectada.....	38
4.3.2	Área de vulnerabilidad o área expuesta.....	38
4.4	Estimación estocástica.....	39
4.4.1	Frecuencia acumulada de huecos de tensión	40
4.5	Ejemplo del método de posiciones de falla	41
5	Implementación.....	46
5.1	Herramientas	46
5.1.1	Programa Power Factory DigSilent.....	46
5.1.2	Modelos del SIC empleado	48
5.1.3	Tasas de falla.....	49
5.2	Variaciones del modelo empleado	51
5.2.1	Escenario Base	51
5.2.2	Escenario cambio de proporciones de falla	51
5.2.3	Escenario variación de las tasas de falla	52
5.3	Criterios de caracterización.....	52
5.4	Áreas de vulnerabilidad de barras sensibles.....	53
5.5	Metodología	54
6	Resultados y Análisis	56
6.1	Frecuencias acumuladas de ocurrencia de huecos de tensión	56
6.2	Zona del sistema y tipo de hueco de tensión.....	59
6.3	Variaciones.....	64
6.3.1	Variación de proporción de ocurrencia de fallas	64
6.3.2	Variación de tasas de falla.....	67
6.4	Áreas de vulnerabilidad.....	70
7	Conclusiones y trabajo futuro	78
7.1	Conclusiones	78
7.2	Trabajo futuro.....	79
8	Bibliografía	81
9	Anexos.....	83
A.	Empleo del módulo Tabla de Caídas de Tensión en Dig Silent	83

B. Despacho de los generadores Caso Dda. Alta y Dda. Baja.....	87
C. Resultados Demanda Alta y Demanda Baja para los distintos escenarios	91
D. Confiabilidad en Sistemas de Potencia	99
E. Sistema Troncal del SIC.....	103

1 Introducción

El crecimiento sostenido de la demanda en nuestro país hace que la industria y cada vez más los clientes particulares exijan que sus suministros eléctricos sean de mayor calidad, que las interrupciones de suministro se reduzcan al mínimo y a su vez que éstas sean menos dañinas para los usuarios. La norma técnica de seguridad y calidad de servicio chilena [1] se ocupa de dar lineamientos sobre el producto electricidad, la Suficiencia, Seguridad y Calidad de Servicio son temas importantes que hay que tener en cuenta. Los últimos dos son focos del presente trabajo, se estudiará a lo largo de éste el impacto que tiene en el sistema el fenómeno de los huecos de tensión que es una repentina caída en el valor del voltaje, la que trae consecuencias de variada magnitud como funcionamiento defectuoso de equipos o hasta su desconexión.

Perturbaciones en la red como cortocircuitos o la partida de grandes motores de inducción, hacen que la corriente del sistema se dirija al punto donde ocurre la perturbación. Esto provoca que los voltajes en las demás barras del sistema se depriman momentáneamente hasta que el sistema se recupere de la perturbación. Esta depresión del voltaje es lo que se denomina hueco de tensión y al ser éstos ocasionados por fallas en el sistema, conexión de grandes cargas, o malas maniobras de la red es que pueden considerarse como eventos aleatorios.

Los costos asociados a estos fenómenos son variados y no siempre cuantificados. Perjudican a la generación distribuida afectando el funcionamiento de las máquinas, éstas se detienen varias veces si los controladores ven una caída de voltaje en bornes, desgastando así su vida útil. Sin embargo son los equipos de electrónica de potencia los que más sufren durante un hueco de tensión, ya que están diseñados para ciertos niveles de voltaje provocando mal funcionamiento o la salida de servicio del equipo. Se vuelve crítico este problema en dispositivos de gran escala como lo son convertidores de corriente continua a alterna (o viceversa) que se utilizan en los enlaces HVDC¹ [2].

La estimación de la ocurrencia de estos huecos de tensión resulta de gran ayuda para determinar la sensibilidad del sistema en sus distintas barras, además de ser una herramienta útil para la evaluación de posibles fallas e incorrectos funcionamiento de los equipos. Asimismo la determinación de estos eventos puede resultar útil para incorporar los costos asociados a la disminución de la vida útil de los equipos y evaluar eventuales soluciones.

¹ HVDC es la tecnología de transmisión en corriente continua (High Voltage Direct Current)

1.1 Motivación

Fenómenos tan comunes como lo son los huecos de tensión son a veces desconocidos por los usuarios, siendo éstos especialmente dañinos para algunos equipos como controladores de velocidad de motores o en las estaciones convertoras HVDC. Estos fenómenos son mucho más frecuentes que los cortes pero pueden provocar severos daños al sistema y sus elementos al operarse las protecciones y acciones de control, es por esto que vale la pena estudiarlos. Determinar el momento exacto de cuándo ocurrirá un hueco de tensión es imposible y monitorear el sistema para determinar una estimación de este fenómeno requiere grandes cantidades de tiempo. Por este motivo es que la estadística se vuelve una herramienta poderosa para poder predecir la ocurrencia de un hueco de tensión (en número como en sus características)

1.2 Objetivos

Con el objeto de realizar un aporte a los asuntos mencionados anteriormente es que el objetivo general que se propuso para este trabajo fue caracterizar el Sistema Interconectado Central chileno en términos de los huecos de tensión de manera de identificar zonas susceptibles a estos eventos. Este objetivo se estructuró a partir de los siguientes objetivos específicos.

- Estudio y caracterización de huecos de tensión: estudiar las causas que provocan este fenómeno además de entender la forma de categorizarlos según parámetros comparables. Analizar los efectos que pueden producir a cargas sensibles a las variaciones rápidas de voltaje.
- Estimación de ocurrencia de huecos de tensión, en distintas barras del SIC
- Propuesta de índices de desempeño para barras del SIC y segmentación de sectores: poder realizar un catastro de los sectores susceptibles a huecos de tensión de cierta magnitud y ordenar las barras del sistema según algún criterio, en términos de este fenómeno.

1.3 Estructura del documento

Los primeros capítulos de este trabajo presentan el fenómeno de los huecos de tensión, en el Capítulo 2: Revisión bibliográfica, se describe qué son los huecos de tensión, su formulación matemática, causas y consecuencias, además se detalla el comportamiento de equipos sensibles ante este cambio rápido en la magnitud y fase del voltaje.

El capítulo tercero: Normativa sobre los huecos de tensión, da las pautas que tiene el reglamento chileno e internacional sobre los huecos de tensión, se revisa la norma actual chilena además de algunos lineamientos que entrega la literatura sobre el tema.

El capítulo número 4 Evaluación de los huecos de tensión, describe las maneras que existen para poder estimar este fenómeno de manera cuantitativa en un sistema interconectado cualquiera. Se definen conceptos sobre el tema y además se desarrolla la matemática que hay detrás.

En el capítulo 5 se exponen las herramientas que se emplearán para el desarrollo del trabajo, se describe el software utilizado además de la metodología y los datos que son necesarios para su implementación.

Dentro del capítulo 6 Resultados y Análisis se muestran y analizan los resultados de las simulaciones del capítulo anterior, en éste también se analizan los distintos resultados obtenidos.

Dentro del capítulo 7 están las conclusiones realizadas a partir del trabajo desarrollado, se hacen algunas conjeturas y se propone el trabajo futuro.

Los últimos capítulos de este documento el 7 y el 8 contienen la bibliografía del trabajo y los anexos del documento, respectivamente.

2 Revisión bibliográfica

2.1 Definición de huecos de tensión.

Los huecos de tensión se encuentran dentro del conjunto de los fenómenos transientes en las redes eléctricas, ocurriendo en un corto período de tiempo, del orden de los ciclos².

Los huecos de tensión son reducciones repentinas del valor rms de la tensión nominal ([3] y [4]), tal como se muestra en el ejemplo de la Figura 1. Estas reducciones son distintas a las debidas a las variaciones normales del voltaje. Las variaciones normales de voltaje tienen que ver con que los consumos no son constantes en el tiempo produciendo corrientes y voltajes variables que se mueven dentro de rangos permitidos. Por otra parte, los huecos de tensión están por debajo de los límites normales por lo que no son deseables y muchas veces estos huecos provocan fallas y daños a equipos. La magnitud de un hueco de tensión se establece en este documento como el mínimo valor rms de la caída de tensión, esto es, el voltaje remanente que más adelante de detallará.

Si bien los huecos de tensión no son tan dañinos como las interrupciones de larga y corta duración (valor rms del voltaje igual a 0), son mucho más frecuentes y muchas veces producen que operen las protecciones de equipos provocando su desconexión. Es por esto que el fenómeno de los huecos de tensión se hace considerable si se presenta muchas veces al año en un mismo punto de la red eléctrica.

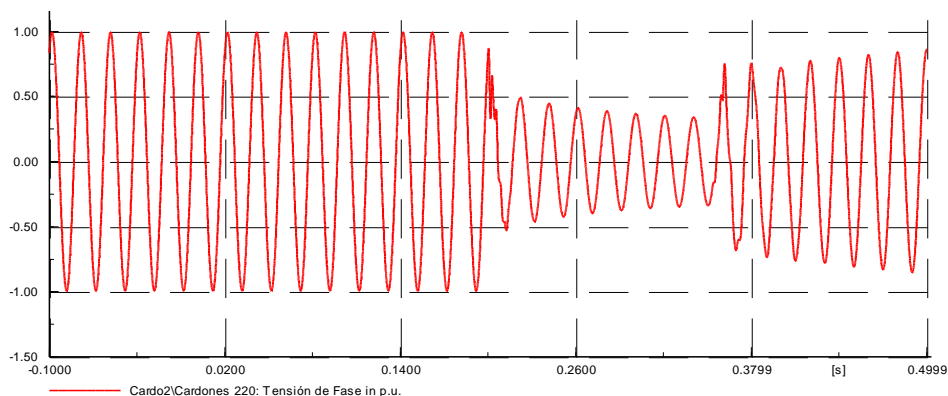


Figura 1 Ejemplo de una simulación de un hueco de tensión

² Ciclo tiene que ver con la onda de voltaje sinusoidal, para el caso de la red chilena con 50 [Hz], un ciclo corresponde a $\frac{1}{50[\text{hz}]} = 0,02 [\text{seg}]$.

2.2 Causas y consecuencias de un hueco de tensión

La causa básica de los huecos de tensión es el incremento de la corriente en un punto del sistema, esto hace que los voltajes alrededor de éste se depriman. El incremento de la corriente puede ocurrir durante un cortocircuito en el sistema, la energización de grandes transformadores o la partida de grandes motores inducción. La causa típica y más usual es cuando ocurre una falla en el sistema, que pueden ser provocadas por factores climáticos adversos como nieve, viento excesivo o rayos; así como por el desgaste y envejecimiento de las instalaciones eléctricas o una mal operación de estas.

Dentro de los equipos que son más afectados por los huecos de tensión se encuentran los que funcionan con rectificadores AC/DC. Los huecos de tensión hacen que los rectificadores sufran una caída en el voltaje que entregan, trayendo problemas en la operación pudiendo incluso dañar el equipo. Reducciones en un 85% de la tensión y duraciones de más de 40 [ms] provocan estos problemas [5].

Los fenómenos que preceden al hueco de tensión, son sobretensiones luego de recuperar el voltaje normal y corrientes de magnetización después del despeje de la falla. Esto también provoca daños en los equipos además de desbalancear la red trifásica.

2.3 Caracterización de un hueco de tensión

Con el objeto de cuantificar la magnitud del fenómeno de hueco de tensión y además para comparar entre uno y otro evento es que se determinan sus características para poder identificarlo y poder tener una comprensión de la severidad de éste. Los parámetros usualmente usados para describir al hueco de tensión son el voltaje remanente y la duración.

2.3.1 Voltaje remanente y duración

El voltaje remanente de un hueco de tensión es la menor medida del voltaje rms de la onda de tensión en cualquiera de los canales de voltaje durante el evento. Por canal de voltaje se entiende cualquiera de los voltajes fase-fase, fase-neutro o fase-tierra.

Este voltaje remanente se definirá como la magnitud de un hueco de tensión. A modo de ejemplo, un hueco de tensión con un voltaje remanente igual al 60% del nominal será de mayor magnitud que todos los huecos de tensión cuyo voltaje remanente sea menor a 60% del nominal, y

al mismo tiempo será de menor magnitud que los huecos de tensión cuyos voltajes remanente alcanzaron valores mayores que 60% del voltaje nominal.

No existen estándares que definan el umbral límite para considerar un voltaje como voltaje remanente (para discriminar si se está tratando de un hueco de tensión o una variación normal de la tensión), pero comúnmente se usa un límite o “umbral” del 90% del valor del voltaje nominal de la tensión.

La duración de un hueco de tensión es el tiempo durante el cual el voltaje rms de al menos uno de los canales de voltaje se encuentra por debajo del “umbral” previamente definido.

La Figura 2 que se muestra a continuación muestra los conceptos de voltaje remanente y duración de un hueco de tensión en base a un voltaje RMS.

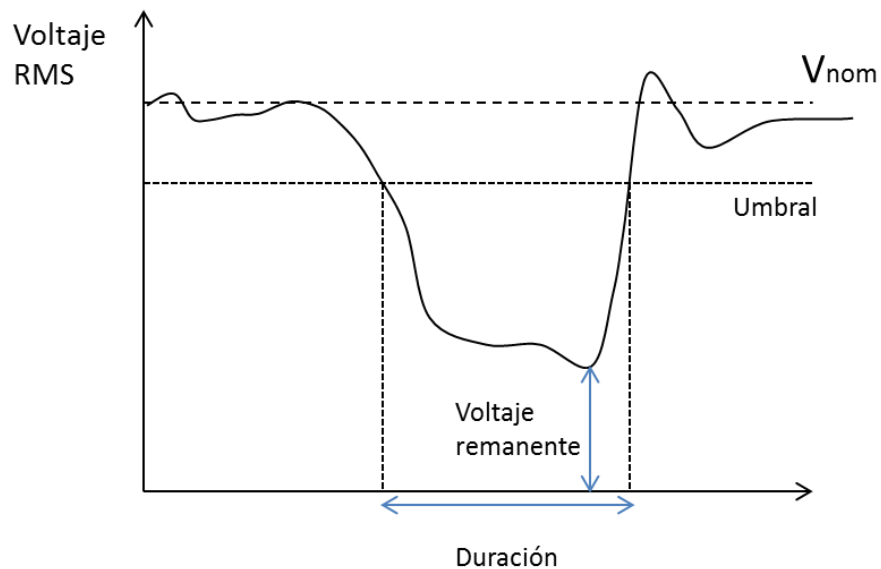


Figura 2 Voltaje remanente y duración de un hueco de tensión

Otro ejemplo de un hueco de tensión y sus características que lo describen se muestra en la Figura 3. En la figura de la izquierda se muestran las ondas de los voltajes en las tres fases, en la figura de la derecha se muestra el voltaje rms medido cada medio ciclo como se indica en la norma IEC61000-4-30. En la misma figura de la derecha la línea continua a los aproximadamente 5,5[kV] es el umbral de hueco de tensión, de esta manera puede observarse que existen al menos 5 medidas que se encuentran por debajo de este umbral. Produciéndose un hueco de tensión de $5 \cdot 0,5[ciclos] = 2,5[ciclos]$ de duración. Adicionalmente, el menor voltaje rms medido fue de 4,81 [kV], siendo este un 79,4% del nominal y definiendo el voltaje remanente del hueco de tensión.

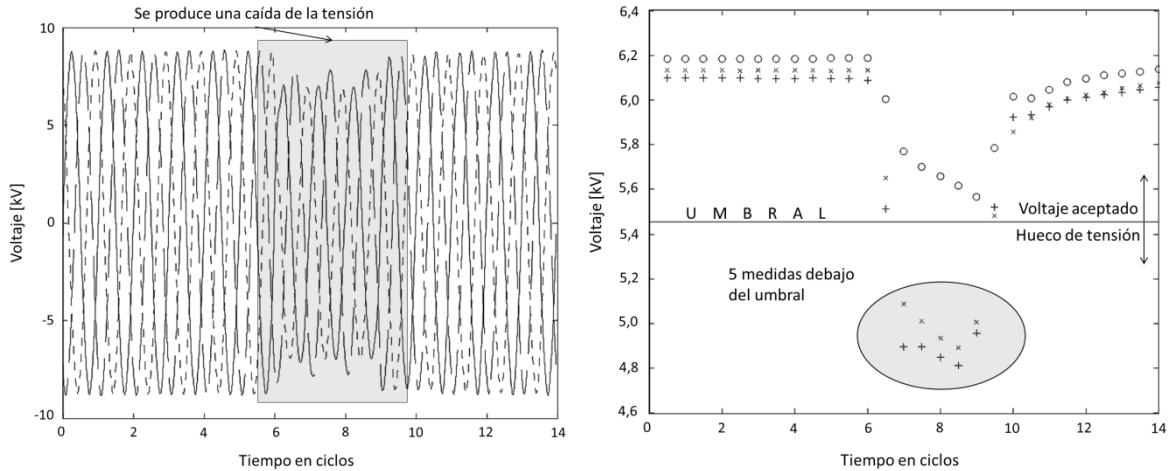


Figura 3 Ejemplo de Hueco de tensión: a la izquierda la forma de onda y a la derecha el voltaje rms medido cada medio ciclo

En huecos de tensión provocados por fallas, el voltaje remanente está relacionado con el lugar de la falla y la distancia de éste al punto donde se experimenta el hueco de tensión. La duración depende del tiempo de despeje de la falla. Los huecos producidos por fallas a nivel de distribución suelen ser en promedio de mayor duración que los producidos por fallas en transmisión, esto por los tiempos de actuación de las protecciones. La mayoría de los huecos de tensión ocasionados por fallas, en todos los niveles de tensión, suelen tener duraciones de menos de 200 milisegundos [5].

2.3.2 Salto de fase (*phase-angle jump*)

Un hueco de tensión causa una caída en la magnitud, en mayor o menor medida, del voltaje en los terminales de algunos equipos conectados en el sistema. Esta caída de voltaje viene normalmente acompañada por un cambio en el ángulo de fase del voltaje, es decir, la fase de la onda de voltaje durante el hueco de tensión es distinta a la fase que tenía la onda de voltaje antes del hueco de tensión. Este cambio es producido por dos efectos distintos: la diferencia en la razón X/R entre la fuente y el alimentador fallado; y las diferencias en las caídas de tensión en las diferentes fases. En huecos producidos por fallas trifásicas sólo la primera causa está presente, resultando un salto de fase en cualquiera de las tres fases y la razón X/R de la fuente y el alimentador fallado.

La obtención de este salto de fase es posible mediante la diferencia entre los ángulos de fase del voltaje durante el hueco de tensión y el ángulo de fase antes del hueco. El ángulo de fase de las tensiones puede ser obtenido mediante el cruce por cero de estas ondas o la fase de la frecuencia fundamental de la onda de voltaje.

En la literatura existen casos en que se considera el ángulo de fase al cual el hueco empieza y al cual el voltaje es recuperado como otra característica de los huecos de tensión. Estos ángulos de fase son denominados “*point-on-wave of dip initiation*” y “*point-on-wave of voltage recovery*” respectivamente.

2.4 Categorización de huecos de tensión

Normalmente se categoriza a un hueco de tensión mediante el valor rms de la fase con el menor voltaje, es decir la más afectada por el hueco. Se sabe que la magnitud del voltaje durante el hueco de tensión no es constante, y además el menor voltaje resulta no representativo para todos los casos. Por ejemplo, nivel de distribución un hueco de tensión en sólo una fase de la red y de muy baja magnitud no afecta a los usuarios conectados a las demás fases. Además de que la propagación de un hueco de tensión es distinta según la conexión del transformador.

En la literatura existen distintas clasificaciones de los huecos de tensión, la más adecuada para sistemas trifásicos es la enunciada en [6]. Este método clasifica los huecos de tensión en diferentes tipos, siendo los más importantes los tipos A, C y D. el primero de ellos, el A, corresponde a un hueco de tensión que disminuye por igual el voltaje en las tres fases del sistema, el tipo C afecta a dos de ellas y el tipo D a tan solo una.

En la parte superior de la Figura 4 se puede apreciar los diagramas fasoriales de sistemas afectados por distintos huecos de tensión donde las líneas continuas son los voltajes durante el hueco y las líneas punteadas son los voltajes pre-falla que tiene el sistema trifásico, debajo de estos están los correspondientes voltajes rms en función del tiempo (ciclos en este caso). Las figuras de izquierda a derecha muestran huecos del tipo A, C y D respectivamente.

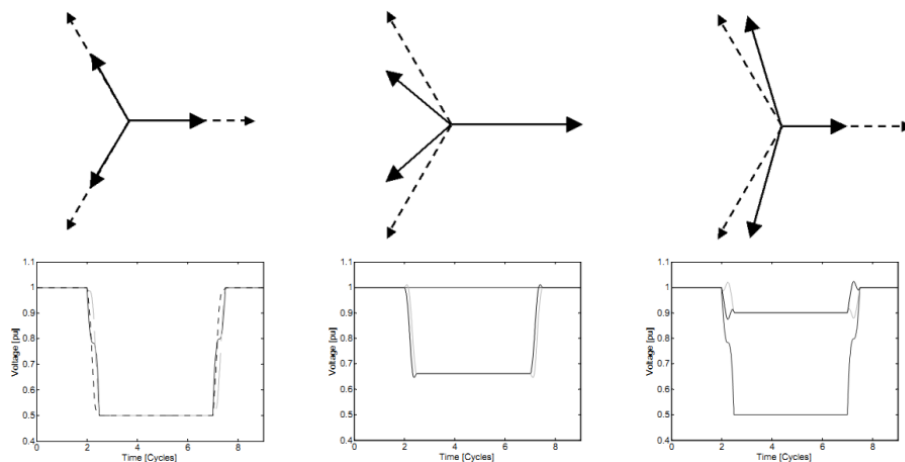


Figura 4 Hueco de tensión tipo A (izquierda), C (centro) y D (derecha)

2.5 Huecos de tensión en las cargas

El efecto de los huecos de tensión sobre los consumos, queda definido básicamente por las impedancias que existen en la red. Para una red simplificada de topología radial, un análisis simplificado durante una falla, sería considerar una fuente que alimenta una falla y dos impedancias. El esquema se presenta a continuación [7].

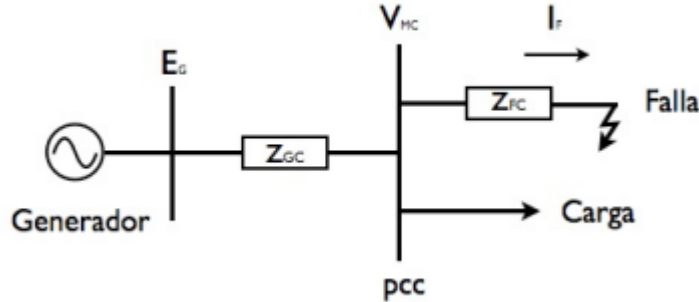


Figura 5 Esquema simplificado

La impedancia Z_{GC} es la impedancia entre la generación y el punto de conexión común (pcc), la impedancia Z_{FC} es la impedancia que existe entre la falla y el punto de conexión común. Asumiendo todos los valores en por unidad, y considerando que durante una falla las corrientes que no son de falla son despreciables y que el valor del voltaje en la barra de generación (E_0) es igual a 1 en [p.u], se tiene que el voltaje en el punto de conexión común y del hueco de tensión viene dado por la relación siguiente, todos los valores se encuentran en por unidad:

$$V_{hueco} = \frac{Z_{FC}}{Z_{FC} + Z_{GC}} \quad (2.1)$$

Tomando en cuenta que las impedancia Z_{GC} y Z_{FC} son respectivamente $R_{GC} + jX_{GC}$ y $R_{FC} + jX_{FC}$, se puede obtener el valor del ángulo de la tensión durante el hueco de tensión (*phase angle jump*).

$$\angle V_{hueco} = \arctg\left(\frac{X_{FC}}{R_{FC}}\right) - \arctg\left(\frac{X_{FC} + X_{GC}}{R_{FC} + R_{GC}}\right) \quad (2.2)$$

De la ecuación anterior se desprende que el salto de fase disminuye conforme disminuye la razón $\frac{X_{FC}}{R_{FC}}$ y es igual a 0 cuando se cumple:

$$\frac{X_{FC}}{R_{FC}} = \frac{X_{GC}}{R_{GC}} \quad (2.3)$$

El tipo de conexión de la carga juega un rol fundamental en la evaluación del hueco de tensión, pues al ser un fenómeno normalmente desbalanceado entran en juego las componentes simétricas de secuencia positiva, negativa y cero. En particular las impedancias de secuencia cero cambian según las conexiones de los neutros, esto significa un hueco de tensión puede verse distinto a cada lado de transformadores no aterrizados o con conexiones delta-estrella. Es por ello que se diferencia en las cargas conectadas en delta, estrella o zig-zag. La ecuación siguiente describe la relación de cada transformación, donde V_2 es el voltaje en el secundario del transformador de conexión T_1 , T_2 o T_3 que transforma el voltaje V_1 , es decir:

$$V_2 = T_i \cdot V_1 \quad (2.4)$$

- a) T_1 : Transformadores en que cada voltaje secundario es la diferencia entre dos voltajes primarios (transformadores de categoría Dy Yd e Yz).

$$T_1 = \frac{j}{\sqrt{3}} \begin{bmatrix} 0 & 1 & -1 \\ -1 & 0 & 1 \\ 1 & -1 & 0 \end{bmatrix} \quad (2.5)$$

- b) T_2 : Transformadores que eliminan la componente de secuencia cero del voltaje (transformadores YNy, Yyn, Yy, Dd y Dz).

$$T_2 = \frac{1}{\sqrt{3}} \begin{bmatrix} 2 & -1 & -1 \\ -1 & 2 & -1 \\ -1 & -1 & 2 \end{bmatrix} \quad (2.6)$$

- c) T_3 : transformadores que no cambian el voltaje (transformadores YY ambos con neutros aterrizados)

$$T_3 = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (2.7)$$

Se tiene matemáticamente que $T_1^2 = T_2$, que físicamente corresponde a que conectar dos transformadores Dy en cascada es similar a la conexión Dd o Yy.

2.5.1 Caso falla monofásica

Durante una falla monofásica franca a tierra se produce una caída de voltaje no sólo en la fase fallada con voltaje V sino también en las otras dos fases de acuerdo a:

$$V_a = V \quad (2.8)$$

$$V_b = -\frac{1}{2} - \frac{1}{2}j\sqrt{3} \quad (2.9)$$

$$V_c = -\frac{1}{2} + \frac{1}{2}j\sqrt{3} \quad (2.10)$$

Donde V es la tensión en la fase fallada durante el hueco de tensión en [p.u] y las tensiones V_a , V_b y V_c son las tensiones fase- neutro en [p.u] de las fases a, b y c respectivamente.

La diferencia de impedancias de secuencia cero y positiva provocan el cambio de tensión en las fases sin falla, la caída de tensión en las fases sin falla se incrementa a medida que aumenta la impedancia de falla, cuando la falla es sólida a tierra (impedancia de falla =0) los cambios de tensión en las fases distintas a la fallada, es pequeña. Cuando la impedancia de falla es alta, las tensiones en las fases no falladas pueden llegar a estar por debajo del 70%.

Pasando ahora los voltajes a una conexión en delta, se tienen los siguientes voltajes para la carga, esta conversión se hace mediante T_1 .

$$V_a = 1 \quad (2.11)$$

$$V_b = -\frac{1}{2} - \frac{1}{2}\left(\frac{1}{3} - \frac{2}{3}V\right)j\sqrt{3} \quad (2.12)$$

$$V_c = -\frac{1}{2} + \frac{1}{2}\left(\frac{1}{3} - \frac{2}{3}V\right)j\sqrt{3} \quad (2.13)$$

En este caso las tensiones son fase-fase.

Quiere decir que una falla monofásica afecta a una de las fases de una carga conectada en estrella, y a dos de ellas para el caso en que la carga está conectada en delta.

A continuación se muestra los diagramas fasoriales de las tensiones en conexión estrella (izquierda) y delta (derecha) para una falla monofásica, las tensiones previas a la falla se dibujan con línea punteada y las tensiones durante la falla con línea continua.

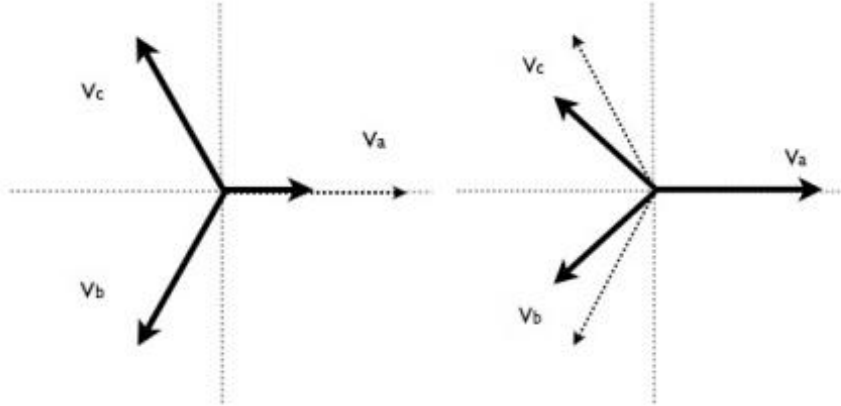


Figura 6 Tensiones conexión estrella (izquierda) y conexión delta (derecha) para el caso falla monofásica

2.5.2 Caso falla bifásica

En el caso de una falla bifásica (entre dos fases), las tensiones fase neutro en [p.u] en la carga durante un hueco de tensión de magnitud V se reducen a las siguientes expresiones:

$$V_a = 1 \quad (2.14)$$

$$V_b = -\frac{1}{2} - \frac{1}{2}Vj\sqrt{3} \quad (2.15)$$

$$V_c = -\frac{1}{2} + \frac{1}{2}Vj\sqrt{3} \quad (2.16)$$

Al aplicar la transformación estrella-delta (T_1) se obtienen las siguientes tensiones entre fases en la carga:

$$V_a = V \quad (2.17)$$

$$V_b = -\frac{1}{2}V - \frac{1}{2}jV\sqrt{3} \quad (2.18)$$

$$V_c = -\frac{1}{2}V + \frac{1}{2}jV\sqrt{3} \quad (2.19)$$

De lo que se concluye que en el caso de una falla bifásica, una carga conectada en estrella verá dos de sus fases afectadas por el hueco de tensión y una conectada en delta verá todas sus fases afectadas por el hueco de tensión. Puede observarse que el caso falla monofásica más conexión

delta es un caso particular de falla bifásica más conexión estrella con la magnitud del hueco de tensión igual a $V^* = \frac{1}{2} + \frac{2}{3}V$.

2.5.3 Caso falla trifásica

En una falla trifásica los voltajes de todas las fases disminuyen en igual cantidad:

$$V_a = V \quad (2.20)$$

$$V_b = -\frac{1}{2}V - \frac{1}{2}Vj\sqrt{3} \quad (2.21)$$

$$V_c = -\frac{1}{2}V + \frac{1}{2}Vj\sqrt{3} \quad (2.22)$$

Los cuatro casos anteriores dan lugar a las clases de huecos de tensión mencionadas anteriormente, agregando la Clase B siendo la única que incorpora la secuencia cero del voltaje ($V_0 = \frac{1}{3}(V_a + V_b + V_c)$). Una figura con cada clase se muestra a continuación.

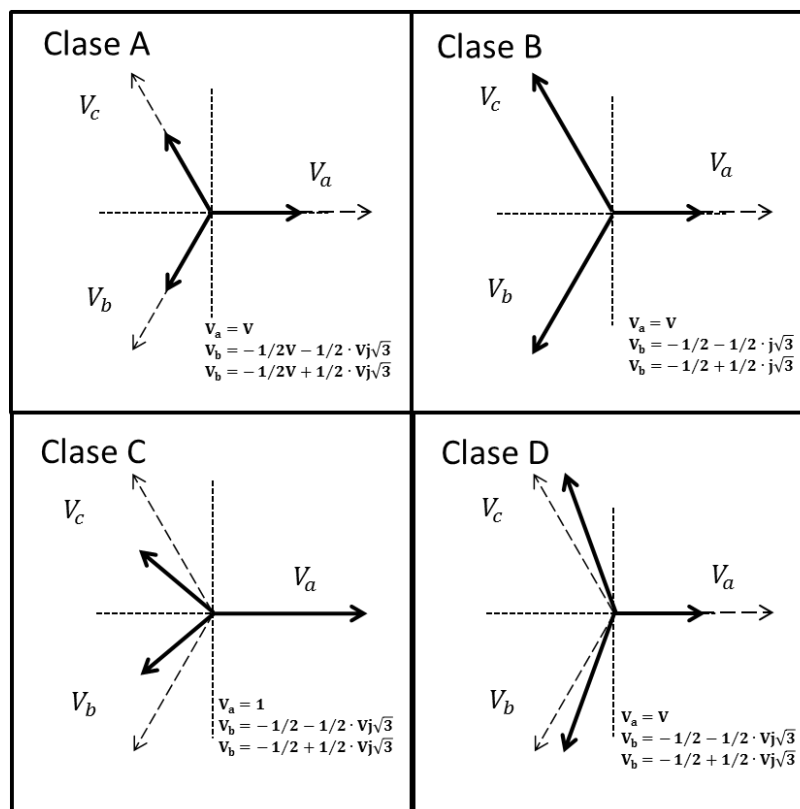


Figura 7 Clasificación de huecos de tensión

2.6 Comportamiento de los equipos

2.6.1 Computadores

El impacto que tienen los huecos de tensión sobre estos equipos es muy importante ya que en la actualidad existe gran cantidad de estos dispositivos además de una alta dependencia de éstos tanto a nivel personal como industrial.

Normalmente la alimentación de estos equipos (computadores y la mayoría de los equipos electrónicos) consiste en un rectificador junto con un regulador electrónico de voltaje (convertor dc/ac). Este tipo de alimentación es sensible a los huecos de tensión, en diferente medida, desde parpadeos en la luz artificial o en una pantalla de un televisor, hasta la detención de procesos productivos durante varias horas produciendo enormes pérdidas para la industria.

Una configuración simplificada de un sistema de alimentación típico de estos equipos se muestra en la Figura 8. El puente de diodos convierte la señal sinusoidal en una señal más o menos continua, el condensador filtra la señal disminuyendo su “*ripple*” y el controlador de voltaje entrega una tensión DC a la salida de la fuente.

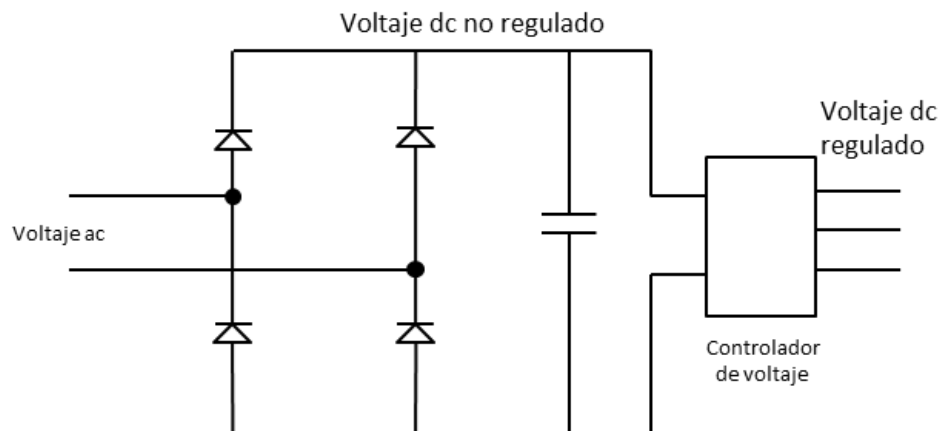


Figura 8 Alimentación de un computador

Durante un hueco de tensión la máxima tensión ac es menor que la tensión dc. Haciendo que se descargue el condensador hasta que la tensión en éste caiga por debajo de la máxima tensión ac durante el hueco. Esto provoca un retardo que se aprecia en la Figura 9, el cual aumenta con la magnitud del hueco de tensión. El controlador es capaz de mantener en su salida un voltaje constante dentro de un cierto rango de su voltaje de entrada, si el voltaje en el condensador decae mucho el voltaje que entrega el controlador también decaerá y finalmente conducirá errores en la

electrónica digital. Algunos dispositivos detectan esta caída y envía una señal de “apagado” al controlador

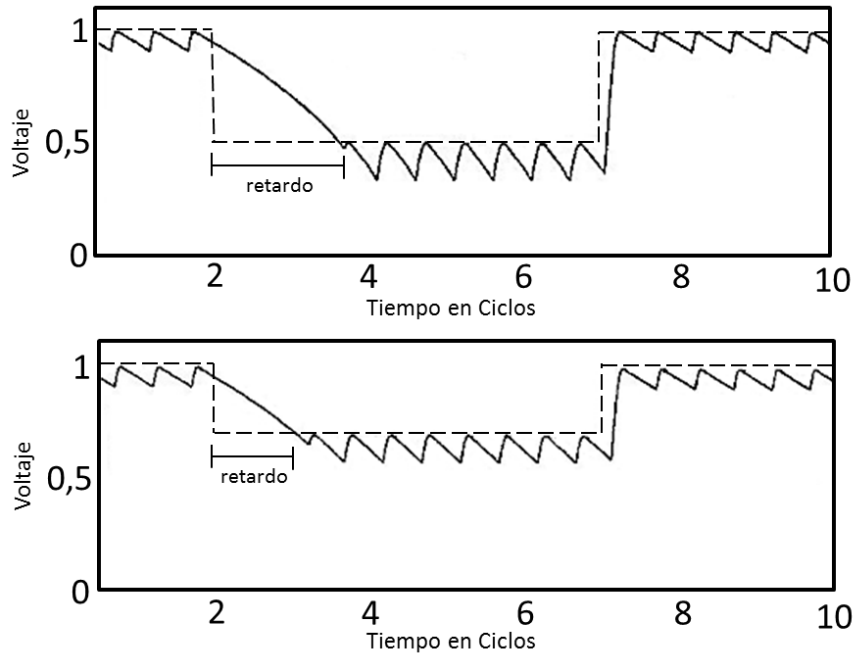


Figura 9 Hueco de tensión en el lado AC (línea punteada) y en el lado DC (línea continua) por una caída del 50%(arriba) y 70%(abajo)

Mientras la tensión alterna sea menor que la tensión continua, toda la energía eléctrica que se entrega a la carga será acumulada en el condensador, la cual queda determinada por (2.23), donde C es la capacitancia del condensador, V_0 es el voltaje que tiene el condensador en el momento en que se inicia el hueco de tensión, P_c es la potencia que consume la carga, t es el tiempo que dura el hueco y V el voltaje durante el período de descarga.

$$\frac{1}{2}CV^2 = \frac{1}{2}CV_0^2 - P_c \cdot t \quad (2.23)$$

De (2.23) puede obtenerse una expresión para voltaje durante el hueco de tensión que corresponde a la tensión del condensador.

$$V = \sqrt{V_0^2 - \frac{2P_c}{C}t} \quad (2.24)$$

La diferencia entre el voltaje máximo y mínimo continuos es el *ripple* el cual se expresa según (2.25), donde T es un ciclo de la frecuencia fundamental y se asume que la descarga de un condensador dura aproximadamente la mitad de un ciclo.

$$ripple = \frac{P_c T}{2V_o^2 C} \quad (2.25)$$

Reemplazando (2.25) en la expresión del voltaje (2.24) se obtiene una expresión para el voltaje durante el decaimiento.

$$V = V_o \sqrt{1 - \frac{4 \cdot ripple}{T} t} \quad (2.26)$$

En el momento en que el voltaje de decaimiento se hace igual al voltaje mínimo permitido, se puede calcular el tiempo de decaimiento a través de (2.27). Este tiempo es el que se demora en desconectar el equipo luego del hueco de tensión, o también, la máxima duración del hueco de tensión que el equipo puede tolerar.

$$t = \frac{1 - \left(\frac{V}{V_o}\right)^2}{4 \cdot ripple} \cdot T \quad (2.27)$$

De esta manera, de las ecuaciones (2.26) y (2.27), puede observarse que mientras mayor sea el *ripple* del voltaje DC, mayor será el decaimiento durante el hueco de tensión, y mientras menor sea el *ripple*, mayor será la cantidad de ciclos que va a poder funcionar el equipo en presencia de un hueco de tensión.

2.6.2 Reguladores de velocidad

Otro de los elementos que son especialmente sensibles a los huecos de tensión son los reguladores de velocidad, estos se encuentran en casi toda la industria siendo usados para el control de motores industriales. La Figura 10 muestra una típica configuración de un regulador de velocidad trifásico.

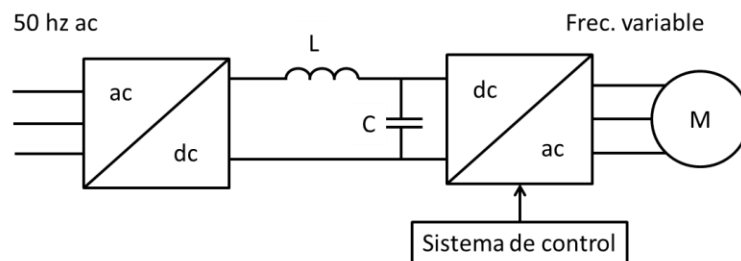


Figura 10 Esquema de un regulador de velocidad

El voltaje de salida del rectificador es suavizado por el condensador C , y la inductancia L tiene como objetivo suavizar la corriente continua del enlace y así reducir la distorsión armónica. El voltaje continuo es invertido a un voltaje alterno de frecuencia y magnitud variables y de esa manera controlar la velocidad del motor M .

Los dispositivos reguladores de velocidad son a menudo muy sensibles a los huecos de tensión. Los actuadores de los controladores de estos equipos se disparan por diferentes fenómenos

- El regulador de velocidad o la protección detectará un repentino cambio en las condiciones de operación y desconectará el equipo para prevenir daños a los componentes de electrónica de potencia.
- El incremento de las corrientes alternas durante el hueco o las sobrecorrientes inmediatamente después del hueco, cargarán el condensador, causando un disparo por sobrecorriente o una operación de los fusibles.
- El proceso controlado por el motor no será capaz de tolerar las caídas en la velocidad o las variaciones de torque debido al hueco de tensión, haciendo que se desconecte o simplemente se detenga
- Durante un hueco desbalanceado, las corrientes que atraviesan el rectificador de diodos también son desbalanceadas. Un pequeño desbalance en el voltaje puede conducir a una gran desbalance en corriente. Haciendo que una corriente sea dos veces su valor mientras otra puede ser cero. Este aumento en algunas corrientes causará un disparo en las protecciones de sobrecorriente o una operación en los fusibles

Del mismo modo que la alimentación de los computadores, la capacitancia C presente en estos dispositivos (entre los convertidores AC-DC), incorpora un retardo en el decaimiento de la tensión. El tiempo que demora el voltaje en decaer por debajo de este valor mínimo queda determinado por la siguiente ecuación

$$t = \frac{C}{2P_c} (V_o^2 - V_{min}^2) \quad (2.28)$$

Donde C es la capacitancia presente en el lado dc, V_o es la tensión en el condensador justo antes de la disminución de la tensión, P_c es la potencia que consume la carga y V_{min} es la tensión

DC mínima que soporta el regulador. De esta forma de (2.28) se desprende que a mayor capacitancia, mayor será el tiempo que demora la tensión DC en alcanzar el valor mínimo

Ante un hueco de tensión tipo C (ver Figura 7) el rectificador aún sigue funcionando, pues deja de funcionar de manera trifásica y funciona simplemente como un rectificador monofásico con la presencia de una fase con voltaje normal. En el caso de un tipo D las tres fases caen en magnitud por lo que no hay una fase que mantenga el voltaje DC, la capacitancia y el retardo de ésta ayuda a mitigar el efecto de la caída de la tensión DC y mientras mayor sea esta mejor será el comportamiento del inversor. Los huecos de tensión tipo D o C son mucho menos dañinos que uno balanceado (clase A) que saca de servicio al regulador.

2.6.3 Motores de inducción

Los motores de inducción son ampliamente empleados en la industria, como también algunas veces en la generación de energía, como es el caso de los generadores eólicos. Obviamente si el motor está conectado a un regulador de velocidad y éste último no es capaz de mantenerse en funcionamiento no tiene sentido este análisis, por lo que supondrá que este sigue operando de forma correcta. Otro supuesto es que el voltaje en los terminales del motor es igual al voltaje de suministro.

Una caída de la tensión en los terminales del motor de inducción causa una disminución tanto en la velocidad como en el torque de la máquina. La ecuación (2.29) muestra la relación de la velocidad del motor ω con el momento de inercia del motor J , y los torques eléctricos y mecánicos τ_{elec} y τ_{mec} respectivamente.

$$\frac{\partial}{\partial t} \left(\frac{1}{2} J \omega^2 \right) = \omega (\tau_{elec} - \tau_{mec}) \quad (2.29)$$

Para conocer la dependencia del voltaje es necesario incluir los conceptos de la constante de inercia H (2.30) y el desplazamiento s (2.31), estos están en función de la frecuencia de la red $\omega_o = 2\pi f$, con $f = 50$ hz.

$$H = \frac{\frac{1}{2} J \omega^2}{\omega_o \tau_{mec}} \quad (2.30)$$

$$s = \frac{\omega_o - \omega}{\omega_o} \quad (2.31)$$

Sabiendo que el torque eléctrico es proporcional al cuadrado del voltaje según τ_{mec} , es decir:

$$\tau_{elec} = V^2 \tau_{mec} \quad (2.32)$$

Reemplazando (2.32) en (2.29) resulta la siguiente ecuación:

$$\frac{d\omega}{dt} = \frac{(V^2 - 1)\tau_{mec}}{J} \quad (2.33)$$

Combinando (2.30) y (2.31) con (2.33) se tiene una expresión para la tasa de cambio del deslizamiento del motor durante un hueco de tensión (para $\omega \approx \omega_o$), para una tensión V y una duración Δt .

$$\begin{aligned} \frac{ds}{dt} &= \frac{1 - V^2}{2H} \\ \Delta s &= \frac{ds}{dt} \Delta t = \frac{1 - V^2}{2H} \Delta t \end{aligned} \quad (2.34)$$

Por lo que se ve en las ecuaciones, una alta constante de inercia H hará que la máquina sea poco sensible a los huecos de tensión. Sin embargo los huecos profundos pueden producir oscilaciones en el momento en que cae la tensión y cuando esta se recupera, las oscilaciones se incrementan cuando hay un salto de fase del hueco de tensión.

Otro efecto sobre los motores de inducción es la pérdida del campo magnético en el entrehierro, disminuyendo transitoriamente aún más la velocidad ante huecos profundos. Durante este fenómeno el motor aporta a la corriente de cortocircuito, ayudando en cierta forma a recuperar la falla que produjo al hueco de tensión.

Posterior al hueco de tensión la máquina consume una alta corriente de magnetización, para recuperar el flujo en el entrehierro y para volver a acelerar la máquina. Esta corriente es causante del efecto inmediatamente después de la caída de tensión, que consiste en un incremento en el valor de la tensión. Este efecto se vuelve más importante a medida que aumenta el número de motores conectados en un punto de la red.

Las máquinas síncronas presentan los mismos problemas que las máquinas de inducción antes los huecos de tensión, como las sobrecorrientes, oscilaciones en el torque y disminuciones en la velocidad. La diferencia radica en que si la maquina sincrónica pierde sincronismo con la red, es imperante desconectarla para luego ser llevada nuevamente a la velocidad sincrónica para la reconexión.

2.6.4 Estaciones convertidoras

Las estaciones conmutadoras (importantes en el transporte de energía HVDC) poseen rectificadores e inversores (los primeros son convertidores AC/DC y los segundos DC/AC). Al ser los puentes de tiristores un componente esencial de estos, las estaciones son susceptibles a los cambios de tensión y por ende, a los huecos de tensión.

Una característica importante del tiristor, elemento activo del sistema HVDC, es que requiere ser expuesto a un voltaje inverso por un tiempo determinado para impedir su conducción. De no ocurrir esto, el tiristor sigue conduciendo, aunque no tenga una señal de disparo. Esto resulta esencial para el proceso de conmutación. Cambios abruptos en la magnitud, fase o calidad de los voltajes de conmutación podrían causar una o, posiblemente, sucesivas fallas de conmutación.

El modelo básico de un convertidor trifásico de onda completa de un sistema HVDC se muestra a continuación. Las inductancias presentes representan a los transformadores que existen para elevar el voltaje al nivel deseado. Los tiristores son enumerados del 1 al 6, el ángulo de disparo de estos indicará el signo del voltaje U_d y la dirección de la potencia; menor a 90° eléctricos para el modo rectificador (desde el lado AC al lado DC) y mayor a 90° eléctricos para el modo inversor (desde el lado DC al lado AC) [8].

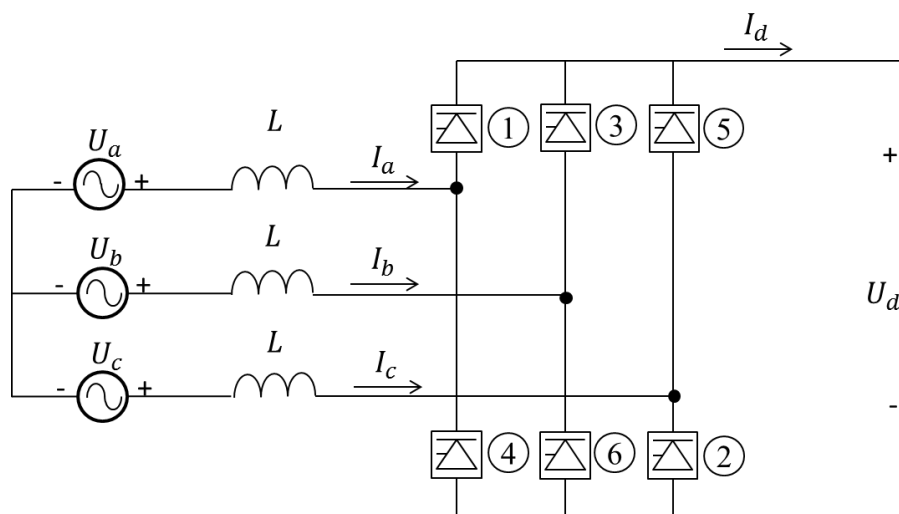


Figura 11 Modelo básico de un convertidor

En la Figura 12 se presenta un circuito en el que ocurre el proceso de conmutación, donde las válvulas 1 y 2 se encuentran conduciendo y la corriente continua será conmutada desde la válvula 1 a la válvula 3. La conmutación ocurre siempre que el voltaje entre las fases b y a (v_{ba} en

la figura) sea positivo. La diferencia de voltaje entre estas dos fuentes hará conducir una corriente circulante I_3 a través de las válvulas 1 y 3, y cuando esta corriente circulante iguala a I_d , la corriente a través de la válvula 1 es cero y el proceso de conmutación se ha completado. Perturbaciones en la red pueden ocasionar cambios en las magnitudes y ángulos de fase de las fuentes de voltaje de modo tal que la conmutación no pueda ocurrir como es debido.

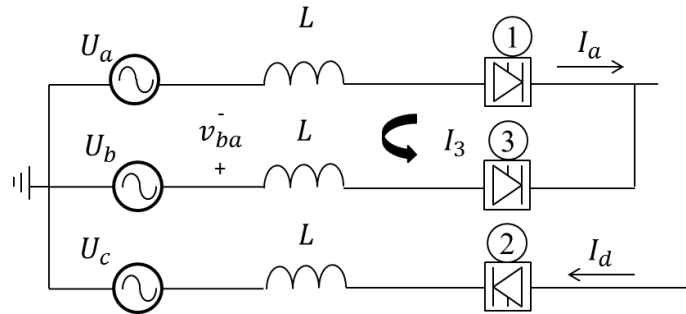


Figura 12 Proceso de Conmutación

Debido a la inductancia propia asociada al transformador del convertidor, la corriente por éste no puede cambiar de manera inmediata. La tasa de cambio finita de esta corriente significa que la transferencia de corriente de una válvula a otra requiere de un tiempo finito de conmutación. El área voltaje-tiempo "A", que se muestra en la Figura 13, es la que se requiere para la conmutación. Esta área está relacionada con la corriente de conmutación, y los ángulos de disparo α y de extinción γ . Mientras mayor sea la corriente de conmutación, mayor será el área voltaje-tiempo.

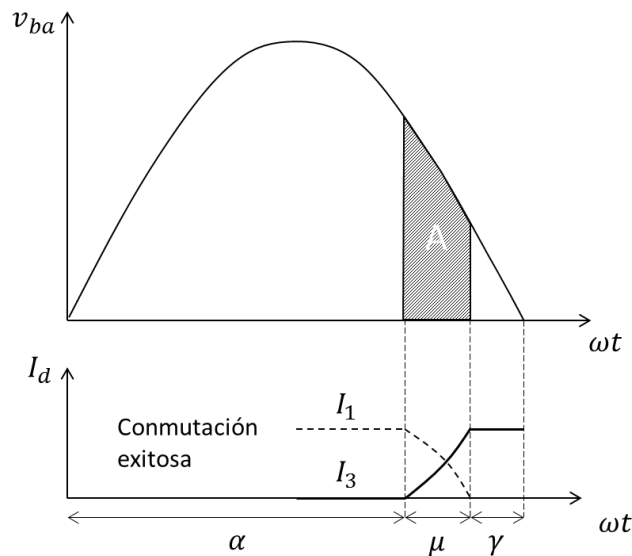


Figura 13 Voltaje y corrientes durante la conmutación

Sea una conmutación entre 1 y 3 (Figura 12). Si se asume que después del disparo de la válvula 3 ocurre una perturbación en el sistema, el área voltaje-tiempo se reducirá para la válvula 1, de modo que no se logra la condición de voltaje inverso para el apagado de ésta. Consecuentemente, la corriente a través de la válvula 1 comienza a crecer mientras que la corriente a través de la válvula 3 se reduce a cero nuevamente. La siguiente conmutación en producirse es desde la válvula 2 a la 4. Cuando la válvula 4 es disparada significa que ambas válvulas (1 y 4) conducen simultáneamente y el puente conversor es cortocircuitado en el lado DC, produciéndose un incremento en la corriente DC. La operación volverá nuevamente a la normalidad cuando la corriente sea conmutada de la válvula 1 a la válvula 3, lo que significa que el sistema tarda al menos un ciclo en regresar a la operación normal. Si la perturbación persiste, podría tomar mayor tiempo antes que se alcance la correcta operación ya que podrían ser causadas sucesivas fallas de conmutación.

Durante un hueco de tensión los voltajes fase-fase de la red se ven disminuidos y/o distorsionados momentáneamente. Si esto ocurre justo antes o durante el proceso de conmutación el área voltaje-tiempo puede ser insuficiente para una conmutación exitosa, el ángulo de extinción cambia de γ a γ' haciendo que se retrase el término de la conmutación como se muestra en la Figura 14.

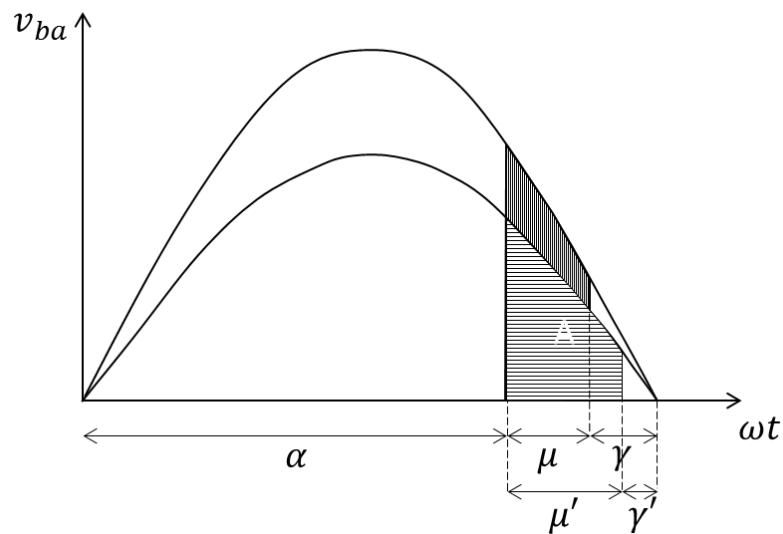


Figura 14 Reducción del margen de conmutación debido a una disminución de la magnitud del voltaje

El resultado final que ve el voltaje de la línea en HVDC se ilustra en la Figura 15. En ella se muestran los voltaje fase-fase con colores y en negro se muestra la rectificación.

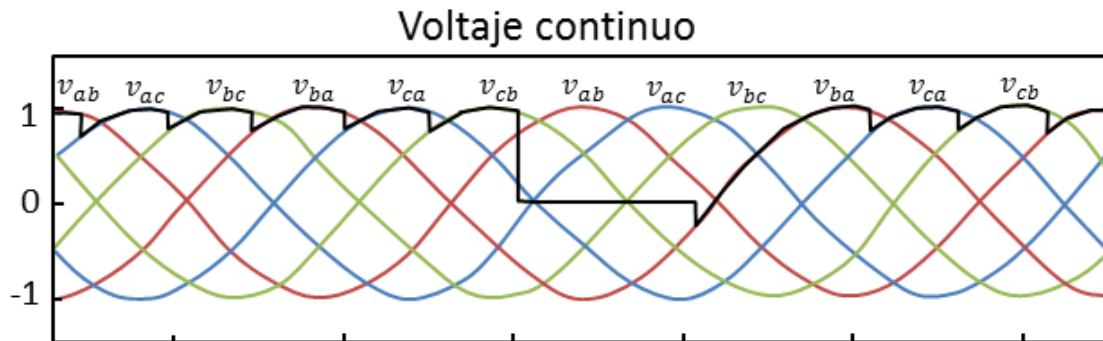


Figura 15 Voltaje continuo durante una falla de conmutación

Además de este efecto los huecos de tensión afectan también al proceso de conmutación por el salto de fase que trae consigo.

2.7 Curvas de voltaje-tolerancia

Los equipos eléctricos están diseñados para un cierto nivel de tensión el cual debe ser una señal de voltaje rms preferiblemente constante. También existen equipos que funcionan a voltajes distintos del nominal así como algunos otros que funcionan sin voltaje alguno (los que poseen almacenamiento de energía) pero por cortos periodos de tiempo. Para obtener una idea del desempeño de los equipos en términos de las tensiones aplicadas existen las denominadas Curvas de Voltaje-Tolerancia, concepto que fue descrito por Thomas Key [9]. Estas curvas describen bajo qué condiciones de voltaje y tiempo es posible operar dichos equipos. Ésta curva se construye aplicando una porción del voltaje nominal y calculando el tiempo que continua operando después de que la tensión fue perturbada.

Una revisión de las tolerancias de voltaje de distintos equipos se muestra a continuación, esta se lee de la siguiente forma: una tolerancia de α ms, $\beta\%$ quiere decir que el equipo soporta α ms una tensión de 0 volts e indefinidamente una tensión aplicada del $\beta\%$ de la nominal, cualquier caída más larga que α o más profunda que $\beta\%$ hará que el equipo no funcione correctamente o simplemente no funcione. En otras palabras la curva voltaje-tolerancia es rectangular con una “rodilla” en α ms, $\beta\%$ como se muestra en la Figura 16.

Tabla 1 Rangos de voltaje-tolerancia de varios equipos [10]

EQUIPO	Tolerancia de voltaje		
	Rango superior	Promedio	Rango inferior
PLC	20 ms, 75%	260 ms, 60%	620 ms, 45%
Tarjeta de entrada PLC	20 ms, 80%	40 ms, 55%	40 ms, 30%
Variador AC de 5 H.P	30 ms, 80%	50 ms, 75%	80 ms, 60%
AC control relay	10 ms, 75%	20 ms, 65%	30 ms, 60%
Motor partidor	20 ms, 60%	50 ms, 50%	80 ms, 40%
Computador personal	30 ms, 80%	50 ms, 60%	70 ms, 50%

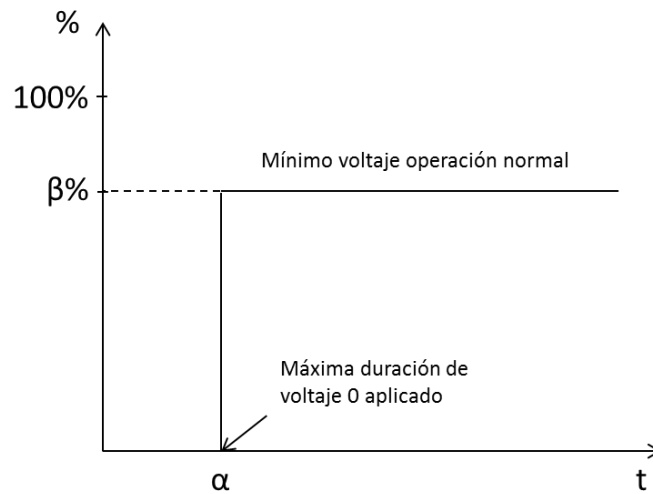


Figura 16 Curva Voltaje-Duración

3 Normativa sobre los huecos de tensión

Siendo los huecos de tensión un fenómeno relativamente reciente en cuanto a la importancia que se le otorga, existe poca regulación sobre el mismo, al menos en Chile. Sin embargo existe en la normativa chilena algunos aspectos sobre la calidad del voltaje que podrían considerarse como base legal para huecos de tensión.

En la literatura internacional existen regulaciones y clasificaciones sobre este fenómeno, muchas veces las normativas chilenas emplean estos conceptos para poder desarrollar los reglamentos, es por esto que serán revisados algunos.

3.1 Calidad de servicio, producto y suministro

La norma técnica de Seguridad y Calidad de Servicio [1] define tres conceptos asociados al servicio eléctrico; calidad de servicio, calidad de producto y calidad de suministro.

- *“Calidad de servicio: atributo de un sistema eléctrico determinado conjuntamente por la calidad del producto, la calidad del suministro y la calidad de servicio comercial, entregado a sus distintos usuarios y clientes.”*
- *“Calidad del producto: componente de la calidad de servicio que permite calificar el producto entregado por los distintos agentes del sistema eléctrico y que se caracteriza, entre otros, por la magnitud, la frecuencia y la contaminación de la tensión instantánea de suministro.”*
- *“Calidad del suministro: componente de la calidad de servicio que permite calificar el suministro entregado por los distintos agentes del sistema eléctrico y que se caracteriza, entre otros, por la frecuencia, la profundidad y la duración de las interrupciones de suministro.”*

El concepto de calidad de servicio en redes eléctricas ha tenido un fuerte impulso, abarcando un amplio rango de fenómenos, muchos de los cuales eran conocidos por la ingeniería con anterioridad al concepto de calidad de servicio. Es decir, que al momento de tratar de dar solución a un problema específico de la red, se debe tener también presente las demás variables que puedan ser alteradas, de manera que se observe el sistema como un todo y no centrándose en un fenómeno individual.

Dentro de las razones que justifican el aumento en el interés por este tema se encuentran el desarrollo y uso de equipos cada vez más sensibles a las variaciones del suministro, como lo son los equipos con electrónica de potencia y microprocesadores. La creciente tendencia a mejorar la eficiencia de los sistemas eléctricos ha llevado al desarrollo de dispositivos como reguladores de velocidad para motores o instalaciones de capacitancias *shunt* para reducción de pérdidas, entre otros. Lo anterior provoca un aumento en los niveles de armónicos en las redes, que afecta al correcto funcionamiento y la futura capacidad del sistema. Y finalmente el consumidor final es más consciente de los problemas asociados a la calidad de servicio, y comienza a buscar herramientas para solucionarlos.

Existen distintos índices que miden la calidad de suministro. Según la norma técnica se encuentran tiempos y frecuencias medias de interrupción los cuales se indican a continuación.

- Frecuencia media de interrupción por transformador, FMIT.
- Frecuencia media de interrupción por kVA, FMIK.
- Tiempo total de interrupción por transformador, TTIT.
- Tiempo total de interrupción por kVA, TTIK.

3.2 Calidad del voltaje

El suministro eléctrico se traduce en la capacidad de entregar energía a un consumo que depende tanto de la corriente como del voltaje entregado en un período de tiempo. El suministro y la calidad de producto se evalúan en función de la calidad del voltaje, definiendo rangos de operación aceptables según sea el caso.

En la práctica es necesario considerar los efectos que tienen las corrientes sobre las variaciones de voltaje, ya que éstas en su paso a través de las impedancias del sistema pueden producir variaciones significativas en la tensión.

La siguiente tabla muestra las exigencias para estándares de seguridad y calidad de servicio presentes en la Norma Técnica. Se muestran los rangos de tensión que deben tener las instalaciones según nivel de tensión además de encontrarse divididos por los distintos estados en que se puede encontrar el sistema.

Tabla 2 Rangos de voltajes permitidos según nivel de tensión

	Tensión		
	V_{min} [p. u.]	V_{max} [p. u.]	V_{nom}
Estado normal	0,97	1,03	≥ 500 kV
	0,95	1,05	≥ 200 kV < 500
	0,93	1,07	< 200 kV
Estado de alerta	0,96	1,04	≥ 500 kV
	0,93	1,07	≥ 200 kV < 500
	0,91	1,09	< 200 kV
Estado de emergencia	0,95	1,05	≥ 500 kV
	0,90	1,10	≥ 200 kV < 500
	0,90	1,10	< 200 kV

También existen los conceptos de variaciones rápidas de tensión o fluctuaciones de voltaje que figuran en el decreto supremo 327 [11], en el cual se observan los siguientes conceptos :

“ c) *Fluctuaciones de Voltaje:*

Las fluctuaciones de voltaje se clasificarán en dos categorías de acuerdo a su duración: corta duración, desde 0,5 ciclos hasta un minuto y larga duración, superiores a un minuto. Las fluctuaciones de corta duración se clasificarán en:

i. Instantáneas, de duración típica entre 0,5 ciclos y 30 ciclos y de magnitud típica entre 10% y 92,5% de la tensión nominal y entre 107,5% y 180%

ii. Momentáneas, de duración típica entre 30 ciclos y 3 segundos y de magnitud típica entre 10% y 92,5% de la tensión nominal y entre 107,5% y 140%

iii. Temporales, de duración típica entre 3 segundos y un minuto y de magnitud típica entre 10% y 92,5% de la tensión nominal y entre 107,5% y 120%

Las fluctuaciones de larga duración se clasificarán en:

i. Caída de voltaje, de duración típica mayor que un minuto y de magnitud típica entre 80% y 92,5% de la tensión nominal.

ii. Subida de voltaje, de duración típica mayor que un minuto y de magnitud típica entre 107,5% y 120%

Las disminuciones de voltaje de magnitud típica bajo el 10% del voltaje nominal, serán interrupciones de voltaje clasificadas según lo siguiente:

i. Momentáneas: de duración típica entre 0,5 ciclos y 3 segundos

ii. Temporal: de duración típica entre 3 segundos y un minuto

iii. Sostenida: de duración típica mayor que un minuto y de magnitud típica nula.

3.3 Clasificaciones

La siguiente tabla contiene una recopilación de información de los fenómenos electromagnéticos típicos en los sistemas eléctricos categorizados por duración, magnitud del voltaje y frecuencia [12].

Tabla 3 Clasificación de los distintos fenómenos de voltaje

Categorías		Espectro de Frecuencia	Duración	Magnitud del Voltaje	
Transitorio	Impulso	Nanosegundo	5 ns de subida	<50 ns	
		Microsegundo	1 μ s de subida	50 ns – 1 ms	
		Milisegundo	0,1 ms de subida	>1 ms	
	Oscilatorio	Baja Frecuencia	<5 kHz	0,3-50 ms	0 – 4 pu
		Frecuencia Media	5-500 kHz	20 μ s	0 – 8 pu
Alta Frecuencia		0,5-5MHz	5 μ s	0 – 4 pu	
Variaciones de Corta Duración	Instantáneas	Interrupciones		0,5 - 30 ciclos	< 0,1 pu
		Huecos de Tensión		0,5 - 30 ciclos	0,1 – 0,9 pu
		Sobretensiones		0,5 - 30 ciclos	1,1 – 1,8 pu
	Momentáneas	Interrupciones		30 ciclos – 3 s	< 0,1 pu
		Huecos de Tensión		30 ciclos – 3 s	0,1 – 0,9 pu
		Sobretensiones		30 ciclos – 3 s	1,1 – 1,4 pu
	Temporales	Interrupciones		3 s – 1 min	< 0,1 pu
		Huecos de Tensión		3 s – 1 min	0,1 – 0,9 pu
		Sobretensiones		3 s – 1 min	1,1 – 1,2 pu
Variaciones de Larga Duración	Interrupción Sostenida		>1 min	0 pu	
	Baja Tensión		>1 min	0,8 – 0,9 pu	
	Sobre Tensión		>1 min	1,1 – 1,2 pu	
Voltaje Desbalanceado			Estado Constante	0,5 – 2 pu	
Distorsión de la forma de onda	DC		0 – 100° armónica	Estado Constante	0 – 0,1 pu
	Armónica		0 – 6 kHz	Estado Constante	0 – 20 pu
	Interarmónicas			Estado Constante	0 – 2 pu
	Por conmutación		Amplio ancho de banda	Estado Constante	
	Ruido				0 – 1 pu
Fluctuaciones de voltaje			<25 Hz	Intermitente	0 – 1 pu
Variaciones de la Frecuencia nominal				<10 s	

En la Tabla 3 se destaca la categoría donde se encuentra el fenómeno de huecos de tensión. Éste es categorizado como variación de corta duración de voltaje del tipo instantánea, momentánea y temporal.

Al revisar este capítulo se concluye que los huecos de tensión son abordados de una u otra manera por la normativa nacional e internacional. En la normativa chilena existe preocupación por la continuidad de suministro y se establecen índices que deben ser seguidos (TTIK, FMIK, etc.). Sin embargo los huecos de tensión sólo se mencionan como variaciones rápidas de voltaje, sin establecer exigencias como límites en cuanto a su duración, sobre la recuperación del voltaje o el desfase que incorporan. Tampoco existe en la normativa de Chile estipulaciones sobre la frecuencia de ocurrencia de los huecos de tensión en el sistema. Esto último motiva a la realización de estimaciones de huecos de tensión, tema que ocupa este trabajo y que se tratará en los capítulos siguientes.

4 Evaluación de los huecos de tensión

Estocásticamente se puede predecir la ocurrencia de un hueco de tensión de determinadas características en una posición dada. La precisión del modelo empleado depende fuertemente de que tan precisos sean los datos y el modelo usados.

La precisión del modelo es manejable y puede aumentarse si se necesita, no así la precisión de los datos, cuya exactitud no puede ser manipulada. La información utilizada para la evaluación de huecos de tensión es la de confiabilidad del sistema eléctrico y sus componentes. La confiabilidad de los componentes sólo puede obtenerse mediante la observación del comportamiento de los componentes del sistema en un largo período de tiempo lo que provoca que se presenten las mismas incertezas que tiene el monitoreo de la calidad del sistema.

Las fallas se pueden categorizar en: auto-despejables, temporales, y permanentes. Las primeras pueden extinguirse solas sin ninguna intervención. Las fallas temporales es un corto circuito que se extingue luego de que el componente afectado es desenergizado y reenergizado. Las fallas permanentes son las que persisten a menos que sean reparadas. Los usuarios pueden experimentar interrupciones de corta y larga duración además de huecos de tensión. Los cortes pueden ocurrir cuando fallas permanentes ocurren en el alimentador que va hacia al consumidor. Los cortes de reducida duración resultan de fallas que son despejadas satisfactoriamente por interruptores y reconectores. Mientras que los huecos de tensión que puede experimentar el consumidor tienen su origen normalmente en fallas lejanas.

Cabe destacar que existe diferencia entre una falla ocasionada por un mal funcionamiento de un equipo, y fallas provocadas por cortocircuitos (una conexión anormal de baja impedancia entre dos puntos a diferente potencial). Se asumirá que los huecos de tensión son ocasionados por estos últimos por lo tanto las estadísticas usadas serán las de cortocircuitos.

Entre los factores que están involucrados en el análisis de huecos de tensión se encuentran:

Tabla 4 Factores que afectan a los huecos de tensión

Tipo de falla	Normalmente una falla trifásica es mucho más severa que una monofásica, sin embargo estas últimas son más frecuentes.
Localización de falla	Las fallas en sistemas de transmisión producen huecos que pueden ser observados a kilómetros de la falla, mientras que un falla en un sistema de distribución radial tiene efectos más locales.
Ángulo de inicio de la falla	Esta variable tiene un importante efecto en la capacidad de algunos equipos de tolerar el hueco de tensión. Este afecta el comportamiento transiente de la corriente de falla, pero no tiene mucha relevancia para el cálculo de eventos.
Impedancia de falla	Fallas francas causan huecos de tensión más severos que las que tienen impedancia de falla.
Tiempo de despeje de la falla	Los equipos de protección permiten diferentes ajustes causando huecos de diferente duración. Los huecos de tensión post-falla son producidos por recuperaciones de motores y transformadores.
Tiempo de reconexión	En los sistemas radiales de distribución los reconectadores automáticos cierran el circuito varias veces impactando en la frecuencia de los huecos de tensión originados a nivel de distribución.
Duración de la falla	Las fallas auto despejables producen huecos que dependen solo de la duración de la falla y no del sistema de protección.
Modificaciones al sistema	La impedancia entre el punto de falla y el punto de observación afecta la magnitud de hueco de tensión causado. La topología del sistema está en constante cambio y modifica esta impedancia.
Clima extremo	Viento, lluvia, hielo o nieve producen fallas y los huecos de tensión son más frecuentes durante estos climas extremos.

4.1 Métodos para calcular huecos de tensión

Los dos métodos estadísticos generalmente usados para la estimación de huecos de tensión en sistemas eléctricos son:

4.1.1 Método de las posiciones de falla

Este método calcula las características de un hueco de tensión, esto es, magnitud, duración y salto de fase. Este es calculado en los terminales de los equipos de un número de fallas propagadas a través del sistema. Cada posición de falla representa una falla en algún lugar del sistema. Aumentado el número de puntos de falla se aumenta la precisión del método. El número esperado de fallas al año es resultado del monitoreo históricos de los diferentes puntos de falla. El primer paso de este método es la elección de los puntos de falla. Una selección arbitraria de puntos de falla no garantiza la precisión del método, mas sí garantiza el incremento de los cálculos. Los puntos de falla y los tipos de falla pueden variar en un sistema en particular dependiendo de las condiciones del clima y de los mantenimientos de las empresas operarias. El mejor criterio para elegir la posición de falla debiera ser tal que cada posición represente fallas que lleven a huecos de tensión de similares características en el punto de interés, por ejemplo, si el punto de interés fuera una barra en particular, las posiciones de falla debieran ser ubicadas uniformemente a lo largo de las líneas y barras cercanas a la barra de interés, pues no tendría sentido ubicar posiciones de falla demasiado lejos ya que no conducirían a huecos de tensión apreciables y no aportarían información alguna.

4.1.2 Método de las distancias críticas

Este método, a diferencia del método anterior, calcula una posición de falla dado un voltaje. Mediante expresiones analíticas es posible determinar en qué parte del sistema una falla ocasionará un hueco de tensión de determinadas características en el lugar deseado. Entre más cerca la falla de la carga, más profundo será el hueco de tensión. Así, el número de huecos por debajo de un umbral será igual al número de fallas cerca de la carga de una posición indicada.

4.2 Cálculo de huecos de tensión

El método de las posiciones de falla es usado para evaluar y entender el desempeño del sistema en términos de los huecos de tensión (*system voltage dip performance*). El desempeño del sistema en términos de huecos de tensión se evalúa mediante la realización de análisis de fallas del

sistema para determinar voltajes en una barra particular como función de los puntos de falla a lo largo del sistema. La identificación entregará un área que contiene barras y líneas expuestas y los límites de área asociados

Un sistema en condición de cortocircuito puede expresarse como una red de generadores que alimentan una sola carga conectada en la barra fallada. Las corrientes pre-falla (corrientes del sistema en operación normal) no son consideradas al ser despreciables comparadas con las corrientes de falla ($I_{normal} \ll I_{cortocircuito}$).

Las corrientes y voltajes de falla pueden ser fácilmente obtenidos mediante el uso de la matriz de impedancia de barras Z_B del sistema, esta matriz puede ser empleada para calcular corrientes y voltajes para varios tipos de falla. Pueden ocurrir fallas que no necesariamente son simétricas³ y al tener los equipos distintas impedancias según cada componente de secuencia, existirá también una matriz de impedancia de barras para cada componente de secuencia ($Z_B^{(+)}$, $Z_B^{(-)}$ y $Z_B^{(0)}$), de esta manera puede encontrarse las corrientes y voltajes durante fallas balanceadas y desbalanceadas.

Los elementos de la diagonal de la matriz de impedancia se conocen como impedancias de punto de operación de las barras y corresponden a la impedancia del equivalente de Thevenin visto desde la barra k hasta la barra de referencia, se representan por z_{kk} . Fuera de la diagonal se les llama impedancias de transferencia y son las impedancias entre cada barra del sistema y las otras con respecto a la barra de referencia (z_{jk}) [13]. Los elementos de la diagonal permiten determinar las corrientes de cortocircuito de cada posible falla en las barras del sistema, los elementos fuera de la diagonal entregan el voltaje en la barra k cuando una corriente unitaria es inyectada en la barra j , por ello que las impedancias de transferencia permiten determinar el voltaje durante la falla debido a las corrientes de falla.

Lo anterior puede escribirse en forma de ecuaciones para un sistema lineal de n barras:

$$\begin{aligned}
 v_1 &= z_{11} \cdot i_1 + z_{12} \cdot i_2 + \dots + z_{1n} \cdot i_n \\
 &\quad \vdots \\
 v_k &= z_{k1} \cdot i_1 + z_{k2} \cdot i_2 + \dots + z_{kn} \cdot i_n \\
 &\quad \vdots \\
 v_n &= z_{n1} \cdot i_1 + z_{n2} \cdot i_2 + \dots + z_{nn} \cdot i_n
 \end{aligned} \tag{4.1}$$

³ Fallas simétricas son las producidas por cortocircuitos trifásicos, las demás se consideran asimétricas

Donde v_i son los voltajes en cada barra, producto de inyecciones de corriente i_1, i_2, \dots, i_n en las distintas barras, los elementos Z_{ik} son los elementos de la matriz de impedancia descritos anteriormente.

Matricialmente (4.1) se escribe:

$$V = Z \cdot I \quad (4.2)$$

Para el cálculo de huecos de tensión, deben diferenciarse los producidos por fallas simétricas y asimétricas, que provocan huecos balanceados y desbalanceados respectivamente.

4.2.1 Huecos de tensión balanceados

En este caso, la falla será simétrica, es decir sólo existen componentes de secuencia positiva, por lo tanto, la matriz de impedancia empleada será la de esta secuencia; la positiva.

Considerando un sistema de N barras más la barra de referencia, numerada como “barra cero”. De acuerdo al teorema de superposición, el voltaje durante una falla es el voltaje pre-falla en esa barra, más el cambio de voltaje debido a la falla

$$v_{kf} = v_{pref(k)} + \Delta v_{kf} \quad (4.3)$$

Donde $v_{pref(k)}$ es el voltaje pre-falla en la barra k y Δv_{kf} es el cambio de voltaje en la barra k debido a una falla en la barra f . Matricialmente puede escribirse como:

$$V_{dfv} = V_{pref} + \Delta V \quad (4.4)$$

Donde V_{dfv} es matriz de huecos de tensión que contiene los voltajes durante la falla, V_{pref} es la matriz de voltajes pre-falla que contiene los voltajes pre-falla, esta matriz contiene N columnas iguales, pues no importa donde ocurra la falla los voltajes pre-falla serán los mismos. La matriz ΔV contiene los cambios de voltaje. Los elementos de la fila k en la matriz V_{dfv} contiene los voltajes en la barra k cuando ocurre una falla en las barras $1, 2, \dots, N$, mientras la columna f de V_{dfv} contienen el voltaje en las barras $1, 2, \dots, N$, para una falla en la barra f .

En una falla trifásica en la barra f la corriente inyectada en esta barra está dada por el cociente entre el voltaje pre-falla y el elemento z_{ff} de la matriz de impedancia, el signo menos indica el sentido de la corriente.

$$i_f = \frac{-v_{pref(f)}}{z_{ff}} \quad (4.5)$$

Al tener la corriente por la barra, el cambio de voltaje puede obtenerse mediante la impedancia de transferencia entre la barra k y la barra f dado por la siguiente ecuación (4.6).

$$\Delta v_{kf} = -z_{kf} \cdot \frac{V_{pref(f)}}{z_{ff}} \quad (4.6)$$

Matricialmente, se tiene:

$$\Delta V = -Z \cdot (Diag(Z))^{-1} \cdot V_{pref}^T \quad (4.7)$$

Donde:

Z : es la matriz de impedancia de barras del sistema.

$(Diag(Z))^{-1}$: Es la matriz inversa de la matriz que contiene sólo la diagonal de la matriz de impedancia.

V_{pref}^T : es la matriz traspuesta de voltajes pre-falla.

Luego el voltaje durante la falla es:

$$v_{kf} = v_{pref(k)} - z_{kf} \cdot \frac{V_{pref(f)}}{z_{ff}} \quad (4.8)$$

$$v_{kf} = v_{pref(k)} \left(1 - \frac{z_{kf}}{z_{ff}} \right)$$

Matricialmente se tendrá:

$$V_{dfv} = V_{pref} - Z \cdot (Diag(Z))^{-1} \cdot V_{pref}^T \quad (4.9)$$

Si se asume que el sistema operaba en condiciones normales antes de la falla, pueden asumirse los voltajes de prefalla como 1 en por unidad. De este modo se tendrá una simple expresión como la siguiente:

$$V_{dfv} = [1] - Z \cdot (Diag(Z))^{-1} \cdot [1] \quad (4.10)$$

En este caso la matriz [1] representa una matriz de dimensión $n \times n$ rellena de unos.

De la expresión (4.8) se desprende que una falla en cualquier barra afecta a todas las barras del sistema, y la magnitud de este efecto depende de la impedancia de transferencia entre el punto de falla y las barras del sistema. Generalmente esta impedancia decrece con la distancia entre el punto de falla y la barra de la carga, por lo tanto, hay puntos alejados que no perciben huecos de tensión. También se observa que el cambio de voltaje depende de la impedancia de operación en la barra fallada z_{ff} y ésta determina si la barra es “débil” o “fuerte. Si la impedancia de operación en la barra es pequeña, más “fuerte” será la barra fallada y más fuerte será la caída de tensión en otra barra. Al contrario, si la impedancia es grande las caídas de tensión en las demás barras serán menores y la barra fallada será “débil”.

Aplicando la expresión $v_{kf} = v_{pref(k)} \left(1 - \frac{z_{kf}}{z_{ff}}\right)$ en un sistema radial de distribución y asumiendo que $v_{pref(k)}$ es igual 1 [p.u.] se rescata la relación antes obtenida, donde v_{kf} es el voltaje en el punto de conexión común (pcc), z_{kf} es la impedancia entre la fuente de generación y el pcc y z_{ff} se descompone entre la impedancia de la fuente de generación y la impedancia entre el punto de conexión común y el punto de falla.

$$V_{hueco} = 1 - \frac{z_{kf}}{z_{ff}} = 1 - \frac{Z_{GC}}{Z_{GC} + Z_{FC}} = \frac{Z_{FC}}{Z_{FC} + Z_{GC}} \quad (4.11)$$

4.2.2 Huecos de tensión desbalanceados

En este caso, al ser fallas asimétricas, se necesita emplear las componentes simétricas de secuencia positiva (1), negativa (2) y cero (0) en la resolución del problema. Los voltajes son obtenidos con el mismo procedimiento que para huecos balanceados pero independientemente para cada secuencia, y luego mediante la transformación de componentes de secuencia a componentes reales de Fortescue son llevados a los voltajes de cada fase.

Sabiendo que los voltajes antes de la falla son nulos en las secuencias negativa y cero, se tienen las siguientes relaciones matriciales para la matriz de huecos de tensión:

$$V_{dfv}^{(1)} = V_{pref}^{(1)} + \Delta V^{(1)} \quad (4.12)$$

$$V_{dfv}^{(2)} = 0 + \Delta V^{(2)} \quad (4.13)$$

$$V_{dfv}^{(0)} = 0 + \Delta V^{(0)} \quad (4.14)$$

Aplicando la transformación de Fortescue se tiene:

$$V_{dfv}^a = V_{dfv}^{(1)} + V_{dfv}^{(2)} + V_{dfv}^{(0)} \quad (4.15)$$

$$V_{dfv}^b = a^2 V_{dfv}^{(1)} + a V_{dfv}^{(2)} + V_{dfv}^{(0)} \quad (4.16)$$

$$V_{dfv}^c = a V_{dfv}^{(1)} + a^2 V_{dfv}^{(2)} + V_{dfv}^{(0)} \quad (4.17)$$

Reemplazando (4.12), (4.13) y (4.14) en (4.15), (4.16) y (4.17) se obtiene:

$$V_{dfv}^a = V_{pref}^{(1)} + \Delta V^{(1)} + \Delta V^{(2)} + V_{dfv}^{(0)} \quad (4.18)$$

$$V_{dfv}^b = a^2 \left(V_{pref}^{(1)} + \Delta V^{(1)} \right) + a \Delta V^{(2)} + \Delta V^{(0)} \quad (4.19)$$

$$V_{dfv}^c = a \left(V_{pref}^{(1)} + \Delta V^{(1)} \right) + a^2 \Delta V^{(2)} + \Delta V^{(0)} \quad (4.20)$$

4.3 Segmentación del sistema en función de los huecos de tensión

Un hueco de tensión producido por una falla en cualquier parte del sistema puede observarse también en muchas otras partes del sistema. Esto es representado en la matriz V_{dfv} que contiene los voltajes en todas las barras del sistema durante una falla también en cualquier barra del sistema. La diagonal de la matriz V_{dfv} contiene los voltajes en la barra cuando una falla es producida en esa misma barra, por lo tanto en el caso de fallas trifásica francas a tierra, los elementos de la diagonal serán iguales a cero. Los elementos fuera de la diagonal son los voltajes en una barra cualquiera k cuando se producen fallas en una barra determinada f . Con esta información y los diagramas unilíneales del sistema puede obtenerse las llamadas Área Afectada (*Affected Area*) y Área Expuesta o de Vulnerabilidad (*Exposed Area* o *Area of Vulnerability*) [14].

La matriz de huecos de tensión V_{dfv} en un sistema de N barras y durante una falla trifásica franca se ve de la siguiente manera:

$$V_{dfv} = \begin{pmatrix} 0 & 1 - \frac{z_{1,2}}{z_{2,2}} & \dots & 1 - \frac{z_{1,N}}{z_{N,N}} \\ 1 - \frac{z_{2,1}}{z_{1,1}} & 0 & & \vdots \\ \vdots & & \ddots & \vdots \\ 1 - \frac{z_{N,1}}{z_{1,1}} & \dots & & 0 \end{pmatrix} \quad (4.21)$$

4.3.1 Área afectada

Como se mencionó anteriormente las columnas de matriz mostrada contienen la información del voltaje de cada barra al ocurrir una falla en la barra de dicha columna. De esta forma, de una columna cualquiera es posible determinar qué barras sienten más la falla ocurrida en la barra de la columna.

Si se define cierto umbral para filtrar el voltaje, puede establecerse en el diagrama unilineal del sistema un “área afectada” por la falla ocurrida en dicha barra. El área afectada, depende del límite usado para definir el hueco de tensión, un límite de voltaje remanente 0,8 [p. u.] del hueco de tensión crea un área expuesta distinta que un límite de 0,6 [p. u], ya que la falla produce distintas variaciones de voltaje en las demás barras del sistema y el umbral definido condiciona si una barra cae o no en el *affected area*.

4.3.2 Área de vulnerabilidad o área expuesta

De igual forma al caso anterior, las filas de la matriz V_{dfv} contienen la información de una barra cuando ocurren fallas en las demás barras del sistema. De una fila cualquiera pueden observarse los voltajes inferiores a cierto umbral, de modo que puedan ser identificadas las barras que causen huecos de tensión de cierta magnitud en la barra de la fila.

Esta información en el diagrama unilineal del sistema puede verse representado como el área de vulnerabilidad o área expuesta de cierta barra. Al igual que el concepto de área afectada, esta área no es única y cambia según el tipo de umbral o límite para el hueco de tensión, esto quiere

decir que, las barras que provocan huecos de tensión de cierta magnitud en una barra definida cambian si se altera el umbral elegido.

A continuación se presenta un ejemplo de área de vulnerabilidad y los límites de cruce de línea asociados.

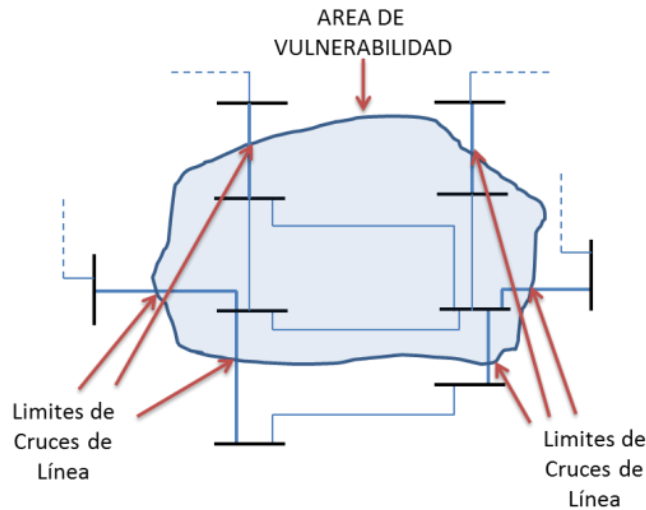


Figura 17 Ejemplo de área de vulnerabilidad y límites de cruce de línea

4.4 Estimación estocástica

El método de las posiciones de falla es la manera más ampliamente usada para determinar el número de huecos de tensión experimentados en cada barra. El método consiste en simular fallas en las distintas barras y líneas del sistema. La frecuencia de ocurrencia de los huecos de tensión es calculada a partir de la tasa de falla (de los distintos tipos de falla) de las barras y líneas del sistema. Las posiciones de falla pueden ser también barras virtuales que se sitúan a lo largo de las líneas de transmisión, donde su tasa de falla será la de la línea completa dividida por el número de posiciones de falla que presenta esa línea. En la mayoría de los casos, las líneas son divididas de manera discreta, por ejemplo, cada 10 km existe una posición de falla, o en la mitad de la línea; o en $\frac{1}{4}$ de la línea. Por este motivo, la matriz de huecos de tensión antes descrita V_{dfv} ya no tiene dimensión cuadrada, si no, tantas filas como barras del sistema y tantas columnas como posiciones de falla sean escogidas.

De las razones antes mencionadas, se desprende que el método es computacionalmente intensivo, ya que se simulan diferentes tipos de falla en todas las posiciones de falla escogidas. La elección de las posiciones de falla afecta a la precisión del método, sobretodo el número de

posiciones a lo largo de las líneas de transmisión, una línea o barra puede tener muy alta tasa de falla, por condiciones de su entorno o climáticas y otra casi ni aportar con cortocircuitos al sistema. De modo que no necesariamente dividir la línea en muchas posiciones de falla conllevará a una alta precisión, pero si asegurará grandes esfuerzos computacionales. También influye como se asuma la distribución de fallas a lo largo de las líneas, si estas se distribuyen al azar de manera uniforme, seguir una distribución normal, exponencial, o una combinación de todas.

4.4.1 Frecuencia acumulada de huecos de tensión

Mediante el voltaje remanente en una barra dada puede discriminarse si se observa un hueco severo o uno sutil. La frecuencia acumulada de huecos de tensión da cuenta de cuantos huecos de tensión de valores remanentes menores o iguales a cierto umbral ocurrieron en un período de tiempo.

La cantidad de huecos de tensión que experimenta una barra, depende fuertemente de lo que ocurra en lo que la literatura llama como vecindad eléctrica (*electrical neighbourhood*), que corresponde al área de vulnerabilidad de dicha barra. El número de huecos en la barra depende de la confiabilidad de las barras en el área de vulnerabilidad, una falla en esta área conllevará a que la barra experimente un hueco de tensión, y el número de fallas durante el año (tasa de falla) dentro de esta área será el número esperado de huecos de tensión para la barra en estudio. Cabe destacar que el número de fallas en el área de vulnerabilidad es la suma de las fallas en las barras y las porciones de líneas de tensión que pertenecen al área expuesta.

Es necesario recordar que las tasas de falla son datos de entrada para el modelo, tanto las de las barras como de las porciones de las líneas, cada posición de falla puede tener una tasa de falla diferente (tipo de instalación, etc). Estas tasas de falla, son también diferenciadas en los tipos de falla que podrían producirse, trifásico, monofásico, bifásico y bifásico a tierra.

Después de tomar en cuenta las tasas de falla calculadas que se distribuyen de manera uniforme a lo largo de las líneas. El número esperado de huecos de tensión debido a estas fallas a lo largo de los límites de cruce en las barras se calcula como la frecuencia acumulativa de huecos de tensión (Cumulative number of dips CNS) que es la suma de los huecos de tensión debido a fallas en las barras (NSBF) y debido a fallas en las líneas (NSLF).

$$\text{CNS} = \text{NSBF} + \text{NSLF}$$

Estos componentes se calculan a partir de las tasas de falla y la matriz de huecos de tensión, en particular de los elementos que pertenecen al área de vulnerabilidad

$$NSBF = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^4 \sum_{k=1}^3 B_i \cdot PO_j \cdot BFR$$

$$NSLF = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^4 \sum_{k=1}^3 L \cdot LL \cdot PO \cdot LFR$$

Donde,

B y L son el número de barras y líneas dentro del área de vulnerabilidad.

LL corresponde al largo de la porción de línea dentro del área de vulnerabilidad.

PO es la probabilidad de ocurrencia de falla (1 para fallas simétricas y 1/3 para asimétricas)

BFR y LFR las tasas de falla de barras y líneas respectivamente.

El índice i indica los tipos de falla, j se mueve dentro del área de vulnerabilidad hasta n el número de barras o líneas dentro de ésta. Y por último el índice k indica el número de fases.

Cabe destacar que el método de las posiciones de falla también permite obtener el tiempo de duración del hueco de tensión, esto se logra incorporando al cálculo de falla los tiempos de despeje de estas, de esta manera puede estimarse la frecuencia de ocurrencia de huecos de tensión de cierta duración.

4.5 Ejemplo del método de posiciones de falla

Ejemplo sacado del libro *Understanding Power Quality Problems* [3], que consiste en un sistema de 275/400 KV, donde los nodos 1 y 2 representan subestaciones de 400 KV; los nodos 3, 4 y 5 representan subestaciones de 275 KV, las ramas entre 1- 3 y 3-4 representan transformadores. Los valores de las impedancias mostradas en la figura están en por unidad con base 100 MVA. El ejemplo calcula hasta la matriz de huecos de tensión, se incorpora la estimación de estos por cada barra.

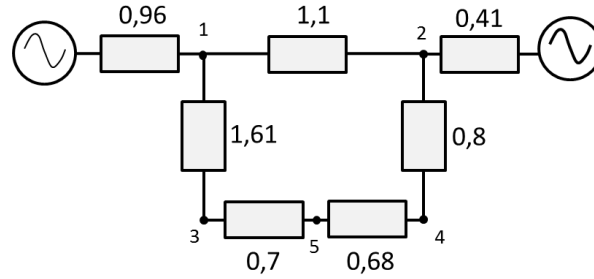


Figura 18 Diagrama de un circuito de 400/275 KV

La matriz de impedancia de la red, se obtiene mediante la inversa de la matriz de admitancias. La cual es la siguiente:

$$Y = \begin{pmatrix} 2,5719 & -0,9091 & -0,6211 & 0 & 0 \\ -0,9091 & 4,5981 & 0 & -1,25 & 0 \\ -0,6211 & 0 & 2,0497 & 0 & -1,4286 \\ 0 & -1,25 & 0 & 2,72059 & -1,47059 \\ 0 & 0 & -1,4286 & -1,47059 & 2,89916 \end{pmatrix} \quad (4.22)$$

Invirtiendo la matriz (4.22) se obtiene la matriz de impedancias de barras la cual es:

$$Z = Y^{-1} = \begin{pmatrix} 0,5453 & 0,1771 & 0,3889 & 0,2548 & 0,3209 \\ 0,1771 & 0,3344 & 0,2439 & 0,3012 & 0,2730 \\ 0,3889 & 0,2439 & 1,2534 & 0,6144 & 0,9293 \\ 0,2548 & 0,3012 & 0,6144 & 0,9225 & 0,7707 \\ 0,3209 & 0,2730 & 0,9293 & 0,7707 & 1,1938 \end{pmatrix} \quad (4.23)$$

Mediante la ecuación (4.7) es posible obtener las variaciones de voltajes durante las fallas en cada una de las barras, para luego obtener el valor de los huecos de tensión esto es la matriz V_{dfv} de la ecuación (4.10).

$$V_{dfv} = [1] - Z \cdot (Diag(Z))^{-1} \cdot [1] = \begin{pmatrix} 0 & 0,4704 & 0,6897 & 0,7238 & 0,7312 \\ 0,6753 & 0 & 0,8054 & 0,6735 & 0,7713 \\ 0,2868 & 0,2705 & 0 & 0,3340 & 0,2216 \\ 0,5327 & 0,0993 & 0,5098 & 0 & 0,3544 \\ 0,4116 & 0,1837 & 0,2586 & 0,1646 & 0 \end{pmatrix} \quad (4.24)$$

Donde:

$$Diag(Z) = \begin{pmatrix} 0,5453 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0,3344 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1,2534 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0,9225 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1,1938 \end{pmatrix}$$

$$[1] = \begin{pmatrix} 1 & 1 & 1 & 1 & 1 \\ 1 & 1 & 1 & 1 & 1 \\ 1 & 1 & 1 & 1 & 1 \\ 1 & 1 & 1 & 1 & 1 \\ 1 & 1 & 1 & 1 & 1 \end{pmatrix}$$

La matriz (4.24) es más fácilmente leída mediante la siguiente tabla:

Tabla 5 Huecos de Tensión en el sistema del ejemplo

Voltaje en Nodo	Falla en Nodo				
	1	2	3	4	5
1	0	0,47036345	0,68971983	0,72377622	0,73118885
2	0,67525553	0	0,80540141	0,6735358	0,77134606
3	0,28684478	0,27053255	0	0,33403424	0,22156481
4	0,53271397	0,09927239	0,50983354	0	0,35440201
5	0,4115538	0,18365381	0,25860115	0,16458951	0

Las siguientes dos tablas contienen la cantidad de huecos de tensión ocurridos según cada magnitud. Estas se obtuvieron a partir de la suma de los huecos de tensión que ocurren en cada barra dentro del nivel (umbral) de tensión definido Incorporando valores de tasas de falla, es posible obtener la cantidad de huecos de tensión originados por dichas fallas durante un período de tiempo. Conociendo en qué elemento o cerca de que barra se produjo la falla, es posible obtener la suma de huecos de tensión de cierta severidad.

Tabla 6 Cantidad de Huecos de tensión según magnitud

	100%-80%	80%-60%	60%-40%	40%-20%	20%-0%
Barra1	0	3	1	0	1
Barra2	1	3	0	0	1
Barra3	0	0	0	4	1
Barra4	0	0	2	1	2
Barra5	0	0	1	1	3

Tabla 7 Cantidad de Huecos de tensión menores que cierta magnitud

	<100%	<=80%	<=60%	<=40%	<=20%
Barra1	5	5	2	1	1
Barra2	5	4	1	1	1
Barra3	5	5	5	5	1
Barra4	5	5	5	3	2
Barra5	5	5	5	4	3

Para encontrar las tablas de frecuencia absoluta de ocurrencia y frecuencia acumulada de ocurrencia, se supondrá que las fallas ocurren en las mismas barras y todas estas tienen una tasa de falla de $\lambda = 0,01$ fallas por año.

La cantidad esperada de huecos de tensión por año resulta de multiplicar la cantidad de huecos de tensión por la tasa de falla de cada evento, en este caso es 0,01 para cada uno, de esta forma puede construirse un histograma de frecuencia de ocurrencias de huecos de tensión para cada barra y para cada nivel de magnitud de los huecos. A continuación se muestra dicho histograma para el sistema ejemplo además de la tabla con la que fue construido.

Tabla 8 Tabla acumulativa de huecos de tensión esperados por año

	<100%	≤80%	≤60%	≤40%	≤20%
Barra1	0,05	0,05	0,02	0,01	0,01
Barra2	0,05	0,04	0,01	0,01	0,01
Barra3	0,05	0,05	0,05	0,05	0,01
Barra4	0,05	0,05	0,05	0,03	0,02
Barra5	0,05	0,05	0,05	0,04	0,03

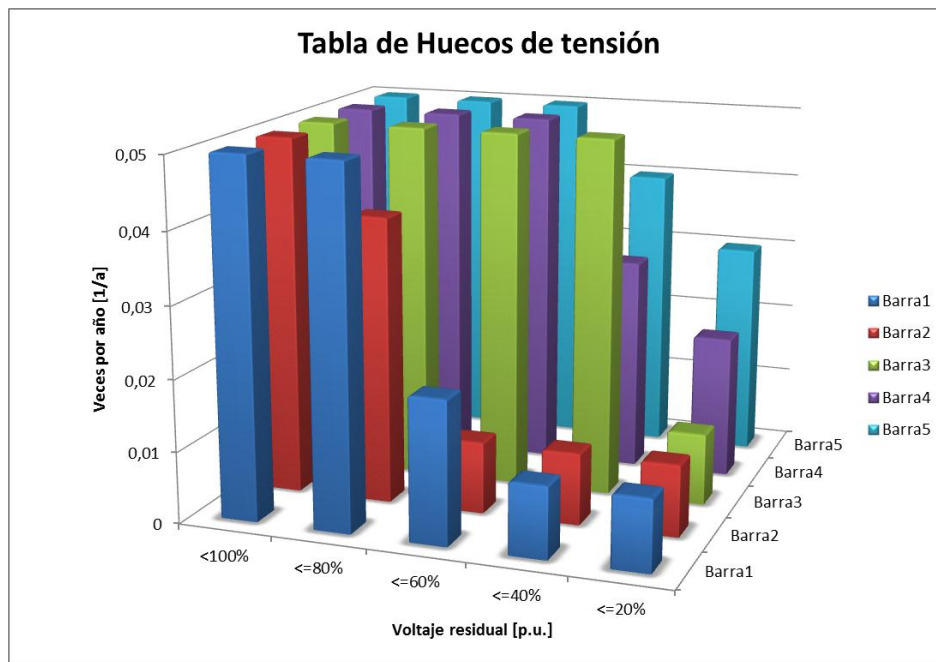


Figura 19 Histograma de huecos de tensión del sistema ejemplo

Con esta información gráfica es posible comprobar el comportamiento del sistema, por ejemplo puede observarse que es muy improbable la ocurrencia de huecos de tensión de magnitud (voltaje remanente) menor que un 20%, salvo para la barra 5 que es propensa en 0,3 veces al año de este evento cuando las demás barras tienen una ocurrencia de 0,2 veces por año o menor, también puede verificarse que todas las barras tienen alta probabilidad de tener huecos de tensión de baja intensidad (<100%) incluso de intensidad mediana (<80%).

5 Implementación

5.1 Herramientas

5.1.1 Programa Power Factory DigSilent

Como se indicó en los capítulos anteriores, la estimación estocástica de huecos de tensión, requiere de cálculos de falla en las barras y línea del sistema, además de incorporar el concepto de confiabilidad en los elementos del sistema. Para el cálculo de la estimación de los huecos de tensión se empleará el software Power Factory DigSilent el cual posee un módulo para el cálculo mencionado.

Se empleará la función *Voltage Sag Table Assessment (Voltage sag table assessment.ComVsag)* la cual calcula las caídas de voltaje en las distintas barras del sistema considerando fallas en las barras y líneas que pertenezcan a un valor de área de vulnerabilidad definido por el usuario. El algoritmo que se encuentra en el manual del software [15] se detalla en los siguientes párrafos.

Cabe mencionar que el programa DigSilent emplea el método de las posiciones de falla, simula varios tipos de falla en las barras relevantes, comienza con los puntos de carga seleccionados y procede con las barras vecinas hasta que el voltaje remanente en todas los puntos de carga no caigan por debajo del límite expresado como el Área Expuesta (*exposed area*) definida.

Este límite de área expuesta es el máximo voltaje remanente en el punto de carga seleccionado para que el cálculo continúe haciendo cortocircuitos en barras más lejanas. Si los cortocircuitos lejanos resultan en voltajes remanentes en el punto de carga de interés más altos que este límite, entonces no serán analizados más cortocircuitos. Luego de encontrar las barras que integran el área de vulnerabilidad con dicho límite, el programa calcula cortocircuitos en la mitad de las líneas conectadas a las barras pertenecientes al conjunto encontrado con anterioridad.

Con el área de vulnerabilidad encontrada (o área expuesta), el archivo de resultados contiene las impedancias de falla del sistema y las tensiones para los dos extremos de las líneas relevantes y sus mitades. Las impedancias descritas son interpoladas a lo largo de la línea mediante un polinomio de orden 2 (al haber 3 datos: 2 extremos y la mitad). De ellos se estiman los voltajes remanentes entre los extremos de la línea y el medio.

Incorporando la tasa de falla de los equipos del sistema (como en el ejemplo de 4.5), es posible determinar las gráficas *voltage sag plot*, que son gráficos de barra que en el eje de las ordenadas contienen las cantidad de huecos de tensión esperados por año y en el eje de las abscisas las magnitudes de los diferentes huecos de tensión (como la Figura 19 del ejemplo anterior). Un esquema del método para el cálculo de huecos de tensión en DigSilent es mostrado en la Figura 20.

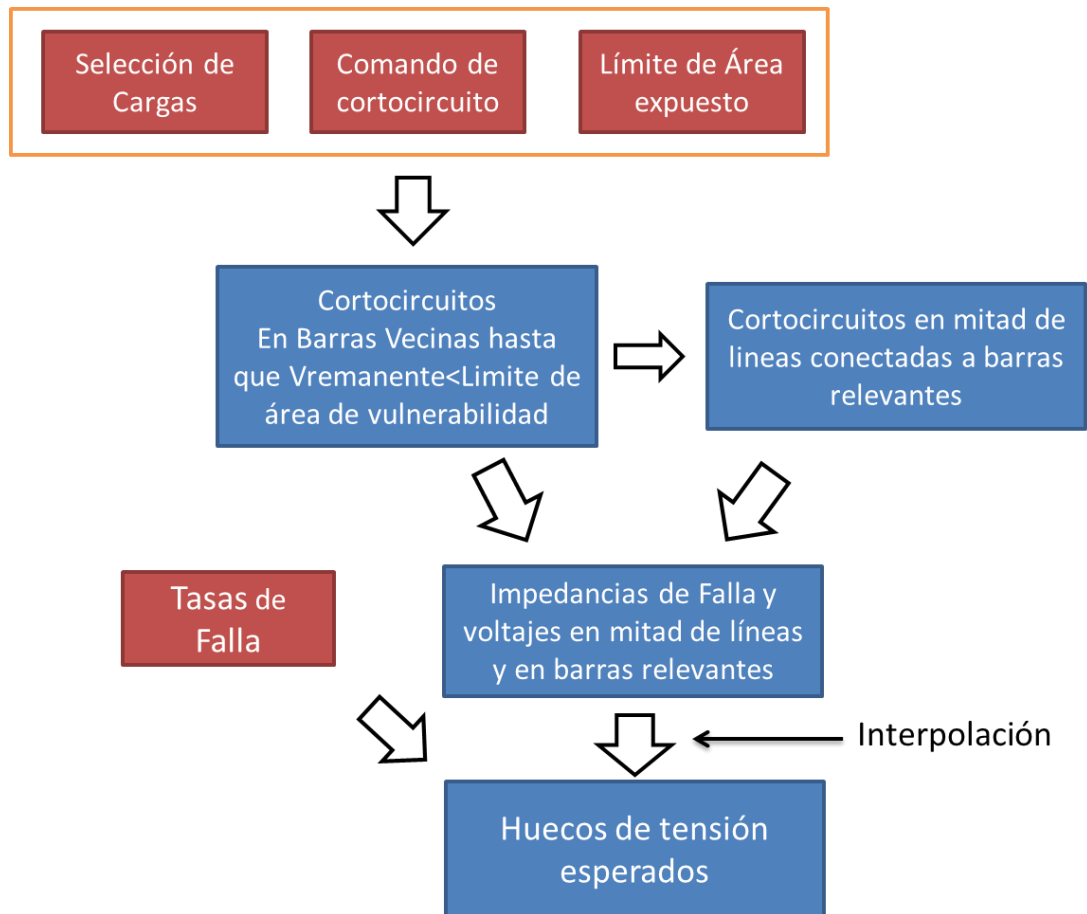


Figura 20 Esquema del método para el cálculo de huecos de tensión en DigSilent

Es importante señalar que en el paso *Selección de Cargas*, pueden elegirse tanto una barra como también la totalidad de las barras del sistema, influyendo esto en el área donde se calculan los cortocircuitos. Es decir, si se elige una barra se calculará el área de vulnerabilidad para esta barra, dejando de calcular cortocircuitos al llegar al *límite de área expuesto* establecido. Esto es ejemplificado en la Figura 21 donde se muestra las barras y líneas contenidas en el cálculo para la barra 1. En cambio, si se eligen más barras (1, 7, 4 y 8 en el ejemplo de la Figura 22) el área de vulnerabilidad será mayor, por lo cual se calcularán más cortocircuitos para el mismo *límite de área*

expuesto. De esta forma, la misma barra 1 tendrá en el segundo caso un mayor número de huecos de tensión calculados. Estos huecos de tensión “extras” calculados, siempre serán de baja magnitud, pues no entraron en el área de vulnerabilidad calculada para barra en singular ya que son menores que el *Límite de área expuesto* de dicha barra.

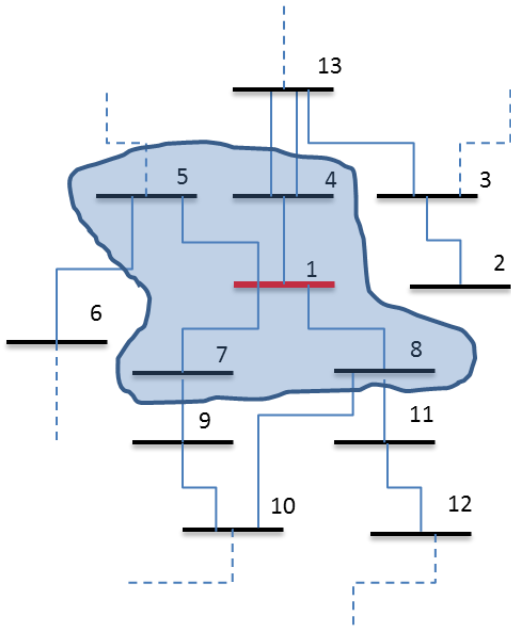


Figura 21 Load Selection: Barra 1

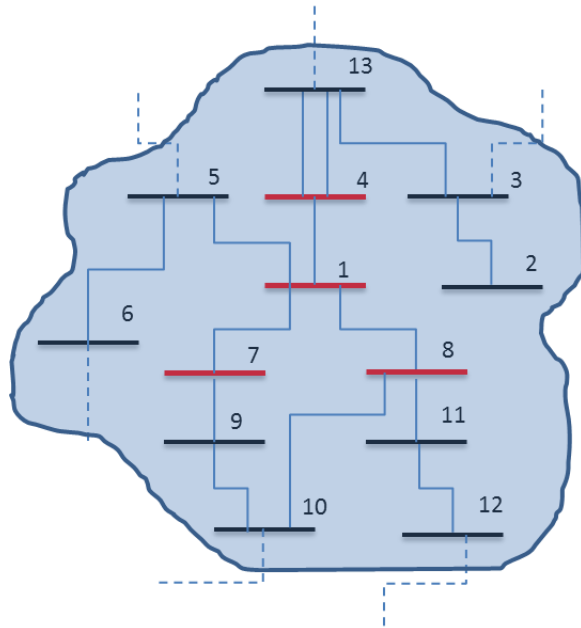


Figura 22 Load Selection: Barras 1,4,7 y 8

5.1.2 Modelos del SIC empleado

Para la estimación de huecos de tensión se emplearán las bases de datos empleadas en este trabajo son de carácter público y son proporcionadas por la Comisión Nacional de Energía (CNE) en su Estudio de Transmisión Troncal del año 2010 (ETT2010), dichas bases corresponden al archivo DigSilent con nombre *SIC ETT 2010 - 1019.dz*, pudiendo obtenerse este del anexo número 9 de dicho informe [16].

Las unidades generadoras síncronas que se encuentran en este modelo se detallan en el Anexo B. En ella, se presentan los detalles para cada caso de estudio, se presenta las potencias activas y reactivas, y se indica si se encuentran en servicio o fuera de servicio en cada caso.

Por otro lado, para la determinación de las áreas de vulnerabilidad, se emplea otro modelo DigSilent del SIC (en el archivo *SIC_simpl.dz*). Éste es un modelo reducido, que contiene el Sistema de Transmisión Troncal más otras barras de consumos y generación. Este modelo fue utilizado por el alumno en un ramo Sistemas Eléctricos de Potencia por lo que no es de su autoría.

Sin embargo el modelo fue modificado por el alumno para incorporar barras del sistema ya que el modelo original se encontraba reducido.

Del mismo modo se omitieron algunas barras por el poco aporte que hacen al análisis aumentando sólo complejidad a los cálculos, como también las barras que se encuentran muy próximas unas con otras. Las barras que fueron modificadas se indican en la Tabla 9 junto al criterio usado para su modificación.

Tabla 9 Barras no consideradas en segundo modelo

S/E	Razón por la que no se considera
Lampa.xlsx	Muy próxima a Cerro Navia y Polpaico
El Rodeo.xlsx	No aporta a los Cálculos
Maipo.xlsx	Se reemplaza por una sola línea hasta Colbun
La Candelaria.xlsx	Se reemplaza por una sola línea hasta Colbun
Itahue.xlsx	No aporta a los Cálculos
Barro Blanco.xlsx	No aporta a los Cálculos

5.1.3 Tasas de falla

Los datos empleados para el cálculo de tasas de falla, fueron proporcionados por la gente de TRANSELEC, además de información obtenida del CDEC-SIC, como lo son largos y características de las líneas. TRANSELEC por su parte aportó con información de fallas en sus instalaciones en los años 2008, 2009, 2010 y 2011. Los tramos de cuyos números de fallas fueron facilitados, indicando también su largo en kilómetros, se muestran a continuación:

Tabla 10 Datos de Fallas por año

TRAMO	2.008	2.009	2.010	2.011	Total general	largo km
220Maitencillo-Cardones			1		1	132
220Pan de Azúcar-Maitencillo		1			1	197,22
220PandeAzucarMaitencillo				4	4	197
220Vilos-Pan de Azúcar			2	2	4	228,6
220AltoJahuel-CerroNavia			1		1	39,2
220AltoJahuel-Chena			1		1	30,2
220CerroNavia-Polpaico	1		1		2	29,8
220QiullotaNogales		1			1	27
220Rapel-CerroNavia		1	5		6	114,6
500Ancoa-Alto Jahuel	7				7	240,3

500Ancoa-Polpaico		2	1		3	309,6
500Charrua-Ancoa1	3	4	2	1	10	182,8
500Charrua-Ancoa2	1	1	3	1	6	196,5
220Charrua-Hualpen	2		2	1	5	83,67
220Pangue-Charrua	1	1			2	75,81
220Canutillar-Puerto Montt	1			1	2	59,6
220Cautin-Valdivia	1	2		2	5	149,8
220Charrua-Temuco	2			6	8	195,7
220Valdivia-Puerto Montt	6	3	3	2	14	216,8

Las tasas de falla para cada tipo de línea (220 kV o 500 kV) fueron calculadas como el promedio anual de las tasa de falla de cada tipo de línea, cada tasa de falla fue calculada como el cociente entre el número de fallas del tramo y el largo y el número de años, siguiendo la siguiente fórmula.

$$Tasa\ falla = \frac{1}{L} \cdot \sum_i^L \frac{Falla\ Totales_i}{largo_i[km] \cdot 4[años]}$$

Dónde:

L : es el número de líneas (de las que se tiene registro) ya sea de 500 o 220 kilovolts.

$Fallas\ Totales_i$: son las fallas entre los años 2008-2011 del tramo i .

$largo_i$: es la longitud del tramo i .

Con la metodología anterior se encuentran las tasas de falla de las líneas de 500 y 220 kV, los cuales son $0,0077537 \left[\frac{veces}{año} \right]$ y $0,009268478 \left[\frac{veces}{año} \right]$ respectivamente.

Para lograr un mejor resultado y dando cuenta que la tasa de falla de las líneas de 220 kV es de al menos un orden de magnitud mayor que la tasa de falla de las líneas de 500 kV los valores anteriores se aproximan a los indicados en la siguiente tabla.

Tabla 11 Tasas de falla por tipo de línea

Tipo de línea	Veces por año $\left[\frac{veces}{año \cdot km} \right]$
Línea 500 kV	0,008
Línea 220 kV	0,01

5.2 Variaciones del modelo empleado

Como se revisó en capítulos anteriores el número de huecos de tensión depende de la matriz de impedancia del sistema la cual es única y no cambia con los niveles de generación/demanda, sin embargo la matriz de admitancia si cambia al conectarse o desconectarse máquinas al sistema, pues estas aportan a la recuperación de tensión de las barras. Se realizó el cálculo para dos casos extremos de demanda del caso Base 2010 del ETT2010. Estos son caso el caso de demanda alta (*Dda. Alta*) y el caso de demanda baja (*Dda. Baja*) ya que son los escenarios más extremos en términos de generación/demanda.

Para lograr un mejor análisis en la estimación estocástica se establecen escenarios alternativos para la estimación de huecos de tensión por barra.

5.2.1 Escenario Base

Se usarán las tasas de falla obtenidas para cada tipo de línea y obtenidas de datos reales de fallas, estas son las que se muestran en la Tabla 11. Se empleará una distribución de fallas que se presenta típicamente en las líneas del sistema chileno que es:

Tabla 12 Proporción de tipos de falla

Tipo de cortocircuito	Frecuencia de Falla [%]
Cortocircuito trifásico	5
Cortocircuito monofásico	85
Cortocircuito bifásico	5
Cortocircuito bifásico a tierra	5

5.2.2 Escenario cambio de proporciones de falla

En este escenario se conservan las tasas de falla pero se varía las proporciones en los tipos de falla, sigue siendo mayormente monofásica pero se aumenta drásticamente el número de fallas severas, ponderando más las fallas trifásicas, las fallas bifásicas al ser poco usuales se mantiene su proporción. La siguiente tabla muestra la nueva configuración.

Tabla 13 Proporción alternativa de tipos de falla

Tipo de cortocircuito	Frecuencia de Falla [%]
Cortocircuito trifásico	30
Cortocircuito monofásico	60
Cortocircuito bifásico	5
Cortocircuito bifásico a tierra	5

5.2.3 Escenario variación de las tasas de falla

En este escenario se conservan las proporciones de falla del caso base (Tabla 12) y se varían las tasas de falla de la Tabla 11 de manera de obtener dos escenarios alternativos a partir de este. El primero de aumentar cada tasa de falla en un +15% y el segundo a partir de la reducción en -15%. Los valores de estas tasas se muestran en la siguiente tabla.

Tabla 14 Tasas de falla alternativas

	T. falla línea 220 [veces/año*km]	T. falla línea 500 [veces/año*km]
Escenario Base	0,01	0,008
Escenario +15%	0,0115	0,0092
Escenario -15%	0,0085	0,0068

5.3 Criterios de caracterización

Para un mejor estudio de los huecos de tensión, se establecerán clasificaciones de estos como también para las distintas barras, en cuanto la zona del SIC en donde se producen.

La primera caracterización de los tipos de huecos de tensión es según su magnitud, es decir la profundidad de la caída del voltaje (voltaje remanente), de esta forma se clasifican en tres tipos; Tipo profundos, medios y superficiales. Esta selección de tipos de huecos de tensión se establece desde los más profundos que son los que ocasionan los más severos daños, pasando por los de mediana intensidad hasta los huecos de tensión más superficiales que son relativamente inofensivos pero muy frecuentes. Caídas de tensión mayores que 0,9 [p.u.] no se consideran huecos de tensión.

Tabla 15 Clasificación en Tipos de Tensión

Huecos de tensión	Voltaje remanente
Profundos	Menores que 0,4 [p.u.]
Medios	Entre 0,4 [p.u.] y 0,7[p.u.]
Superficiales	Entre 0,7 [p.u.] y 0,9[p.u.]

Así mismo como se han clasificado los diferentes tipos de huecos de tensión según su magnitud, se definirán sectores o zonas dentro del SIC para poder dar cuenta de cómo afectan los huecos de tensión según la zona geográfica., cada zona representa una barra promedio dentro de la zona geográfica. La definición de dichas zonas se muestra en la siguiente tabla:

Tabla 16 Clasificación en zonas de las barras troncales del SIC

SS/EE	Zona	SS/EE	Zona
Diego de Almagro	norte	Alto Jahuel220	centro
Carrera Pinto	norte	500 Alto Jahuel	centro
Cardones	norte	Maipo	centro
Maitencillo	norte	La Candelaria	centro
Punta Colorada	norte	Itahue	centro
Pan de Azucar	norte	Ancoa220	centro
Las Palmas	norte	500 Ancoa	centro
Los Vilos	norte	Hualpen	centro
Nogales	centro	Charrua220	centro
Quillota	centro	500 Charrua	centro
Polpaico220	centro	Temuco	sur
500 Polpaico	centro	Nueva Temuco	sur
Lampa	centro	Barro Blanco	sur
Cerro Navia	centro	Valdivia	sur
Chena	centro	Puerto Montt	sur
El Rodeo	centro		

El criterio usado para la elección de dichas zonas, se basa en la similitud que existe en estas regiones en cuanto a generación y consumo, además ésta categorización fue motivada por los mismos resultados ya que se muestra una tendencia similar en las barra que conforman cada zona (Figura 23). En el norte, desde Diego de Almagro hasta Los Vilos la generación es en su mayoría térmica y cerca de los consumos que en general son pocos. La zona centro se caracteriza por la alta cantidad de consumos como lo son la región desde Quillota a Alto Jahuel, Ancoa y Charrua, la generación en esta zona es diversa y de gran capacidad. La zona sur que va desde Temuco hasta Puerto Montt tiene menores consumos a diferencia de la zona centro, su generación como sus consumos son menores.

5.4 Áreas de vulnerabilidad de barras sensibles

Las áreas de vulnerabilidad, concepto revisado en capítulos anteriores, corresponden a clasificaciones del sistema en términos de los huecos de tensión. Cada barra tiene su área de vulnerabilidad para cada nivel de hueco de tensión. Se tomó una barra sensible en cuanto a importancia de cada zona del SIC; norte, centro y sur, las cuales son Cardones, Cerro Navia y Valdivia, respectivamente.

Tabla 17 Barras elegidas para áreas de vulnerabilidad

S/E	Razón
Cardones	Eventual punto de Conexión para la interconexión SIC-SING, mediante un enlace HVDC.
Cerro Navia	Nodo sensible por cercanía a la gran demanda en la zona centro del SIC. Posee un STATCOM. Eventual punto de conexión del enlace HVDC de HidroAysen
Valdivia	Eventual punto de conexión del proyecto Energía Austral

5.5 Metodología

Una vez recogidos los datos de tasas de falla de las instalaciones, se procede a incorporarlos al modelo DigSilent y posteriormente realizar la simulación con la ayuda del software para cada uno de los escenarios alternativos descritos en 5.2. Para cada escenario se tiene dos casos extremos de demanda del sistema, demanda alta y demanda baja, casos *Dda Alta* y *Dda Baja* del modelo DigSilent.

Los resultados de huecos de tensión de cada barra, resultados que son de frecuencias absolutas, se tabulan y se incorporan a una sola frecuencia de ocurrencia de los huecos de tensión en cada barra. Al tener 2 casos distintos de demanda, se ponderan los resultados de cada uno al 50% para obtener un solo grupo de resultados que reflejen el sistema de manera general. De esta manera se tiene una estimación más probabilística del fenómeno de los huecos de tensión incorporando casos extremos de demanda para el SIC, y variando algunos parámetros como la tasa de falla y la proporción de ocurrencia de los tipos de falla.

Para cada escenario se muestra en cada zona el histograma de veces promedio al año por tipo de hueco además de la magnitud promedio de los eventos la cual se calculó como:

$$Magnitud\ promedio = \frac{\sum_i^{Tipos\ de\ huecos} freq.\ de\ huecos_i \cdot magnitud\ de\ huecos_i}{\sum_i^{Tipos\ de\ huecos} freq.\ de\ huecos}$$

Se compara cada escenario definido con el caso base mediante la variación de los promedios de ocurrencia del caso base con respecto al alternativo. Es decir la diferencia se considera:

$$Variacion = \# Huecos Escenario\ alternativo - \# Huecos Escenario\ base$$

Lo anterior es importante para no inducir errores en la apreciación del incremento o decremento de los huecos de tensión según el escenario.

Finalmente se encuentra el área de vulnerabilidad de tres barras sensibles del sistema, una para zona (ver 5.4). Se calcularon fallas en las líneas próximas a las barras mencionadas, los puntos de fallas fueron 25%, 50%, 75% y 100% de la línea desde lo más próximo hasta lo más lejano a las barras de estudio. Se simularon fallas trifásicas pues se considera como el peor caso, se simula un despeje de la falla a 0,1 *seg.* después de ocurrida la falla. Con lo anterior como referencia y luego mediante prueba y error se encuentran los límites de las áreas de vulnerabilidad (donde se alcanzan los voltajes remanentes límites) y se conforman las áreas de vulnerabilidad de las tres barras escogidas.

En síntesis se hará lo siguiente:

1. Recopilación de datos:
 - a. Modelos del ETT2010 (Caso Dda. Alta y Dda. Baja)
 - b. Eventos por año en las líneas
2. Incorporar datos de tasas de falla al modelo DigSilent
 - a. Definir como *Selección de Carga* a las barras del troncal del SIC
3. Definición de escenarios
 - a. Escenario base
 - b. Escenario distintas proporciones de falla
 - c. Escenario variación de Tasas de falla $\pm 15\%$
4. Desarrollo del algoritmo
 - a. Cada escenario con cada uno de los casos
5. Tabular resultados construir histograma para cada barra y para cada escenario, ponderando al 50% cada caso de demanda.
6. Analizar datos de frecuencia de ocurrencia
 - a. Definir zonas del sistema
 - b. Definir tipos de huecos de tensión
7. Construir y analizar áreas de vulnerabilidad de 3 barras sensibles: Cardones, Cerro Navia y Valdivia.

6 Resultados y Análisis

6.1 Frecuencias acumuladas de ocurrencia de huecos de tensión

El método y los pasos a seguir empleados para la realización de los cálculos en el software Dig Silent se detallan en el Anexo 1A Empleo del módulo Tabla de Caídas de Tensión en Dig Silent

Los resultados desarrollados con el software se anexan en el Anexo 1C, donde se presentan las tablas de frecuencia acumulada de los huecos de tensión de las barras del SIC. En dicho anexo se encuentran las tablas de frecuencia de huecos de tensión por año para cada caso de demanda (*Dda Alta* y *Dda Baja*) y cada escenario desarrollados. Los datos se encuentran ordenados según nivel de tensión remanente (magnitud del hueco de tensión) y las barras ordenadas de norte a sur. A continuación se muestran las frecuencias acumuladas obtenidas de la ponderación de los casos de demanda para el escenario base.

Tabla 18 Frecuencia acumulada de huecos de tensión en el SIC escenario base

SS/EE	<0,2 [p.u.]	<0,4 [p.u.]	<0,6 [p.u.]	<0,7 [p.u.]	<0,8 [p.u.]	<0,85 [p.u.]	<0,9 [p.u.]
Diego de Almagro	0,73	1,18	2,44	6,11	8,38	9,16	11,04
Carrera Pinto	0,68	1,18	2,07	6,11	8,38	9,16	11,04
Cardones	0,5	0,94	1,85	4,97	7,23	8,7	10,82
Maitencillo	0,27	0,42	1,28	3,19	5,05	7,53	9,67
Punta Colorada	0,14	0,8	0,99	2,31	6,59	8,1	10,41
Pan de Azucar	0,08	0,37	1,02	1,74	5,36	7,45	9,55
Las Palma	0,02	0,14	0,69	1,36	2,59	3,91	7,18
Los Vilos	0,06	0,36	0,85	1,34	2,67	4,29	6,87
Nogales	0,07	0,35	0,89	1,31	2,85	4,31	6,16
Quillota	0,06	0,15	0,69	1,36	2,2	2,97	4,92
Polpaico220	0,17	0,7	1,38	1,95	3,66	5,65	7,87
500 Polpaico	0,04	0,22	1,03	1,64	2,89	4,23	6,54
Lampa	0	0,22	1,01	1,63	3,35	4,46	6,33
Cerro Navia	0,03	0,3	0,84	1,81	3,18	4,67	6,13
Chena	0,07	0,38	0,97	1,98	3,56	4,7	6,23
El Rodeo	0,11	0,4	1,15	1,94	3,76	4,67	6,78
Alto Jahuel220	0,12	0,58	1,29	1,9	3,54	5,68	8,05

500 Alto Jahuel	0,11	0,39	1,21	1,89	3,56	4,81	6,88
Maipo	0,11	0,38	1,2	1,88	3,55	4,8	6,87
La Candelaria	0,05	0,3	0,81	1,6	3,33	4,39	5,67
Itahue	0,18	0,58	1,23	1,73	3,16	3,91	5,93
Ancoa	0,28	0,81	1,51	2,33	5,01	6,14	7,42
500 Ancoa	0,22	0,72	1,32	1,77	2,96	4,49	7,1
Hualpen	0,1	0,41	1,36	2,27	3,86	5,12	8,76
500 Charrua	0,4	0,74	1,2	1,94	4,92	6,34	7,49
Charrua	0,12	0,32	1,14	2,02	3,24	4,62	8,24
Temuco	0,08	0,425	1,195	1,885	3,53	4,81	7,03
Nueva Temuco	0,075	0,33	1,09	1,91	3,195	4,17	6,41
Barro Blanco	0,085	0,38	0,91	1,295	2,925	4,39	6,345
Valdivia	0,04	0,16	0,73	1,275	2,595	3,96	6,22
Puerto Montt	0,085	0,2	0,71	1,535	2,615	3,46	5,1

En la Tabla 18, cada fila es una barra diferente y en las columnas se muestran las veces al año que ocurre cada evento por cada magnitud. Por ejemplo, la cantidad de huecos de tensión de magnitudes menores o iguales a 0,6 [p.u.] en la barra Punta Colorada se identifica fácilmente que es 0,99 veces al año.

A partir de la Tabla 18 es posible construir un gráfico que muestre un histograma de frecuencia acumulada de la ocurrencia de los huecos de tensión en las barras troncales del SIC. Éste es mostrado en la Figura 23 y muestra los mismos datos que la tabla anterior. En el eje “x” se encuentran las barras del sistema ordenadas de norte a sur, en el eje “y” se muestran las cantidades de eventos al año de manera creciente, y por último en el eje “z” están los distintos niveles de magnitud de los huecos de tensión. En este gráfico se observa que las barras más al norte son las más afectadas por huecos de tensión de casi todas las magnitudes, además se aprecia que las barra “adoptan” cierto patrón desde norte a sur, esto justifica la elección de las zonas anteriormente descritas.

La tabla y el gráfico son útiles desde el punto de vista de conexión de cargas sensibles, ya que es importante el número de veces que una barra sufre huecos de tensión menores que cierto voltaje remanente dado, pues estos eventos podrían provocar su desconexión o malfuncionamiento.

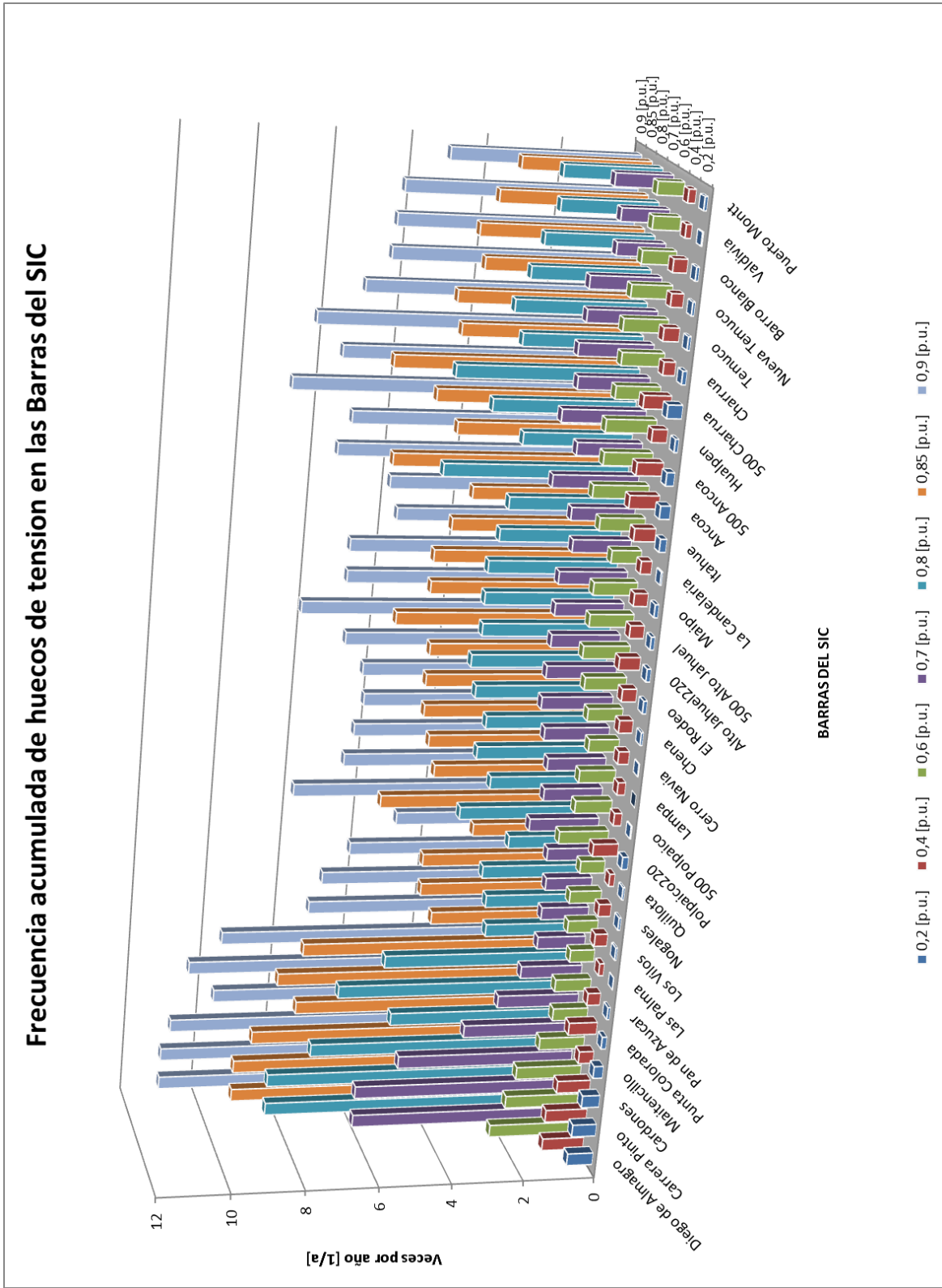


Figura 23 Gráfico de frecuencias acumuladas de huecos de tensión

6.2 Zona del sistema y tipo de hueco de tensión

Las Barras ordenadas según la locación; Norte, Centro o Sur, y caracterizado además cada hueco de tensión según el tipo dan como resultado las siguientes tablas que contienen la frecuencia de ocurrencia por año de cada barra.

Tabla 19 Frecuencia Huecos de tensión Norte

	PROFUNDOS		MEDIOS		SUPERFICIALES		
SS/EE	0,2 [p.u.]	0,4 [p.u.]	0,6 [p.u.]	0,7 [p.u.]	0,8 [p.u.]	0,85 [p.u.]	0,9 [p.u.]
Diego de Almagro	0,73	0,45	1,26	3,67	2,27	0,78	1,88
Carrera Pinto	0,68	0,5	0,89	4,04	2,27	0,78	1,88
Cardones	0,5	0,44	0,91	3,12	2,26	1,47	2,12
Maitencillo	0,27	0,15	0,86	1,91	1,86	2,48	2,14
Punta Colorada	0,14	0,66	0,19	1,32	4,28	1,51	2,31
Pan de Azucar	0,08	0,29	0,65	0,72	3,62	2,09	2,1
Las Palma	0,02	0,12	0,55	0,67	1,23	1,32	3,27
Los Vilos	0,06	0,3	0,49	0,49	1,33	1,62	2,58

Tabla 20 Frecuencia Huecos de Tensión Centro

	PROFUNDOS		MEDIOS		SUPERFICIALES		
SS/EE	0,2 [p.u.]	0,4 [p.u.]	0,6 [p.u.]	0,7 [p.u.]	0,8 [p.u.]	0,85 [p.u.]	0,9 [p.u.]
Nogales	0,07	0,28	0,54	0,42	1,54	1,46	1,85
Quillota	0,06	0,09	0,54	0,67	0,84	0,77	1,95
Polpaico220	0,17	0,53	0,68	0,57	1,71	1,99	2,22
500 Polpaico	0,04	0,18	0,81	0,61	1,25	1,34	2,31
Lampa	0	0,22	0,79	0,62	1,72	1,11	1,87
Cerro Navia	0,03	0,27	0,54	0,97	1,37	1,49	1,46
Chena	0,07	0,31	0,59	1,01	1,58	1,14	1,53
El Rodeo	0,11	0,29	0,75	0,79	1,82	0,91	2,11
Alto Jahuel220	0,12	0,46	0,71	0,61	1,64	2,14	2,37
500 Alto Jahuel	0,11	0,28	0,82	0,68	1,67	1,25	2,07
Maipo	0,11	0,27	0,82	0,68	1,67	1,25	2,07
La Candelaria	0,05	0,25	0,51	0,79	1,73	1,06	1,28
Itahue	0,18	0,4	0,65	0,5	1,43	0,75	2,02
Ancoa	0,28	0,53	0,7	0,82	2,68	1,13	1,28
500 Ancoa	0,22	0,5	0,6	0,45	1,19	1,53	2,61
Hualpen	0,1	0,31	0,95	0,91	1,59	1,26	3,64
500 Charrua	0,4	0,34	0,46	0,74	2,98	1,42	1,15
Charrua	0,12	0,2	0,82	0,88	1,22	1,38	3,62

Tabla 21 Frecuencia Huecos de Tensión Sur

SS/EE	PROFUNDOS		MEDIOS		SUPERFICIALES		
	0,2 [p.u.]	0,4 [p.u.]	0,6 [p.u.]	0,7 [p.u.]	0,8 [p.u.]	0,85 [p.u.]	0,9 [p.u.]
Temuco	0,08	0,345	0,77	0,69	1,645	1,28	2,22
Nueva Temuco	0,075	0,255	0,76	0,82	1,285	0,975	2,24
Barro Blanco	0,085	0,295	0,53	0,385	1,63	1,465	1,955
Valdivia	0,04	0,12	0,57	0,545	1,32	1,365	2,26
Puerto Montt	0,085	0,115	0,51	0,825	1,08	0,845	1,64

A su vez, al graficar las Tabla 19, Tabla 20 y Tabla 21 se obtienen histogramas de ocurrencia de huecos de tensión para cada barra y para cada zona definida. En estos, cada barra del gráfico muestra la cantidad esperada de huecos de tensión para cada barra (que es un color distinto), además en negro se muestra la frecuencia promedio de la zona para cada nivel de magnitud de hueco de tensión, este promedio representa la cantidad de huecos de tensión de que sufre una barra promedio de cada zona.

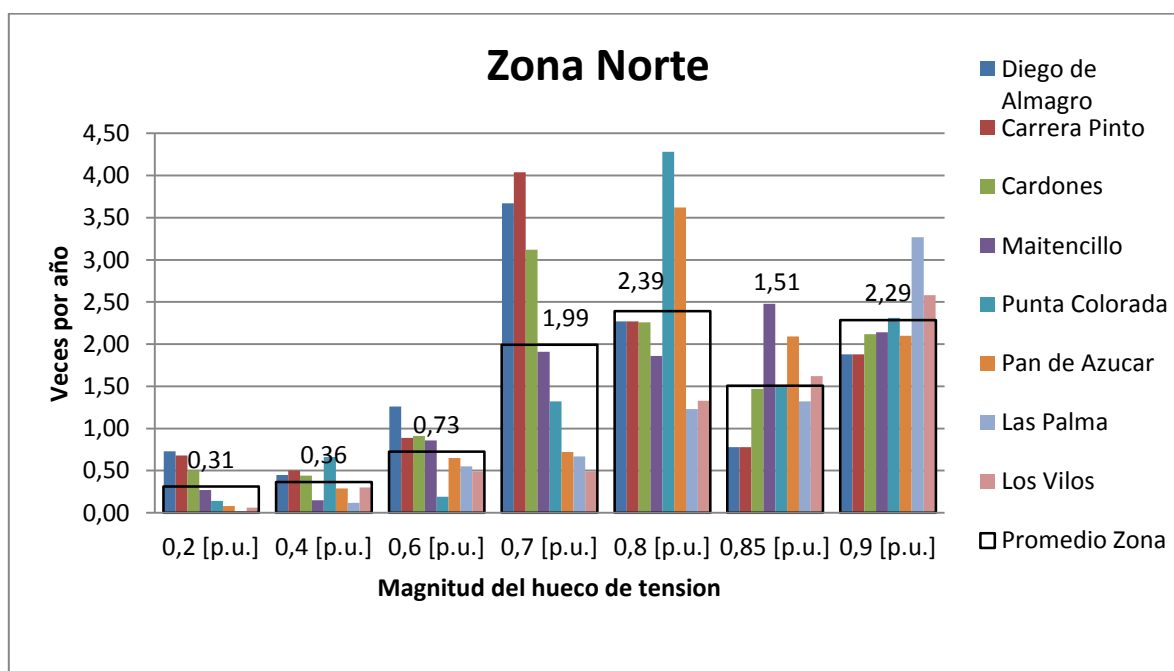


Figura 24 Histograma huecos de tensión zona norte

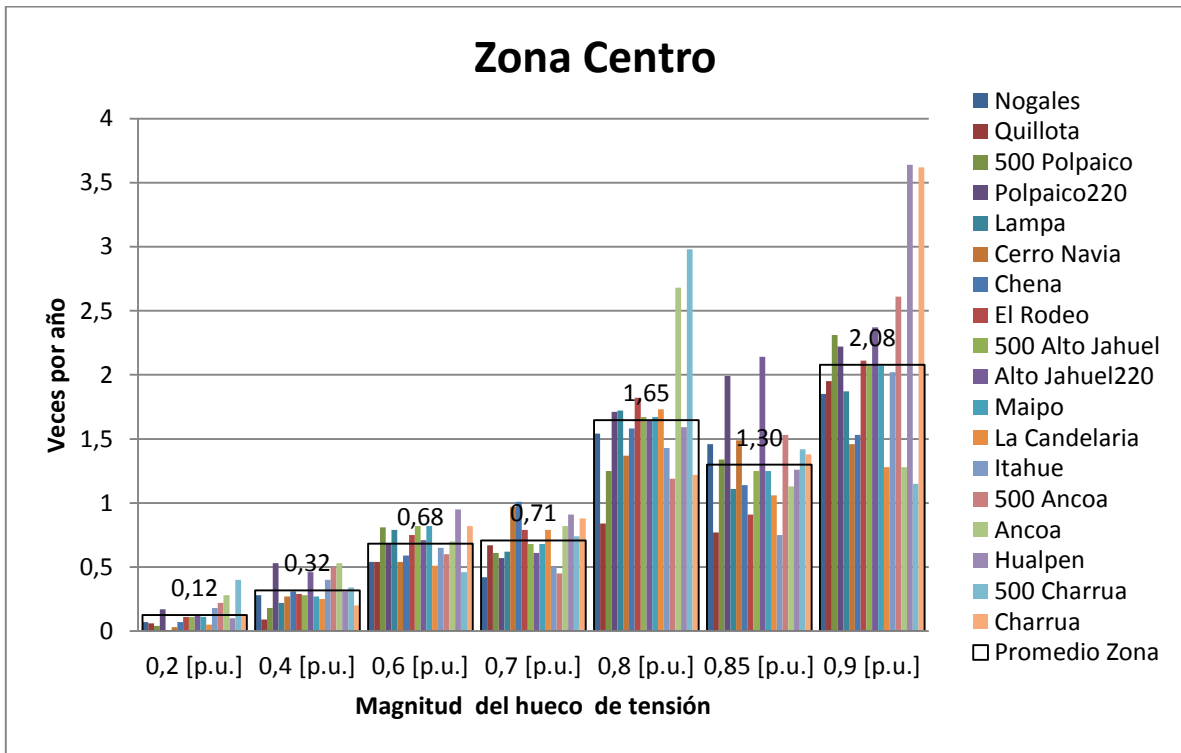


Figura 25 Histograma huecos de tensión zona centro

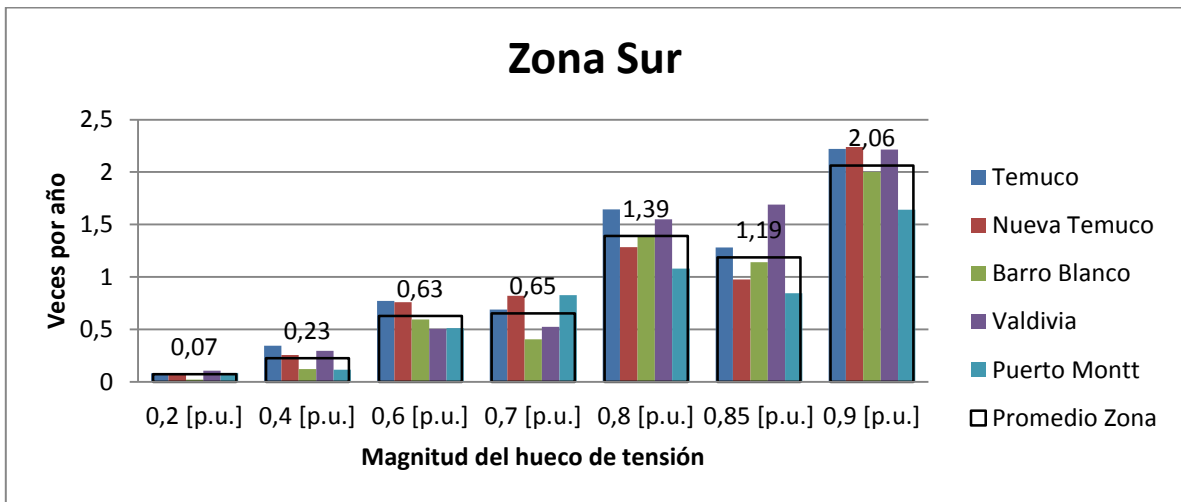


Figura 26 Histograma huecos de tensión zona sur

Los gráficos anteriores (Figura 24, Figura 25 y Figura 26) es posible observar el desempeño de cada barra con respecto al promedio de la zona a la que pertenece. Puede apreciarse, por ejemplo, que en la zona norte las barras más afectadas por huecos de tensión de magnitudes

menores a 0,7 [p. u.] son las de Diego de Almagro, Carrera Pinto y Cardones (las tres primeras del sistema troncal), siendo sobrepasando el promedio. Es importante mencionar que estas barras tienen eventos de alta profundidad (voltajes remanente menores o iguales a 0,2 [p. u]) sobre 0,3 veces en un año o más de una vez cada 3 años.

En el centro los promedios de ocurrencia bajan con respecto a la zona norte y son menos dispersos, pues no se presentan tantos casos extremos. Las barras que tienen altos índices de huecos de tensión son las que están conectadas a líneas largas como Ancoa y Charrua

La zona sur es la que presenta mayor homogeneidad en sus distintas barras y menores promedios en todos los niveles de voltaje remanente. Los huecos de tensión severos ocurren muy rara vez, 0,07 veces al año eventos menores que 0,2[p.u.].

Para poder comparar cada zona en función de cada tipo de hueco de tensión es que se obtuvo la cantidad promedio de huecos de tensión de cada zona. Esta fue calculada encontrando la cantidad de huecos de tensión de cada tipo por cada barra y luego promediando los de cada zona. Estos están contenidos en la Tabla 22 Cantidad promedio de huecos de tensión por zona y tipo Tabla 22. Se está conciente que la dispersión de los datos es alta (Tabla 23) pero lo que se busca es entregar un índice para las zonas del sistema. Dentro de cada zona existe alta dispersión, como el caso de la zona norte donde solamente las tres primeras barras tienen altos niveles de ocurrencia de huecos de tensión.

Tabla 22 Cantidad promedio de huecos de tensión por zona y tipo

	Profundos [1/a]	Medios [1/a]	Superficiales [1/a]
Norte	0,674	2,718	6,181
Centro	0,442	1,389	5,023
Sur	0,299	1,281	4,641

Tabla 23 Dispersión de los promedios de huecos de tensión por zona y tipo

	Profundos [1/a]	Medios [1/a]	Superficiales [1/a]
Norte	0,40	1,69	1,21
Centro	0,20	0,23	0,81
Sur	0,12	0,26	0,73

De la Tabla 22 es posible derivar el gráfico de la Figura 27 que sirve de resumen del comportamiento del sistema en cada zona para cada nivel de huecos de tensión.

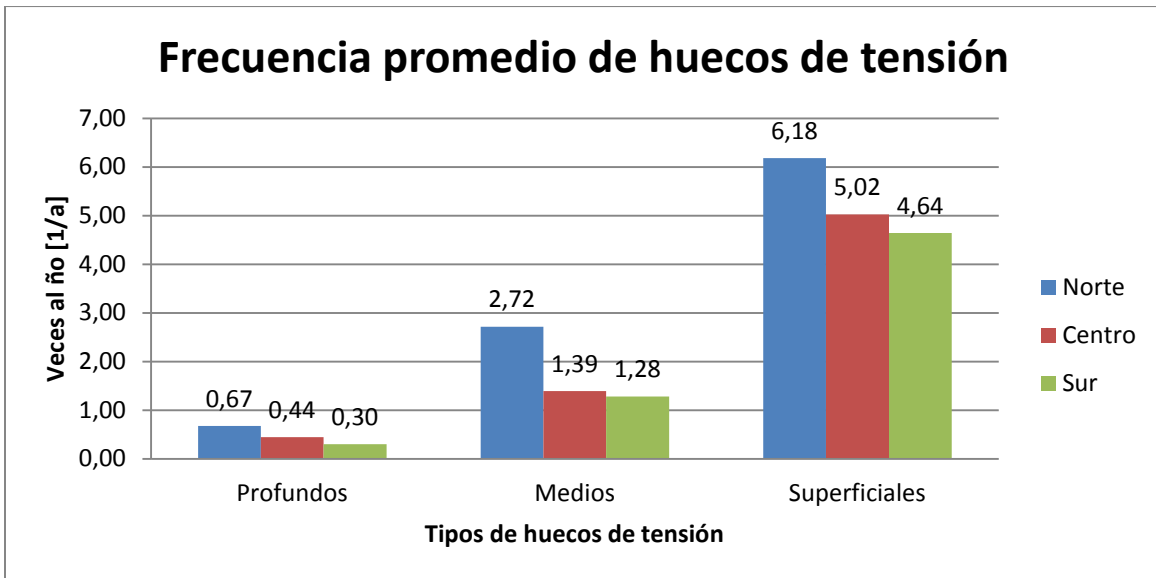


Figura 27 Frecuencia promedio por zona

Del gráfico anterior puede observarse que las caídas profundas de tensión son relativamente frecuentes en el sistema ocurriendo aproximadamente menos de una vez cada 1, 2 y 3 años en las zonas norte sur y centro respectivamente. Los huecos de tensión de magnitud media, tienen casi la misma frecuencia de ocurrencia en las zonas centro y sur, cerca de 1,3 veces en un año. La zona norte, en cambio, tiene una frecuencia de ocurrencia mucho mayor de casi el doble, 2,72 veces al año. Los huecos de tensión del tipo superficial, son los más frecuentes en todo el sistema y ocurren casi por igual en las tres zonas, esto entre 4,6 y 6,2 veces en el año.

La zona norte es la más afectada pues posee menos generación y líneas más largas provocando que exista una mayor probabilidad de falla. Las otras dos zonas tienen un comportamiento parecido en materia de huecos de tensión, siendo la zona central levemente más afectada pues tiene la generación concentrada en las barras de Quillota/Polpaico, Ancoa y Charrua, en cambio la zona sur tiene una distribución un poco más dispersa de la generación, habiendo casi un generador conectado por cada barra del conjunto definido, lo que mitiga el efecto de los huecos.

Además de las frecuencias promedio de los huecos de tensión en cada zona, se calculó la magnitud promedio de huecos en cada zona. Esto significa que de los eventos ocurridos en el año, el promedio del voltaje remanente es el que se muestra en la siguiente tabla para cada zona. Además se grafica para visualizar las diferencias entre cada zona.

Tabla 24 Magnitudes promedio

	Profundos [p.u]	Medios [p.u]	Superficiales [p.u]
Norte	0,32	0,67	0,85
Centro	0,35	0,65	0,85
Sur	0,35	0,65	0,86

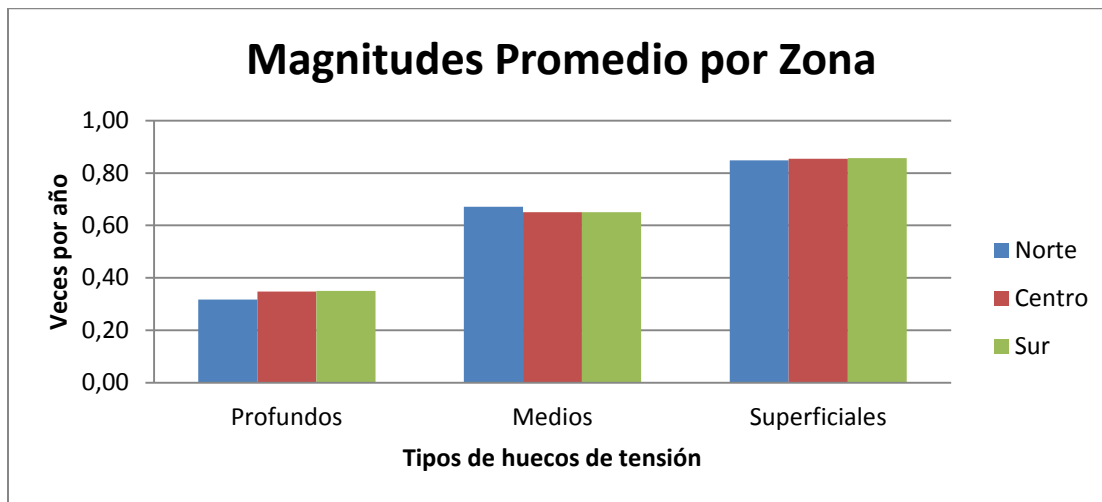


Figura 28 Magnitudes promedio por zona

Como se aprecia en la tabla y gráfico anteriores las tres zonas del sistema poseen promedios similares en cuanto a la magnitud de los tipos de huecos de tensión. Los eventos tienen en las zonas, en promedio voltajes remanentes del orden de 0,35[p.u], 0,65 [p.u] y 0,85[p.u] para los huecos de tipo profundo, medio y superficiales respectivamente.

6.3 Variaciones

6.3.1 Variación de proporción de ocurrencia de fallas

Se muestran los cuadros resúmenes y sus respectivos gráficos de magnitud y frecuencia por tipo de huecos de tensión para este escenario alternativo.

Tabla 25 Frecuencias promedio escenario alternativo de proporciones de falla

	Profundos [1/a]	Medios [1/a]	Superficiales [1/a]
Norte	1,82	3,30	5,76
Centro	0,66	2,04	5,40
Sur	0,58	2,22	4,82

Tabla 26 Magnitudes promedio escenario alternativo de proporciones de falla

	Profundos [p.u]	Medios [p.u]	Superficiales [p.u]
Norte	0,321	0,656	0,849
Centro	0,347	0,630	0,852
Sur	0,303	0,654	0,854

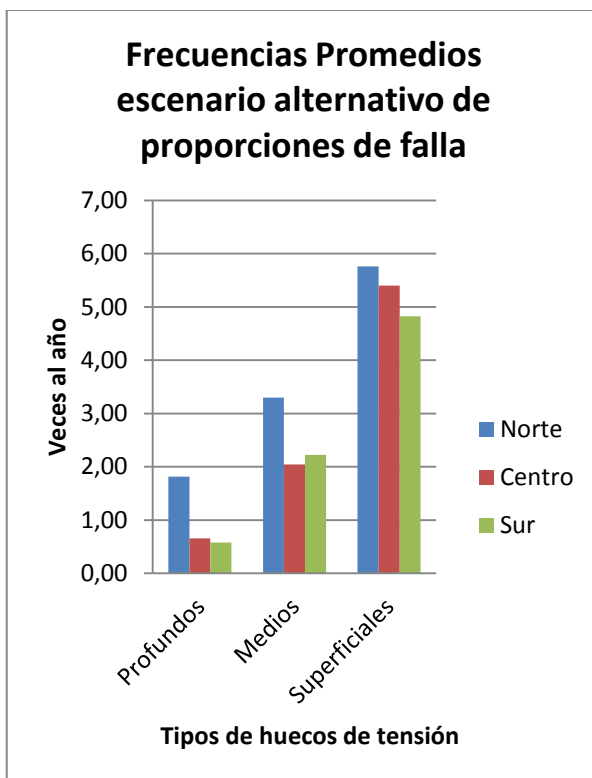


Figura 29 Frecuencias Promedios escenario alternativo de proporciones de falla

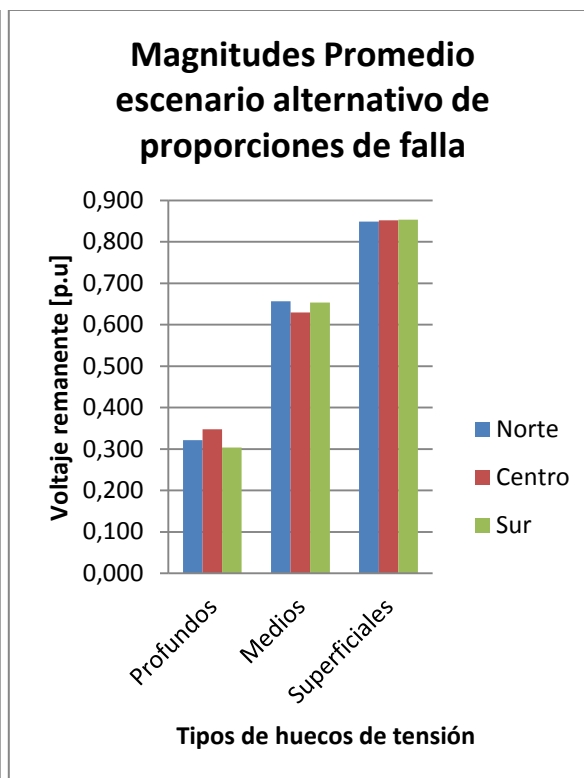


Figura 30 Magnitudes Promedio por zona escenario alternativo de proporciones de falla

Al realizar una variación en las proporciones de frecuencia de los distintos tipos de falla se mantuvieron casi los mismos promedios en las magnitudes de los distintos eventos. Sin embargo se obtuvieron valores diferentes para los histogramas de frecuencia de los huecos de tensión, las variaciones se muestran en el siguiente gráfico, según cada zona y magnitud. Esta variación se calculó como la diferencia de los promedios del escenario alternativo y el escenario base.

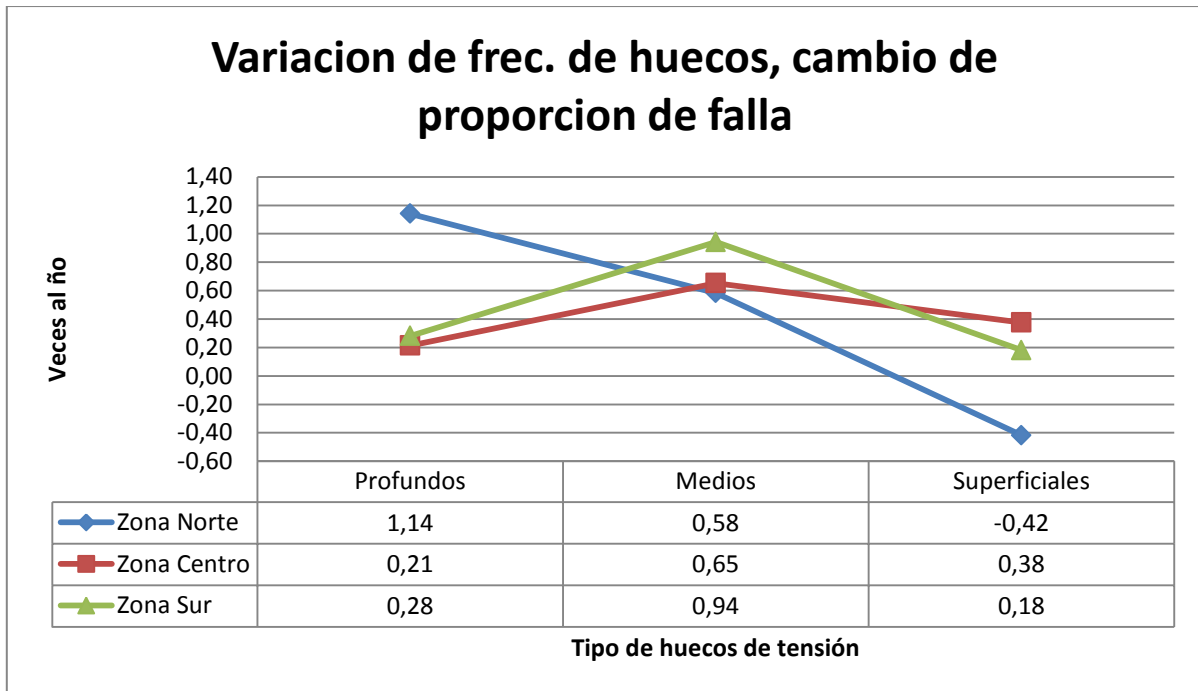


Figura 31 Variación de la frecuencia de ocurrencia de huecos de tensión cambiando las proporciones de fallas

De la Figura 31 se observa que en las tres zonas la variación de la ocurrencia de los huecos de tensión es positiva, esto significa que es mayor el número de huecos en el caso alternativo, salvo para el caso de la zona norte y los huecos de tipo superficial donde se reduce el número de huecos de tensión en 0,42 veces por año con respecto al caso base. Esto se explica por el algoritmo del programa (ver sección 5.1.1), el cual se detiene cuando el voltaje remanente en la(s) barras(s) de interés es mayor que el límite de área expuesto definido. En este escenario los voltajes remanentes son menores con fallas más lejanas que el escenario base pues existen más fallas graves (trifásicas), de esta forma el programa calcula más eventos.

Adicionalmente se desprende de la figura que se intensifica la tendencia de ocurrencia de los huecos de tensión antes encontrada en las distintas zonas, ya que los huecos más profundos ocurren en mayor medida para el nuevo escenario en la zona norte. También se observa que las variaciones se comportan de manera similar para las zonas centro y sur, es decir, al variar las proporciones de falla, la cantidad de huecos de tensión en estas zonas varía casi de la misma manera.

Puede identificarse que pese a variar las proporciones de falla de manera drástica, dándole un 30% de ocurrencia a fallas trifásicas, las variaciones no son tan significativas, salvo el caso de la zona norte donde si aumenta la ocurrencia en cerca de un evento al año del tipo severo

6.3.2 Variación de tasas de falla

Como se mencionó anteriormente, se varió la tasa de falla de las líneas en un $\pm 15\%$. De este modo se obtuvieron diferentes valores para las los histogramas de frecuencia de los huecos de tensión. Al igual que en todos los escenarios se muestran los promedios de frecuencias y magnitudes para cada zona y cada tipo del huecos de tensión.

Tabla 27 Frecuencias promedio escenario t.f +15%

	Profundos [1/a]	Medios [1/a]	Superficiales [1/a]
Norte	0,84	3,37	7,66
Centro	0,53	1,68	6,13
Sur	0,36	1,56	5,69

Tabla 28 Magnitudes promedio escenario t.f +15%

	Profundos [p.u]	Medios [p.u]	Superficiales [p.u.]
Norte	0,32	0,67	0,85
Centro	0,35	0,65	0,85
Sur	0,31	0,66	0,86

Tabla 29 Frecuencias promedio escenario t.f -15%

	Profundos [1/a]	Medios [1/a]	Superficiales [1/a]
Norte	0,62	2,49	5,66
Centro	0,40	1,26	4,62
Sur	0,28	1,19	4,37

Tabla 30 Magnitudes promedio escenario t.f -15%

	Profundos [p.u]	Medios [p.u]	Superficiales [p.u.]
Norte	0,36	0,65	0,86
Centro	0,32	0,65	0,87
Sur	0,35	0,65	0,86

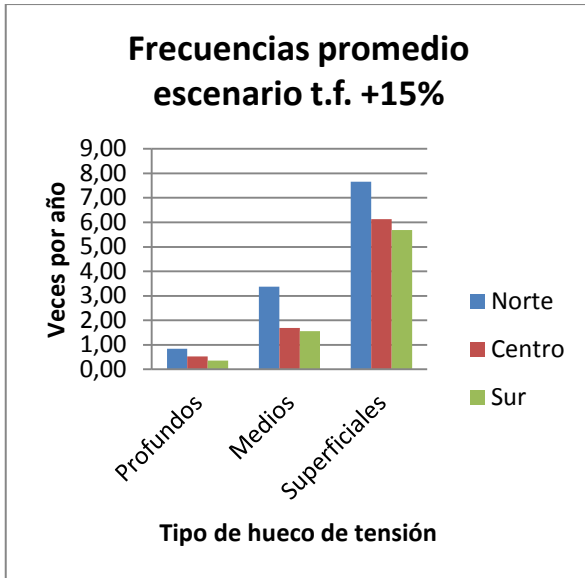


Figura 32 Frecuencias Promedio escenario alternativo tasas de falla +15%

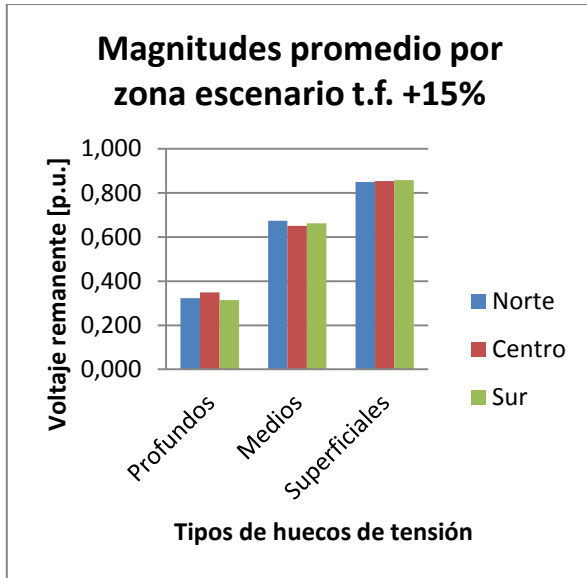


Figura 33 Magnitudes Promedio escenario alternativo tasas de falla +15%

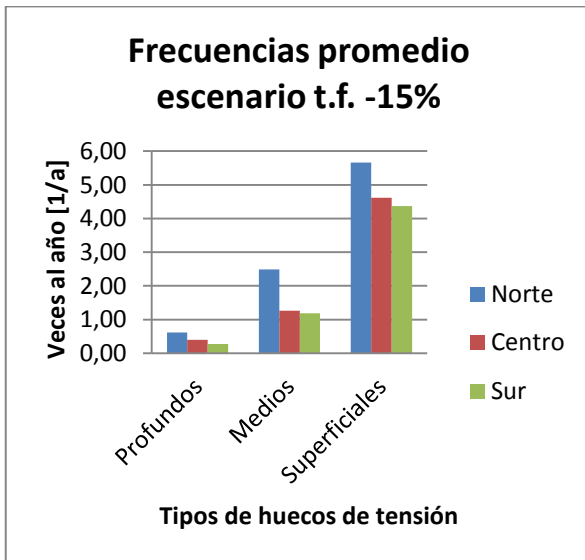


Figura 34 Frecuencias Promedio escenario alternativo tasas de falla -15%

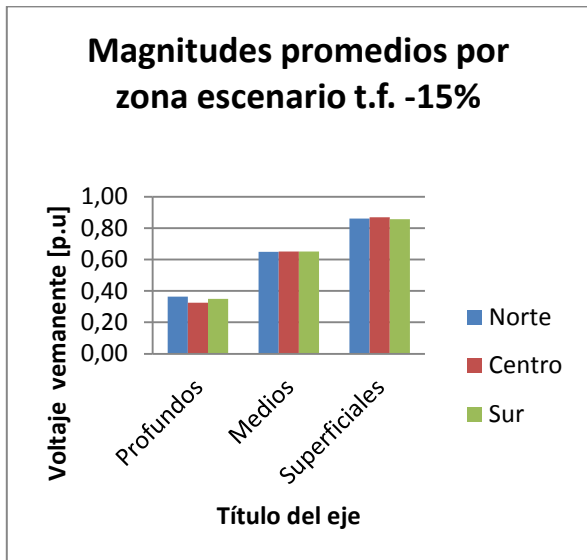


Figura 35 Magnitudes Promedio escenario alternativo tasas de falla -15%

A partir de los resultados obtenidos, se tiene que las magnitudes promedio no cambian con respecto al escenario base, sin embargo las frecuencias si varían. Por esta razón se grafica cada variación de estos casos con respecto al escenario base. A continuación se muestran las variaciones que tuvieron las frecuencias absolutas de huecos de tensión en cada zona al variar las tasas de falla en un +15% (Figura 36) y en un -15% (Figura 37).

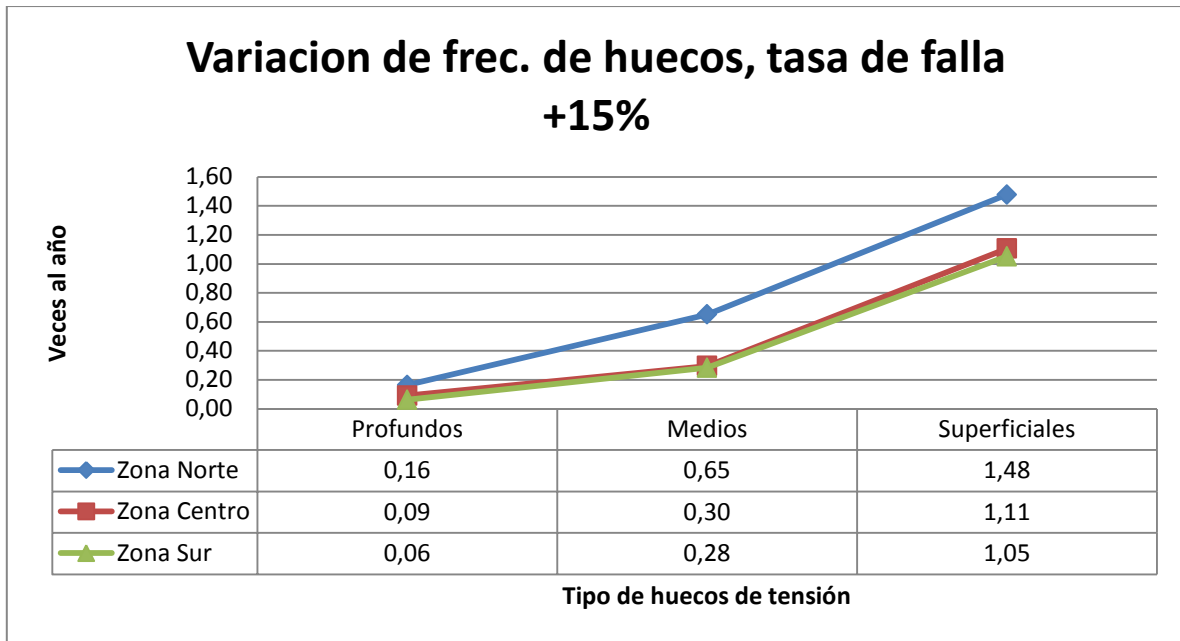


Figura 36 Variación de la frecuencia de ocurrencia de huecos de tensión cambiando las tasas de falla en +15%

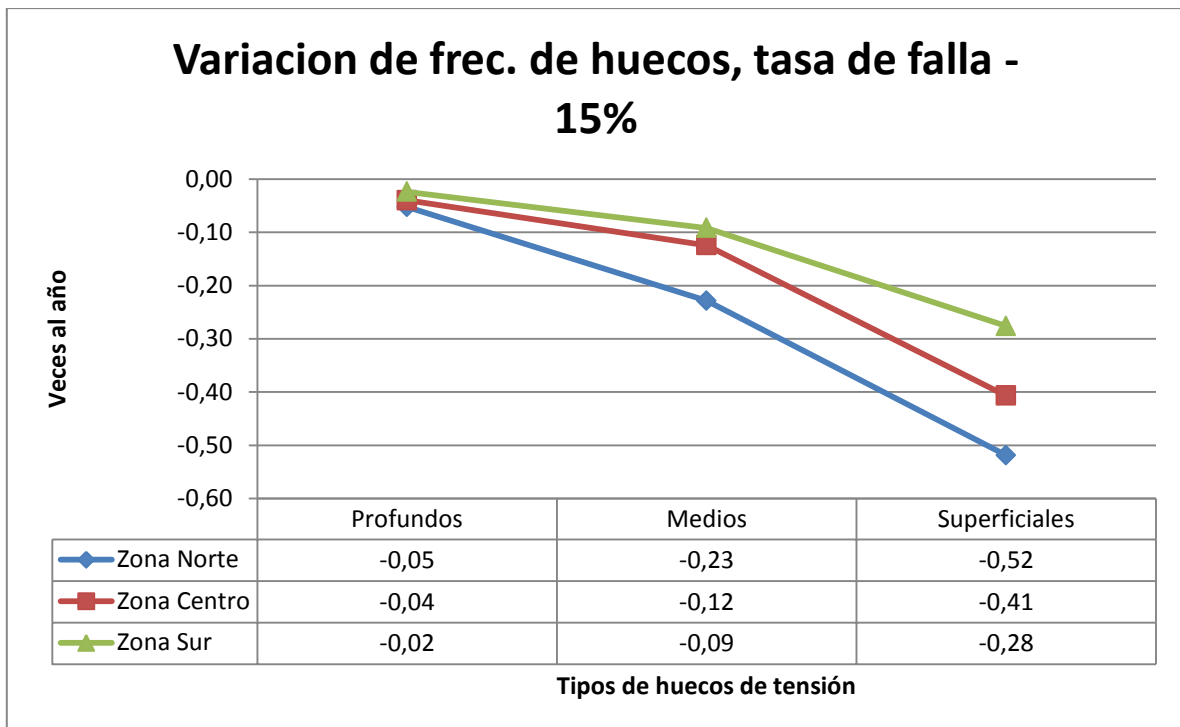


Figura 37 Variación de la frecuencia de ocurrencia de huecos de tensión cambiando las tasas de falla en -15%

En el primer escenario de tasas de falla +15% la variación es positiva, por lo que la cantidad de huecos de tensión aumenta en dicho escenario mayor tasa de falla. Caso contrario ocurre en el

escenario de tasas de falla -15% donde las variaciones son negativas lo que quiere decir que la cantidad de huecos disminuye

Al observar las figuras anteriores se desprende que claramente al subir la tasa de falla, aumenta la frecuencia de ocurrencia y al disminuirla la frecuencia de ocurrencia también disminuye. En el caso tasa de falla +15% las variaciones son mucho mayores en magnitud que el caso -15%, esto se debe a que ocurren más fallas por unidad de longitud. Puede inferirse también que al aumentar la tasa de falla las zonas sur y centro tienen variaciones más o menos similares y la zona norte se diferencia con un incremento mayor en la ocurrencia. Al mismo tiempo se observa que en ambos escenarios alternativos, la cantidad de huecos de tensión del tipo profundo varía poco en las tres zonas, y esta variación crece en magnitud con el aumento del voltaje remanente de los huecos de tensión.

6.4 Áreas de vulnerabilidad

Con los pasos descritos en la sección 5.4 se obtienen las siguientes tablas que contienen las mínimas tensiones alcanzadas durante la falla hasta el despeje de ésta. La columna 100% indica una falla en la misma barra de llegada de la línea.

Tabla 31 Área de Vulnerabilidad Cardones

Líneas	25%	50%	75%	100%
Cardones - Carrera Pinto	0,084	0,153	0,211	0,26
Cardones - Maitencillo	0,16	0,223	0,208	0,076
Carrera Pinto - Diego de almagro	0,301	0,336	0,368	0,396
Maitencillo - Punta Colorada	0,258	0,348	0,383	0,372
Punta Colorada - Pan de Azucar	0,458	0,503	0,519	0,505
Pan de Azucar - Las Palmas	0,619	0,673	0,69	0,666
Las Palmas - Los Vilos	0,707	0,729	0,732	0,712
Nogales - Polpaico	0,776	0,789	0,788	0,768
Los Vilos - Nogales	0,767	0,796	0,803	0,757
Quillota - Polpaico	0,791	0,798	0,792	0,768
Nogales - Quillota	0,797	0,815	0,814	0,789
Polpaico - Alto Jahuel 500	0,811	0,815	0,818	0,819
Polpaico - Cerro Navia	0,804	0,819	0,821	0,768
Polpaico - Ancoa 500	0,837	0,852	0,858	0,858

Tabla 32 Área de Vulnerabilidad Cerro Navia

Líneas	25%	50%	75%	100%
Cerro Navia - Chena	0,105	0,16	0,177	0,158
Cerro Navia - Polpaico	0,235	0,332	0,349	0,269
Chena - Alto Jahuel	0,302	0,355	0,373	0,316
Polpaico - Alto Jahuel 500	0,408	0,413	0,41	0,397
Polpaico - Quillota	0,446	0,512	0,518	0,452
Polpaico - Nogales	0,481	0,555	0,567	0,521
Alto Jahuel - Ancoa 500	0,545	0,611	0,636	0,622
Quillota - Nogales	0,554	0,585	0,576	0,524
Polpaico - Ancoa 500	0,558	0,625	0,645	0,621
Alto Jahuel - Colbun	0,688	0,788	0,834	0,861
Nogales - Los Vilos	0,749	0,809	0,831	0,834

Tabla 33 Área de Vulnerabilidad Valdivia

Lineas	25%	50%	75%	100%
Valdivia - Puerto Montt	0,193	0,323	0,416	0,486
Valdivia - Cautin	0,228	0,337	0,366	0,27
Cautin - Charrua	0,517	0,62	0,647	0,434
Temuco - Charrua	0,584	0,687	0,71	0,434
Charrua - Ancoa 500	0,734	0,771	0,786	0,779
Ancoa - Alto Jahuel 500	0,842	0,872	0,887	0,889
Ancoa - Polpaico 500	0,846	0,877	0,89	0,89
Charrua - hualpen	0,843	0,898	0,914	0,912

Se comprueba con las tablas anteriores que los huecos de tensión disminuyen en magnitud (aumenta el voltaje remanente) cuando las fallas se alejan de la barra de observación, pues la barra puede ser alimentada por otros caminos. Además se observa que fallas en los puntos extremos de las líneas (barras) la tensión es menor que fallas antes del final de la línea, es decir, fallas más lejanas producen huecos más profundos que otras más cercanas. Esto se explica porque la mayoría de las líneas son de doble circuito y las fallas simuladas se hicieron en uno solo de ellos, una falla en la barra provoca que se caiga la línea completa, de modo que no sea posible “levantar” el hueco de tensión en la barra de observación. Dicho comportamiento no ocurre para fallas en las líneas más extremas del SIC, que son de solo un circuito Cardones - Carrera Pinto Carrera Pinto - Diego de Almagro y Valdivia – Puerto Montt.

Los datos mostrados en las tablas anteriores ayudan a encontrar los puntos donde se alcanzan ciertos niveles de huecos de tensión para hallar áreas de vulnerabilidad. Mediante prueba y error se llega a los valores de la siguiente tabla. La cual muestra los puntos en las líneas y alguna barras que son los límites de las áreas de vulnerabilidad establecidas en voltajes remanentes de 0,4 [p.u] , 0,7 [p.u] y 0,8 [p.u].

Tabla 34 Límites de áreas de vulnerabilidad

	menores que 0,4	menores que 0,7	menores que 0,8
Cardones	7% Pta.Col – P. de Azucar	20% Las Palmas - Los Vilos	20% Polp. – C. Navia 30 % Nogales – Quillota S/E Polpaico 220
Cerro Navia	10% Polp – A. Jahuel 500 20% Polp. - Quillota 12% Polp. - Nogales	27% A. Jahuel - Colbun 15% Nogales - Los Vilos	45% Nogales -Los Vilos 54% A. Jahuel – Colbun 25% Ancoa - Charrua 500
Valdivia	70% Valdivia - Puerto Montt 10% Cautin - Charrua 6% Temuco - Charrua	60% Temuco - Charrua	S/E Ancoa 500 7% Ancoa – A. Jahuel

En las Figura 38, Figura 39 y Figura 40 se muestran esquemas referenciales de áreas de vulnerabilidad para las barras Cardones, Cerro Navia y Valdivia respectivamente los cuales no necesariamente son exactos, en ellos se muestra un unilineal por separado para cada barra. En la Figura 41 se muestra el sistema completo graficando las áreas de vulnerabilidad de las tres barras escogidas. En oscuro (naranja) las barras y líneas que provocan caídas menores que 0,4 [p.u] en la barra de observación, un poco más claro (azul) las que provocan caídas de 0,7 [p,u] y finalmente la zona más clara son las que producen caídas menores que 0,8 [p,u].

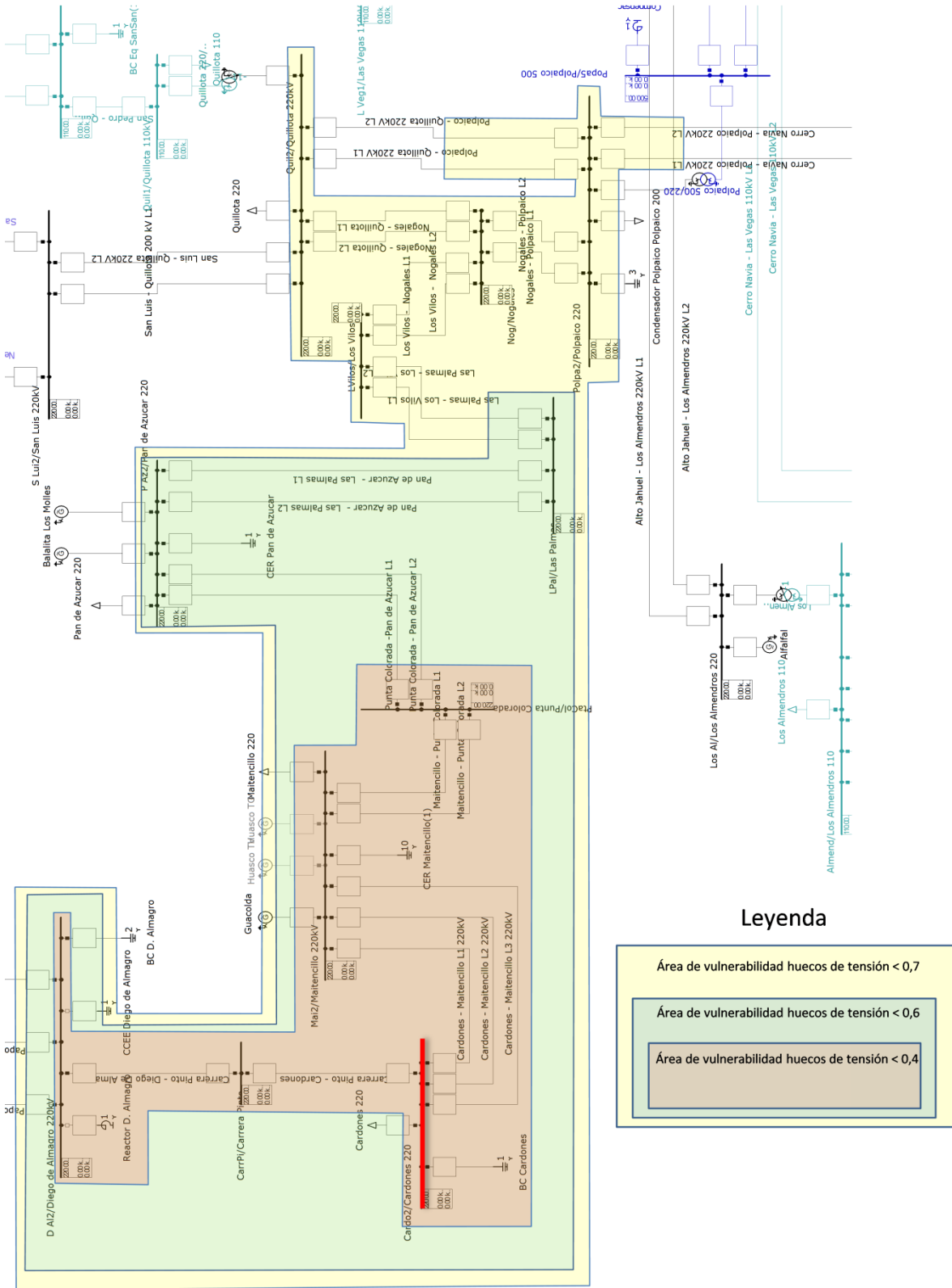


Figura 38 Áreas de Vulnerabilidad Cardones

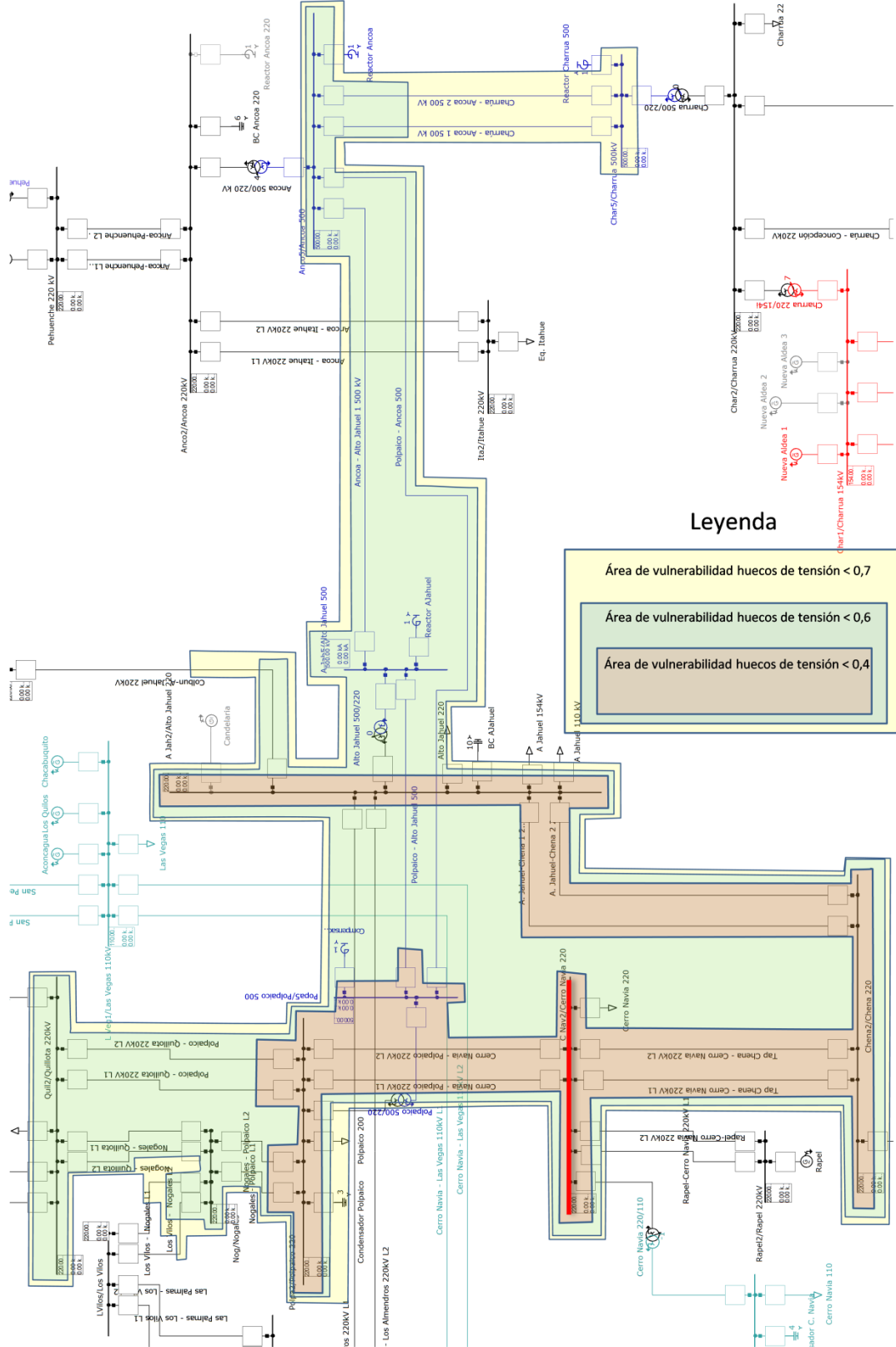
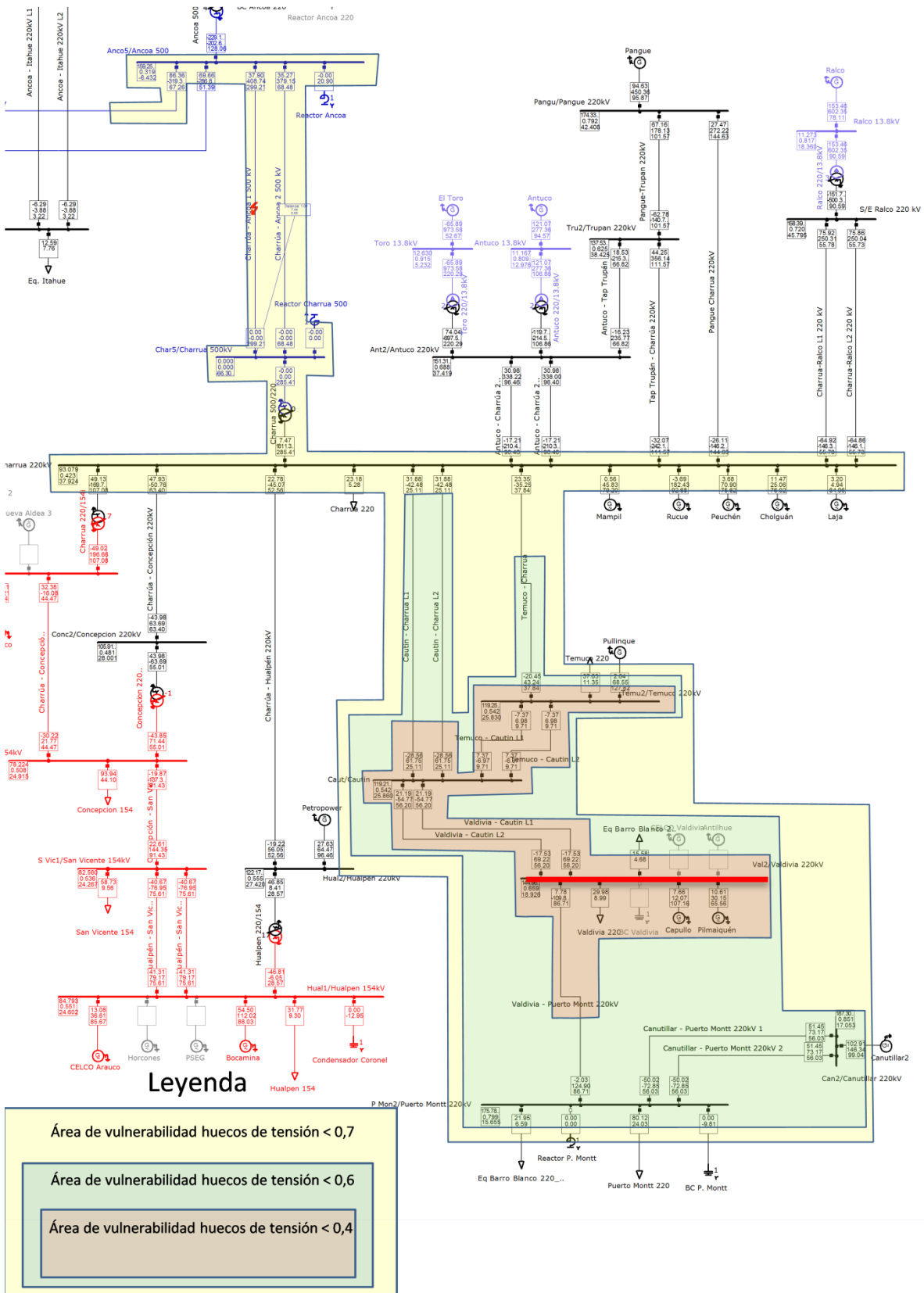


Figura 39 Áreas de Vulnerabilidad Cerro Navia



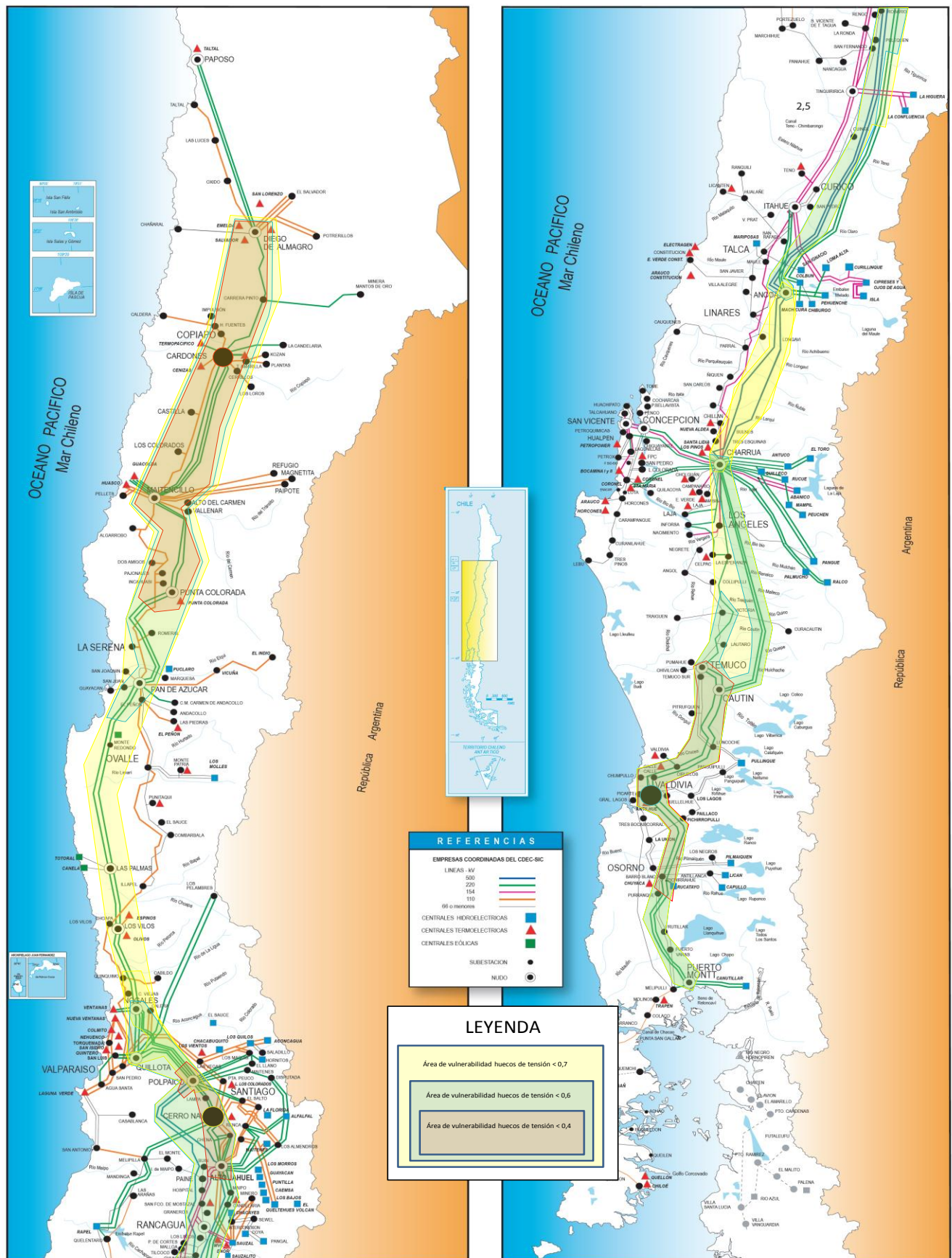


Figura 41 Áreas de vulnerabilidad: Cardones, Cerro Navia y Valdivia

Puede observarse las grandes extensiones que tienen las áreas de vulnerabilidad de las tres barras, en particular la barra Cardones que llega incluso hasta la línea Las Palmas – Los Vilos para el caso de caídas de 0,7 [p.u.] y a la línea Polpaico – Cerro Navia, para caídas de 0,8 [p.u.]. Esto ratifica lo vulnerable que son las barras del norte en materia de huecos de tensión.

La barra Cerro Navia también es sensible a los huecos de tensión, todo el sistema de 500 kV, provoca caídas de tensión menores que 0,8 [p.u.]. Las otras áreas son más reducidas pero aun así de gran extensión. El área de huecos de tensión menores que 0,4 [p.u.] es de un “radio” de dos barras lo que es relativamente bueno.

Por último, la barra de Valdivia es la que tiene una menor área de vulnerabilidad para huecos menores que 0,4 [p.u.] y para 0,7 [p.u.]. Sin embargo, ésta área incorpora hasta la barra de Ancoa 500 para las caídas menores que 0,8 [p.u.]. Esto concuerda con las frecuencias obtenidas anteriormente ya que las líneas de 500 kV tienen una menor tasa de falla, siendo la zona del Sur afectada prácticamente solo por fallas dentro de su zona.

Es importante discutir que las áreas de Cardones y Cerro Navia y también las de Cerro Navia y Valdivia se traslapan, esto quiere decir que existen lugares que al ocurrir una falla provocan caídas de tensión conjuntamente en las dos barras. Como es el caso de Quillota, Polpaico 220 y 500, Nogales para el caso de Cardones-Cerro Navia y Ancoa 500 y Charrúa 500 para el caso Cerro Navia-Valdivia.

Las zonas anteriormente expuestas sirven como parámetro para la instalación de cargas sensibles. Si se instalan estaciones convertidoras, una en Cardones y otra en Cerro Navia y ocurre una falla en Quillota, la estación en el norte verá un hueco de tensión de 0,8 [p.u] al mismo tiempo que la estación en Cerro Navia ve una tensión de 0,7 [p.u]. O al ocurrir una falla en la línea de 500 que va de Ancoa a Charrúa, afecta a las instalaciones que se encuentren en Cerro Navia y en Valdivia bajando la tensión en 0,8 [p.u].

7 Conclusiones y trabajo futuro

7.1 Conclusiones

Mediante el trabajo elaborado se realizó una recopilación de la información que existe en la literatura sobre el fenómeno de los huecos de tensión

Los huecos de tensión son causados principalmente por fallas en el sistema, adicionalmente son causados durante una energización de transformadores y grandes máquinas de inducción.

Según su origen y el voltaje que produce son categorizados en los tipos A, B, C y D. La magnitud de un hueco de tensión o voltaje remanente corresponde a una medida que permite comparar un evento de otro además de estimar sus efectos.

Equipos con electrónica de potencia son los más afectados, computadores, reguladores de velocidad poseen convertidores AC/DC, que por su carácter de usar la forma de la onda se ven perturbados. En particular los equipos usados para la conmutación de corriente continua en los sistemas HVDC sufren de aumentos de corriente en el lado DC pues al experimentar un hueco de tensión, estos sufren fallas de conmutación.

Con la ayuda de herramienta Power Factory DigSilent fue posible realizar la estimación de ocurrencia de los huecos de tensión en el Sistema Interconectado Central chileno, con los resultados fue posible construir histogramas de frecuencia absoluta y frecuencia acumulada de ocurrencia de huecos de tensión de distinta magnitud en las barras del sistema troncal del SIC. De esta forma se construyó un catastro de las frecuencias de ocurrencia de este fenómeno en todas las barras del troncal.

El sistema fue segmentado en Norte, Centro y Sur, y los huecos de tensión en profundos, medios y superficiales. Cada zona representa una barra promedio dentro de la zona geográfica. De esta manera se encontró que es el norte del SIC (hasta la barra Los Vilos) la parte que está más expuesta a sufrir huecos de tensión. Los profundos 0,67 veces al año, versus 0,44 y 0,30 para el centro y el sur respectivamente. Los de mediana intensidad 2,72 veces al año en el norte y menos de 1,4 para las otras zonas. Los huecos superficiales son sufridos casi de igual manera en todo el sistema, entre 4,6 y 6,2 eventos por años. La zona menos expuesta a estas caídas de voltaje es la zona sur teniendo el menor promedio de huecos de las tres zonas para cada tipo. Como conclusión se tiene que habría que mejorar el comportamiento de la zona norte, esto puede hacer instalando

más generadores que “suban” los huecos de tensión, o mejorando los equipos ya existentes o instalando equipos de mitigación (equipos FACTS). En las demás zonas, al tener menores magnitudes de huecos de tensión, una buena alternativa sería la instalación de equipos UPS para la carga que se desee proteger.

Mediante variaciones al caso base se pudo comprobar la dependencia de estos fenómenos con las tasas de falla de las líneas y las proporciones de falla. Al variar las proporciones de falla en el sistema, y pese a que se usó un escenario extremo donde las fallas trifásicas eran un 30% de los cortocircuitos, no se vio mayor variación en las magnitudes promedio de los huecos de tensión, los cambios en las frecuencias promedio se debió más al algoritmo que calcula los huecos de tensión. Las variaciones en las tasas de falla tampoco agregaron cambios a las magnitudes promedio, mas sí a las frecuencias de falla, la mayor variación se vio al aumentar las tasas de falla de las líneas.

También con la ayuda de la herramienta computacional fue posible determinar las áreas de vulnerabilidad de tres barras del sistema, una para cada zona definida. Las barras de observación fueron Cardones, Cerro Navia y Valdivia, cada una de ellas es importante para las eventuales ampliaciones del sistema eléctrico. Se encontraron las áreas para cada barra con un límite de 0,4, 0,7 y 0,8 de magnitud del hueco de tensión en la barra observada. De este modo fue posible ver gráficamente la influencia que tienen las fallas en el sistema sobre el voltaje en dichas barras.

Se comprobó que la barra más afectada nuevamente es una barra del Norte (Cardones), sus áreas de vulnerabilidad, y peligrosamente la de huecos severos, constan de más barras y líneas que las otras estudiadas además comprenden más kilómetros llegando hasta lo más al norte del SIC, y hacia el sur hasta la línea Polpaico –Cerro Navia. La barra Cerro Navia también posee un área de vulnerabilidad sensible llegando hasta la Barra Charrúa 500 hacia el sur, y hasta la línea Nogales – Los Vilos hacia el norte. La barra Valdivia posee áreas más pequeñas de unas cuantas barras de “radio”. A partir de esto, puede considerarse reforzar dichas barras ante una eventual conexión a instalaciones que empleen electrónica de potencia.

7.2 Trabajo futuro

Como trabajo futuro queda por incorporar las demás características de los huecos de tensión al análisis estocástico como duración, salto de fase, etc. De esta manera poder caracterizar aún más el sistema eléctrico. También agregar al análisis tasas de falla de otros equipos como transformadores y barras, además de detallar cada tasa de falla de cada línea, de manera de dar cuenta de zonas más propensas a fallar que otras.

En este trabajo se consideró las cargas estáticas con la tensión. La estimación podría mejorarse si se asumiera las cargas dinámicas que cambian la forma del hueco de tensión, como lo son en la realidad los motores presentes en el sistema.

Otra incorporación que podría realizarse es la de desarrollar o modelar un estudio técnico-económico en materia de los huecos de tensión en el sistema. Empleando estimaciones de huecos de tensión en el sistema como la de este trabajo, darle valor monetario a la ocurrencia de huecos de tensión. De esta manera las nuevas instalaciones incorporaran el riesgo de que las instalaciones fallen por fenómenos de esta naturaleza.

8 Bibliografía


- [1] Comisión Nacional de Energía, Norma Técnica de Seguridad y Calidad de Servicio, 2009.
- [2] Alejandro Gonzalez, "Fallas de Conmutación en HVDC: Origen, Efectos y Mitigación," Universidad de Chile, Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas, Santiago, Memoria (Ingeniero Civil Electricista) 2010.
- [3] Math H. Bollen, *Understanding Power Quality Problems. Voltage Dips and Interruptions*. New York: IEEE Press, 2000.
- [4] Math H. Bollen, *Tutorial on Voltage Sag Analysis*. Gothenburg, Sweden: Chalmers University of Technology, Department of Electric Power Engineering.
- [5] Juan Marinéz et al., *Voltage Dip Evaluation and Prediction Tools*.: CIGRE, 2009.
- [6] Math H. J. Bollen, "Characterisation of voltage sags experienced by three-phase adjustable speed-drives," *IEEE Transactions on Power Delivery*, vol. 12, no. 4, pp. 1666-1671, Octubre 1997.
- [7] Gonzalo Paredes, "Micro-cortes de suministro: Impacto y técnicas de mitigación en generación distribuida," Universidad de Chile, Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas, Santiago, Memoria (Ingeniero Civil Electricista) 2008.
- [8] Lidong Zhang and Lars Dofnas, "A novel method to mitigate commutation failures in HVDC systems," in *International Conference on Proceedings PowerCon 2002*, vol. 1, Ludvika, 2002, pp. 51-56.
- [9] Thomas Key, "Diagnosing power-quality related computer problems," *IEEE Trans. on Industry Applications*, vol. 15, pp. 381-189, 1979.
- [10] IEEE Std., 1346. Recommended Practice for Evaluating Electric Power System Compatibility with Electronic Process Equipment, 1998.
- [11] Ministerio de Minería, Fija Reglamento De La Ley General De Servicios Eléctricos, Decreto 327, agosto 2008.
- [12] Mark F. McGranaghan, Roger C. Dugan, Surya Santoso, and H. Wayne Beaty, "Capítulos 1 y 2," in *Electrical Power System Quality*.
- [13] Jhon Grainger and William Stevenson, "El modelo de Impedancias y los Cálculos de Red," in *Análisis de Sistemas de Potencia*.: Mc. Graw Hill, pp. 266-308.
- [14] Gabriel Olguin Parada, "Voltage Dip (Sag) Estimation in Power Systems based," Department

of Energy and Environment , Chalmers University Of Technology, Göteborg, Thesis for the degree of doctor of philosophy 2005.

- [15] DIgSILENT GmbH, "Voltage Sag Analysis," in *PowerFactory User's Manual*. Gomarigen, Germany, ch. Reliability Assessment.
- [16] Comision Nacional de Energía. Estudio de Transmision Troncal. Parte III, Anexo 9. [Online]. <http://www.cne.cl/tarificacion/electricidad/proceso-de-tarificacion-troncal/470-informes>
- [17] Fomento y Reconstrucción Ministerio de Economía, Fija Texto Refundido, Coordinado y Sistematizado del Decreto con Fuerza de Ley n°1 de minería de 1982, Ley General de Servicios Electricos, en materia de energía electrica, DFL 4.
- [18] Ministerio de Energía, Fija Instalaciones del Sistema de Trnasmision Troncal, el Area de Influencia Comun, el Valor anual de Transmision Por Tramo y Sus Componentes Con Sus Formulas de Indexación Para el Cuadrienio 2011-2014, Septiembre 5, 2011.
- [19] Math Bollen and L.D. Zang, "Different methods for classification of tree-phase unbalanced voltage dips due to faults," *Electric Power System Research*, vol. 66, no. 1, pp. 254-259.

9 Anexos

A. Empleo del módulo Tabla de Caídas de Tensión en Dig Silent

El módulo *Voltage Sag Table Assessment* (*Voltage sag table assessment.ComVsag*), se encuentra en la barra de herramientas adicionales con el ícono , o haciendo click derecho en una barra o un conjunto de ellas y seleccionar *Calcular-> Tabla de caídas de tensión*.

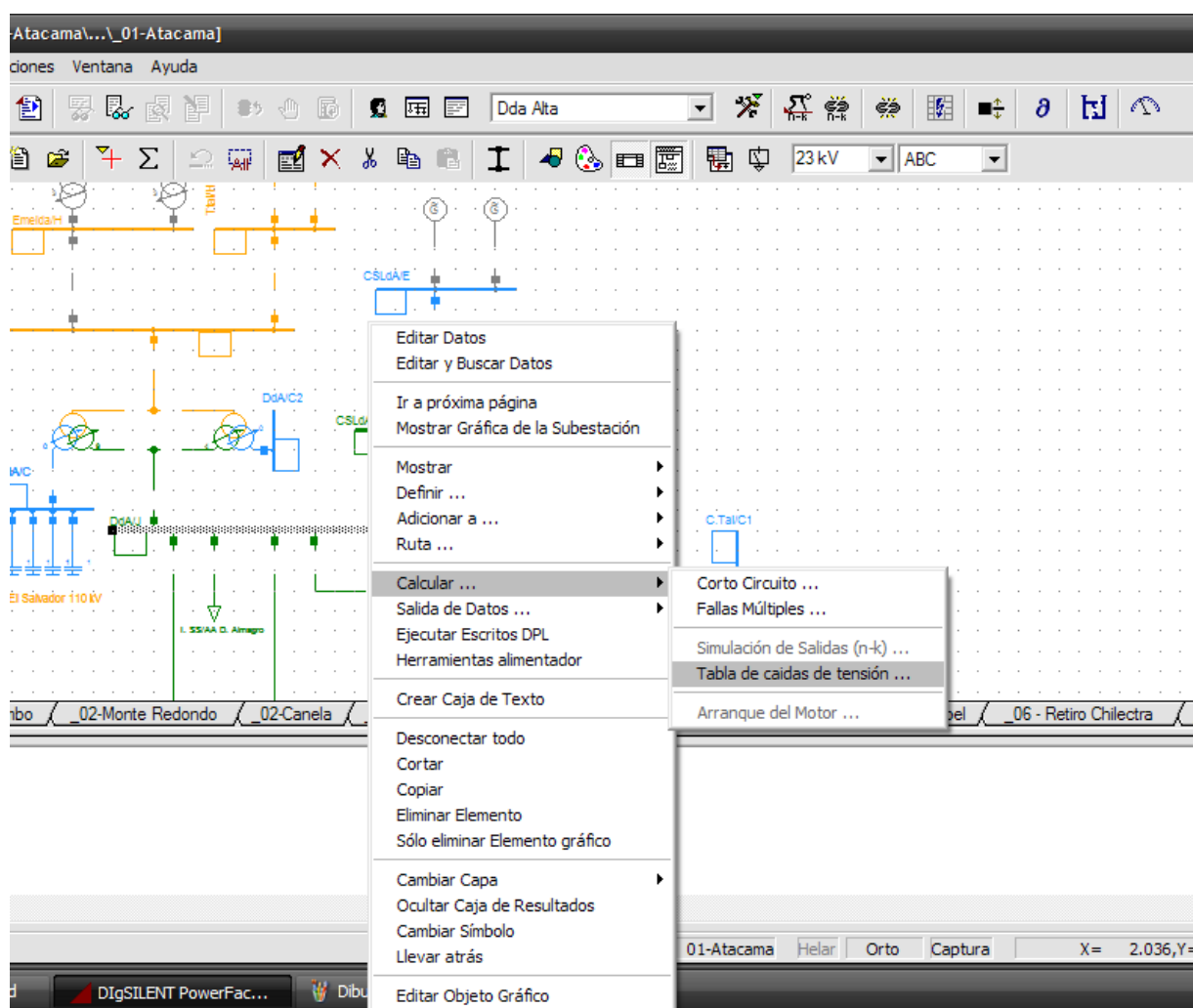


Figura 42 Correr Tabla de caídas de tensión en Dig Silent

Voltage Sag Table Assessment abrirá una ventana como la que se muestra en la Figura 43 , en ella se encuentran las pestañas de opciones básicas y opciones avanzadas.

Selección de cargas son las barras seleccionadas, que pueden ser una o un conjunto general (o *general set*) Comando de C.Circuito abre el comando de cálculo de corto-circuito, en este se pueden editar parámetros del cortocircuito, como duración y tiempos de despeje de falla, o el método de cálculo, o si es que existen impedancias de falla, estas opciones y el cuadro dialogo se muestran en la Figura 44. Se empleará siempre el método por defecto (IEC 2001). Resultados genera el archivo con los resultados del cálculo de huecos de tensión. El límite de área expuesta es el límite de área de vulnerabilidad explicado antes.

Adicionalmente el módulo de cálculo de huecos de tensión tiene opciones avanzadas que se muestran en la Figura 45 donde es posible seleccionar la frecuencia de ocurrencia de los distintos tipos de cortocircuitos; monofásico, trifásico, bifásico y bifásico a tierra. La frecuencia de falla de cada uno de estos puede ser personalizada como la muestra la Figura 45

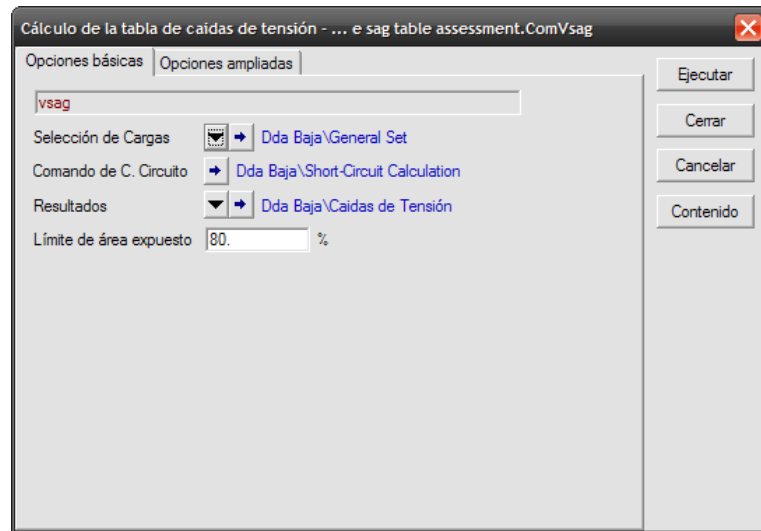


Figura 43 Opciones Básicas Tabla de caídas de tensión

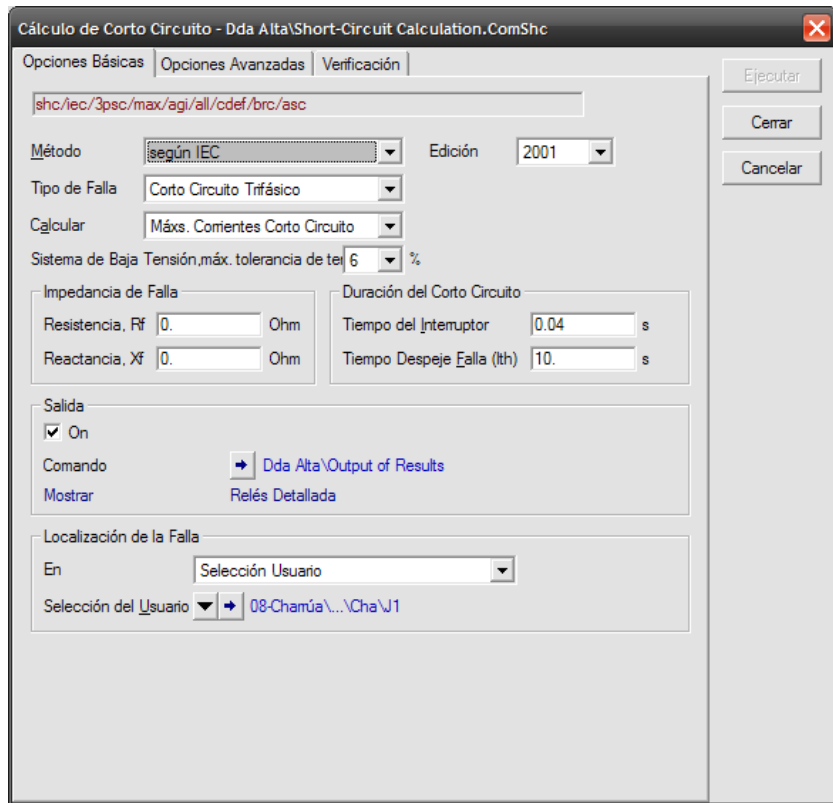


Figura 44 Cálculo de Cortocircuito

En estas opciones avanzadas es posible también seleccionar el tipo de falla en cables, entre cortocircuito trifásico y/o cortocircuito monofásico.

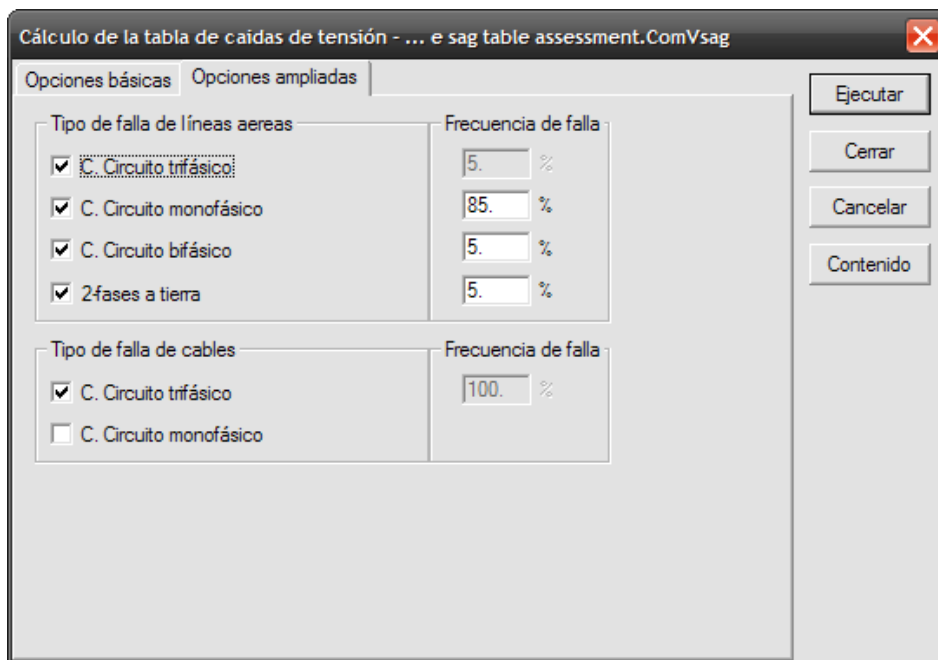


Figura 45 Opciones ampliadas Tabla de caídas de tensión

Al presionar Ejecutar el cálculo comienza, es necesario previamente que los datos de confiabilidad de los elemento del sistema estén definidos. Estos pueden ser ingresados para cada elemento del sistema, Líneas, Barras, Transformadores, etc. Sin embargo, simplemente con los datos de confiabilidad de las líneas se obtendrán resultados fiables. Barras, transformadores y otros equipos, tienen tasas de falla mucho menores. Las líneas son lo más propenso a fallar en un sistema.

El ingreso de datos se hace desde la casilla Confiabilidad de cada elemento, eligiendo ahí un modelo del elemento (o creándolo). En la Figura 46 se muestra lo anteriormente descrito.

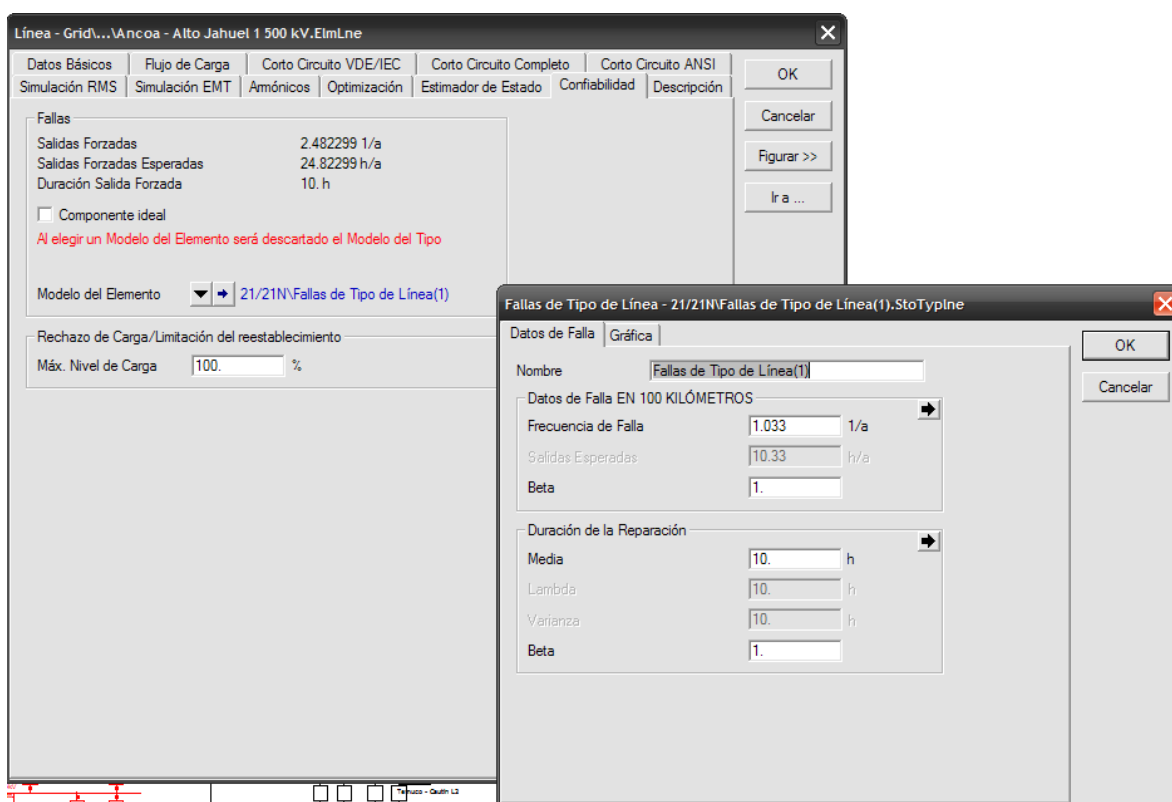


Figura 46 Ingreso de datos de Confiabilidad

B. Despacho de los generadores Caso Dda. Alta y Dda. Baja

El archivo *SIC ETT 2010 - 1019.dz* contiene la totalidad de las redes del Sistema Interconectado Central. A continuación se listan las redes que contiene la base de datos.

Tabla 35 Redes SIC, archivo DigSilent

Nombre:
01-Atacama
02-Coquimbo
03-Chilquinta-Aconcagua
04-Chilectra
05-Colbún
06-Troncal_Qui-Cha
07-Sistema154 - 66 kV (Centro)
08-Charrúa
09-Concepción
10-Araucanía
11-Araucanía 66 kV

El mismo archivo contienen varios casos de estudio, a lo largo de este documento se emplearon los casos llamados *Dda Alta* y *Dda Baja*, los cuales representan casos de demanda alta y baja alternativos al caso base del año 2010. Mayores detalles pueden revisarse los anexos (anexo 9) en la parte III del informe final del Estudio de Transmision Troncal del año 2010 del SIC [16]

A continuación los despachos para cada uno de los casos empleados para el análisis. La columna “Servicio” indica si el generador se encuentra o no fuera de servicio (0: En Servicio y 1: Fuera de Servicio).

Nombre	Dda Alta			Dda Baja		
	Servicio	Pot.Act.	Pot.React.	Servicio	Pot.Act.	Pot.React.
Generador Abanico 1	0	20	1,4	0	20	1,4
Generador Abanico 2	0	20	0	0	20	0
Generador Alfalfal 1	0	61,8	0	0	61,8	0
Generador Antihue 1 (Cenelca)	0	30	0	0	30	0
Generador Antuco 1	0	100	0	0	100	0
Generador Antuco 2	0	103,25	0	0	103,25	0
Generador Blanco (Aconcagua 1)	0	47,1	0	0	47,1	0
Generador Candelaria 1	0	0	0	1	0	0
Generador Canutillar 1	0	65	9,5	0	65	9,5
Generador Canutillar 2	0	65	9,5	0	65	9,5
Generador Capullo	0	9	0	0	9	0

Generador Celco	0	4,8	2	0	4,8	2
Generador Cipreses 1	0	22,6	0	0	22,6	0
Generador Cipreses 2	0	28	0	1	22,6	0
Generador Cipreses 3	0	28	0	1	22,6	0
Generador Colbun 1	0	200	0	1	225,9	0
Generador Colbun 2	0	200	0	0	225,9	0
Generador Confluencia	0	3,5	0	0	3,5	0
Generador Coya	0	11	0	0	11	0
Generador Curillinque	0	85,5	0	0	85,5	0
Generador Chacabucuito 1	0	6,2	0	0	6,2	0
Generador Chacabucuito 2	0	6,2	0,5	0	6,2	0,5
Generador Chacabucuito 3	0	6,2	0,5	0	6,2	0,5
Generador Chacabucuito 4	0	6,2	0,5	0	6,2	0,5
Generador Chiburgo 1	0	9,6	0	0	9,6	0
Generador Chiburgo 2	0	9,6	0	0	9,6	0
Generador E. Verde 1	0	5,3	1	0	5,3	1
Generador E. Verde 2	0	1,4	0	0	1,4	0
Generador El Toro 1	0	100	0	1	100	0
Generador El Toro 2	0	100	0	1	100	0
Generador El Toro 3	0	100	0	1	100	0
Generador El Toro 4	0	60	0	1	50	0
Generador El Volcan	0	12,9	2	0	12,9	2
Generador EPSA 1	0	1,9	0,6	0	1,9	0,6
Generador EPSA 2	0	4,6	1	0	4,6	1
Generador EPSA 3	0	3,7	1	0	3,7	1
Generador Florida	0	2,6	0	0	2,6	0
Generador FPC	0	5	0	0	5	0
Generador FPC 2	0	2	0	0	2	0
Generador Guacolda 1	0	149	0	0	149	0
Generador Guacolda 2	0	149	0	0	149	0
Generador Guacolda 3	0	149	0	0	149	0
Generador Guacolda 4	0	149	0	0	149	0
Generador Guayacán	0	5	0	0	5	0
Generador Hornitos	0	54,5	0	0	54,5	0
Generador Isla 1	0	34,3	5,9	0	34,3	5,9
Generador Isla 2	0	34,3	0	0	34,3	0
Generador Juncal (Aconcagua 2)	0	29,9	0	0	29,9	0
Generador La Higuera	0	30	0	0	30	0
Generador Laja	0	6	0	0	6	0
Generador LaPaloma	0	0	0	0	0	0
Generador Licán	0	0	0	0	0	0

Generador Lincanten	0	1	0	0	1	0
Generador Lircay 1	0	4,9	0	0	4,9	0
Generador Lircay 2	0	4,9	0	0	4,9	0
Generador Loma Alta	0	30	0	0	30	0
Generador Los Molles G1	0	8	0	1	5	0
Generador Los Pinos	0	70	0	1	0	0
Generador Los Quilos 1	0	12,6	0	0	12,6	0
Generador Los Quilos 2	0	12,6	0	0	12,6	0
Generador Los Quilos 3	0	12,6	0	0	12,6	0
Generador Los Sauces	0	0,6	0	1	0	0
Generador Machicura 1	0	44,2	0	0	44,2	0
Generador Machicura 2	0	44,2	0	0	44,2	0
Generador Maitenes 1-2-3	0	4,1	0,3	0	4,1	0,3
Generador Maitenes Aux. 1-2	0	1	0	0	1	0
Generador Mariposas	0	3,4	0	0	3,4	0
Generador Nehuenco II TG	0	240	0	1	240	0
Generador Nehuenco II TV	0	120	0	1	120	0
Generador Nueva Aldea G1	0	13,5	0	0	13,5	0
Generador Nueva Aldea G3	0	35,8	0	0	35,8	0
Generador Nueva Renca TG	0	203	0	1	203	0
Generador Nueva Renca TV	0	101,5	0	1	101,5	0
Generador Ojos de Agua	0	6,1	0	0	6,1	0
Generador Palmucho	0	25	0	0	25	0
Generador Pangué 1	0	150	0	1	120	0
Generador Pehuenche 1	0	200	0	0	120	0
Generador Pehuenche 2	0	200	0	1	275	0
Generador Pilmaiquén 1	0	5	0	0	5	0
Generador Pilmaiquén 2	0	5	0	0	5	0
Generador Pilmaiquén 3	0	5	0	0	5	0
Generador Pilmaiquén 4	0	11,9	0	0	11,9	0
Generador Pilmaiquén 5	0	11,9	0	0	11,9	0
Generador Pullínque 1	0	12,5	0	0	12,5	0
Generador Pullínque 2	0	12,5	0	1	12,5	0
Generador Pullínque 3	0	12,5	0	0	12,5	0
Generador Queltehues	0	14,8	1,33	0	14,8	1,33
Generador Quilleco 1	0	30	0	0	30	0
Generador Ralco 1	0	260	0	0	30	0
Generador Rapel 3	0	65	0	1	65	0
Generador Rapel 4	0	65	0	1	65	0
Generador Rapel 5	0	65	0	1	65	0
Generador RíoTrueno	0	2,5	0	0	2,5	0

Generador Rucue 1	0	70	0	0	80	0
Generador Rucue 2	0	70	0	1	80	0
Generador San Clemente	0	5,4	0	0	5,4	0
Generador San Ignacio	0	36,8	3,44	0	36,8	3,44
Generador San Isidro II TG	0	240	0	0	240	0
Generador San Isidro II TV	0	120	0	0	120	0
Generador San Isidro TG	0	220	0	0	180	0
Generador San Isidro TV	0	106	0	0	94	0
Generador Sauzal 1	0	23	0	0	23	0
Generador Sauzal 2	0	23	0	0	23	0
Generador Sauzal 3	0	23	0	0	23	0
Generador Sauzalito	0	10	0	0	10	0
Generador Valdivia	0	40	0	0	40	0
Generador Ventanas 2	0	75,2	0	0	75,2	0
Generador Ventanas 3	0	237	0	0	237	0

C. Resultados Demanda Alta y Demanda Baja para los distintos escenarios

A continuación se muestran las tablas de las frecuencias acumuladas de cada caso, Dda Alta y Baja de todas las barras del Sistema Troncal. Las tablas son tales que se muestran todos los niveles de voltaje que se consideran huecos de tensión (hasta 0,9 [p. u.]).

Tabla 36 Frecuencia Acumulada Huecos de Tensión Dda Alta

Columna1	< 0,2	< 0,4	< 0,6	< 0,7	< 0,8	< 0,85	< 0,9	< 0,95	< 1
Diego de Almagro.xlsx	0,73	1,18	2,44	6,11	8,38	9,16	11,04	11,52	42,18
Carrera Pint.xlsx	0,68	1,18	2,07	6,11	8,38	9,16	11,04	11,52	42,18
Cardones.xlsx	0,5	0,94	1,85	4,97	7,23	8,7	10,82	11,52	42,18
Maitencillo.xlsx	0,27	0,42	1,28	3,19	5,05	7,53	9,67	11,02	42,18
Punta Colorada.xlsx	0,14	0,8	0,99	2,31	6,59	8,1	10,41	11,5	42,16
Pan de Azucar.xlsx	0,08	0,37	1,02	1,74	5,36	7,45	9,55	13,05	42,17
Las Palma.xlsx	0,02	0,14	0,69	1,36	2,59	3,91	7,18	12,52	42,17
Los Vilos.xlsx	0,06	0,36	0,85	1,34	2,67	4,29	6,87	10,04	42,16
Nogales.xlsx	0,07	0,35	0,89	1,31	2,85	4,31	6,16	8,75	42,18
Quillota.xlsx	0,06	0,15	0,69	1,36	2,2	2,97	4,92	7,62	42,18
500 Polpaico.xlsx	0,17	0,7	1,38	1,95	3,66	5,65	7,87	10,3	42,18
Polpaico 220.xlsx	0,04	0,22	1,03	1,64	2,89	4,23	6,54	10,27	42,18
Lampa.xlsx	0	0,22	1,01	1,63	3,35	4,46	6,33	9,79	42,18
Cerro Navia.xlsx	0,03	0,3	0,84	1,81	3,18	4,67	6,13	10,29	42,17
Chena 220.xlsx	0,07	0,38	0,97	1,98	3,56	4,7	6,23	10,69	42,18
El Rodeo.xlsx	0,11	0,4	1,15	1,94	3,76	4,67	6,78	10,69	42,17
500 Alto Jahuel.xlsx	0,12	0,58	1,29	1,9	3,54	5,68	8,05	10,45	42,18
Alto Jahuel 220.xlsx	0,11	0,39	1,21	1,89	3,56	4,81	6,88	10,64	42,18
Maipo.xlsx	0,11	0,38	1,2	1,88	3,55	4,8	6,87	10,63	42,17
La Candelaria.xlsx	0,05	0,3	0,81	1,6	3,33	4,39	5,67	8,44	42,16
Itahue.xlsx	0,18	0,58	1,23	1,73	3,16	3,91	5,93	7,91	42,18
500 Ancoa.xlsx	0,28	0,81	1,51	2,33	5,01	6,14	7,42	9,78	42,16
Ancoa 220.xlsx	0,22	0,72	1,32	1,77	2,96	4,49	7,1	8,69	42,17
Hualpen.xlsx	0,1	0,41	1,36	2,27	3,86	5,12	8,76	11,64	42,17
500 Charrua.xlsx	0,4	0,74	1,2	1,94	4,92	6,34	7,49	10,12	42,17
Charrua 220.xlsx	0,12	0,32	1,14	2,02	3,24	4,62	8,24	11,58	42,18
Temuco.xlsx	0,09	0,5	1,5	2,46	4,21	5,31	7,9	14,2	42,19
Nueva Temuco.xlsx	0,09	0,51	1,49	2,46	4,19	5,37	7,9	14,02	42,19
Barro Blanco.xlsx	0	0,06	0,44	0,64	2,19	3,13	4,82	6,3	42,18
Valdivia.xlsx	0,04	0,1	0,43	0,91	2,3	3,69	5,9	7,44	42,19
Puerto Montt.xlsx	0,17	0,18	0,41	1,44	1,88	2,46	3,87	5,61	42,18

Tabla 37 Frecuencia Acumulada Huecos de Tensión Dda Baja

Columna1	< 0,2	< 0,4	< 0,6	< 0,7	< 0,8	< 0,85	< 0,9	< 0,95	< 1
Diego de Almagro.xlsx	0,73	1,18	2,44	6,11	8,38	9,25	11,05	11,66	38,46
Carrera Pinto.xlsx	0,69	1,18	2,07	6,11	8,38	9,25	11,05	11,66	38,46
Cardones.xlsx	0,5	0,94	1,85	4,97	7,23	8,79	10,84	11,66	38,46
Maitencillo.xlsx	0,27	0,42	1,28	3,19	5,09	7,64	9,7	11,19	38,47
Punta Colorada.xlsx	0,15	0,8	1	2,38	6,71	8,46	10,57	11,93	38,46
Pan de Azucar.xlsx	0,09	0,39	1,03	1,87	5,53	7,58	10,01	14,08	38,46
Las Palma.xlsx	0,02	0,15	0,87	1,27	2,74	4,32	8,68	14,18	38,46
Los Vilos.xlsx	0,06	0,41	0,86	1,25	2,89	5,14	7,83	10,82	38,46
Nogales.xlsx	0,07	0,51	0,78	1,33	3,31	5,21	7,19	8,76	38,47
Quillota.xlsx	0,06	0,32	0,84	1,4	2,45	4,34	6,4	8,22	38,47
500 Polpaico.xlsx	0	0,05	0,63	1,2	2,59	4,39	6,68	10,87	38,46
Polpaico220.xlsx	0,05	0,34	0,92	1,55	3,23	5,44	7,45	10,54	38,47
Lampa.xlsx	0,03	0,3	0,94	1,58	3,81	5,25	7,42	10,92	38,47
Cerro Navia.xlsx	0,06	0,33	1,04	1,84	4,01	4,95	7,5	11,55	38,47
Chena.xlsx	0,1	0,35	1,03	1,98	3,83	4,91	7,79	11,74	38,46
El Rodeo.xlsx	0,07	0,31	0,91	1,82	3,75	5,24	7,57	11,27	38,45
500 Alto Jahuel.xlsx	0	0,08	0,55	1,29	2,65	4,61	7	10,66	38,47
Alto Jahuel220.xlsx	0,06	0,31	0,94	1,7	3,67	5,21	7,52	11,19	38,45
Maipo.xlsx	0,06	0,31	0,94	1,7	3,67	5,21	7,48	11,18	38,46
La Candelaria.xlsx	0,13	0,36	0,7	2	3,72	4,82	6,46	9,95	38,46
Itahue.xlsx	0,04	0,2	0,29	0,68	2,06	2,81	4,1	7,02	38,46
500 Ancoa.xlsx	0	0	0,33	0,89	2,48	4,07	6,58	11,85	38,46
Ancoa 220.xlsx	0,03	0,11	0,26	0,73	2,08	3,61	5,43	8,41	38,47
Hualpen.xlsx	0,17	0,29	0,88	1,92	4,02	6,23	8,38	12,09	38,46
500 Charrua.xlsx	0	0,06	0,29	1,08	2,9	4,03	7,41	12,15	38,47
Charrua 220.xlsx	0,08	0,2	0,82	1,69	3,49	5,77	8,3	12,42	38,46
Temuco.xlsx	0,08	0,28	1,04	1,9	3,34	4,95	7,88	13,31	38,46
Nueva Temuco.xlsx	0,07	0,28	1,01	1,9	3,34	4,95	8,02	13,28	38,46
Barro Blanco.xlsx	0	0,06	0,28	0,47	2,21	2,93	4,03	5,41	38,47
Valdivia.xlsx	0,04	0,07	0,26	0,9	2,02	3,14	4,75	7,23	38,47
Puerto Montt.xlsx	0,17	0,19	0,38	1,29	1,77	2,4	3,24	4,65	38,49

Tabla 38 Frecuencia acumulada de huecos de tensión Dda Alta monofásico 60%

SS/EE	<0,2	<0,4	<0,6	<0,7	<0,8	<0,85	<0,9	<0,95	<1
Diego de Almagr.xlsx	2	3,16	4,56	7,5	9,18	9,74	11,27	12,31	40,97
Carrera Pinto.xlsx	1,88	3,16	4,3	7,5	9,18	9,74	11,27	12,31	40,97
Cardones.xlsx	1,39	2,52	3,95	6,7	8,37	9,42	11,12	12,31	40,97
Maitencillo.xlsx	0,75	1,16	3,18	4,95	6,52	8,48	10,28	11,94	40,97
Punta Colorada.xlsx	0,39	2,15	2,68	4,45	8,06	9,78	12,19	13,3	40,98
Pan de Azucar.xlsx	0,24	1,01	2,61	3,79	8,03	9,75	11,58	14,84	40,97
Las Palma.xlsx	0,05	0,39	1,86	3,33	5,45	6,82	10,08	14,59	40,99
Los Vilos.xlsx	0,17	0,97	2,22	2,7	4,59	6,24	9,24	12,19	40,96
Nogales.xlsx	0,2	0,94	1,91	2,57	4,31	5,72	7,44	9,63	40,99
Quillota.xlsx	0,16	0,42	1,53	2,46	3,51	4,31	6,14	8,67	40,96
500 Polpaico.xlsx	0,14	0,59	1,59	2,69	5,03	6,88	9,05	12,12	40,98
Polpaico220.xlsx	0,11	0,44	2,08	3,06	4,37	5,69	7,74	11,03	40,98
Lampa.xlsx	0	0,43	1,99	3,05	5,05	6,01	7,64	10,62	40,98
Cerro Navia.xlsx	0,09	0,56	1,6	3,24	4,92	6,22	7,58	10,91	40,97
Chena.xlsx	0,18	0,73	1,66	3,22	5,13	6,14	7,59	11,34	41
El Rodeo.xlsx	0,19	0,78	1,87	2,96	5,06	6,03	7,92	11,4	40,98
500 Alto Jahuel.xlsx	0,1	0,55	1,63	2,48	4,95	6,85	9,21	12,17	40,97
Alto Jahuel220.xlsx	0,17	0,71	2	2,89	4,89	6,14	8,01	11,39	40,99
Maipo.xlsx	0,17	0,7	1,99	2,89	4,89	6,12	8,01	11,38	40,98
La Candelaria.xlsx	0,15	0,66	1,48	2,47	4,25	5,5	6,79	9,28	40,99
Itahue.xlsx	0,22	0,82	1,41	1,81	3,02	4,09	6,12	9,01	40,98
500 Ancoa.xlsx	0,26	0,68	1,3	2,49	5,41	7,59	9,59	12,01	40,98
Ancoa.xlsx	0,23	0,75	1,52	1,86	3,21	4,82	7,54	10,33	40,97
Hualpen.xlsx	0,28	0,81	2,09	3,35	4,76	6,03	9,96	13,25	40,97
500 Charrua.xlsx	0,36	0,69	1,24	2,08	5,59	7,4	9,63	12,97	40,99
Charrua.xlsx	0,16	0,54	1,65	2,98	4,24	5,84	9,77	13,4	40,98
Temuc.xlsx	0,24	1,05	3,09	4,35	6,3	7,16	9,33	14,79	40,97
Nueva Temuco.xlsx	0,24	1,05	3,06	4,35	6,29	7,2	9,34	14,65	40,97
Barro Blanco.xlsx	0	0,15	1,14	1,52	3,25	4,72	6,41	8,11	40,97
Valdivia.xlsx	0,1	0,25	1,02	2,07	4,2	5,58	7,71	9,04	40,97
Puerto Montt.xlsx	0,44	0,48	0,79	1,91	2,68	3,7	5,45	7,41	40,98

Tabla 39 Frecuencia acumulada de huecos de tensión Dda Baja monofásico 60%

SS/EE	< 0,2	< 0,4	< 0,6	< 0,7	< 0,8	< 0,85	< 0,9	< 0,95	< 1
Diego de Almagro.xlsx	2,04	3,17	4,58	7,53	9,21	9,86	11,35	12,71	38,47
Carrera Pinto.xlsx	1,92	3,17	4,32	7,53	9,21	9,86	11,35	12,71	38,47
Cardones.xlsx	1,43	2,53	3,97	6,72	8,39	9,53	11,2	12,71	38,47
Maitencillo.xlsx	0,75	1,16	3,18	4,95	6,55	8,6	10,36	12,33	38,45
Punta Colorada.xlsx	0,4	2,15	2,69	4,5	8,32	10,42	12,4	14,02	38,47
Pan de Azucar.xlsx	0,25	1,07	2,67	4,12	8,35	10,02	12,35	15,98	38,47
Las Palmas.xlsx	0,05	0,41	2,34	3,35	5,96	7,5	11,91	16,35	38,46
Los Vilos.xlsx	0,17	1,13	2,32	2,92	5,19	7,51	10,49	13,56	38,48
Nogales.xlsx	0,21	1,38	2,1	3,03	5,23	6,87	8,78	10,47	38,46
Quillota.xlsx	0,17	0,87	2,03	2,9	4,19	5,99	8,07	10	38,47
Polpaico220.xlsx	0,14	0,92	2,47	3,34	5,16	7,3	9,41	12,72	38,47
500 Polpaico.xlsx	0	0,15	1,71	3,18	5,14	7,45	10,13	14,16	38,46
Lampa.xlsx	0,07	0,81	2,53	3,62	5,82	7,25	9,4	13,21	38,47
Cerro Navia.xlsx	0,18	0,93	2,79	3,87	6,02	7,04	9,41	13,77	38,44
Chena.xlsx	0,29	0,97	2,76	3,88	5,9	7,07	9,78	14,06	38,47
El Rodeo.xlsx	0,21	0,88	2,39	3,68	5,79	7,41	9,75	13,78	38,46
Alto Jahuel220.xlsx	0,17	0,86	2,39	3,57	5,72	7,41	9,78	13,78	38,45
500 Alto Jahuel.xlsx	0	0,23	1,51	3,26	5,25	7,54	10,36	13,87	38,48
Maipo.xlsx	0,17	0,86	2,39	3,57	5,72	7,41	9,74	13,76	38,45
La Candelaria.xlsx	0,36	0,96	1,89	3,66	5,52	6,77	8,6	12,5	38,47
Itahue.xlsx	0,12	0,53	0,66	1,07	3,13	4,81	7,07	10,35	38,47
Ancoa220.xlsx	0,08	0,28	0,67	1,63	3,92	6,3	8,65	12,15	38,46
500 Ancoa.xlsx	0	0	0,97	2,52	5,76	7,8	10,57	15,61	38,46
Hualpen.xlsx	0,5	0,88	2,28	3,44	6,64	9,55	12,03	15,46	38,47
Charrua220.xlsx	0,25	0,61	2,03	3,26	6,62	9,46	12,14	15,75	38,46
500 Charrua.xlsx	0	0,19	0,87	2,83	6,23	8,2	11,81	15,72	38,46
Temuco.xlsx	0,23	0,84	2,84	4,19	5,8	7,74	10,92	16,16	38,45
Nueva Temuco.xlsx	0,2	0,84	2,79	4,19	5,79	7,75	11,05	16,15	38,48
Barro Blanco.xlsx	0	0,16	0,74	1,2	3,46	4,58	6,1	7,69	38,46
Valdivia.xlsx	0,09	0,16	0,64	2,13	4,04	5,42	6,97	9,92	38,46
Puerto Montt.xlsx	0,44	0,49	0,71	1,52	2,48	3,82	5,07	6,76	38,46

Tabla 40 Frecuencia acumulada de huecos de tensión Dda Alta tasa de falla +15%

SS/EE	< 0,2	< 0,4	< 0,6	< 0,7	< 0,8	< 0,85	< 0,9	< 0,95	< 1
Diego de Almagro.xlsx	0,9	1,46	3,02	7,58	10,4	11,36	13,69	14,29	52,08
Carrera Pinto.xlsx	0,85	1,47	2,57	7,58	10,4	11,36	13,69	14,29	52,08
Cardones.xlsx	0,62	1,17	2,29	6,16	8,96	10,78	13,41	14,28	52,07
Maitencillo.xlsx	0,34	0,52	1,59	3,96	6,27	9,35	12	13,68	52,09
Punta Colorada.xlsx	0,17	0,99	1,22	2,86	8,17	10,05	12,92	14,27	52,07
Pan de Azucar.xlsx	0,1	0,45	1,25	2,15	6,64	9,22	11,83	16,16	52,07
Las Palmas.xlsx	0,03	0,18	0,87	1,69	3,22	4,84	8,88	15,49	52,08
Los Vilos.xlsx	0,08	0,46	1,07	1,67	3,31	5,31	8,5	12,41	52,09
Nogales.xlsx	0,09	0,43	1,08	1,6	3,49	5,29	7,57	10,75	52,07
Quillota.xlsx	0,08	0,19	0,86	1,68	2,7	3,64	6,04	9,36	52,09
500 Polpaico.xlsx	0,2	0,83	1,65	2,35	4,41	6,8	9,52	12,53	52,07
Polpaico.xlsx	0,04	0,26	1,24	1,98	3,51	5,16	8	12,56	52,06
Lampa.xlsx	0	0,26	1,22	1,97	4,08	5,44	7,73	11,96	52,07
Cerro Navia.xlsx	0,04	0,37	1,03	2,22	3,9	5,73	7,52	12,6	52,08
Chena.xlsx	0,08	0,46	1,17	2,41	4,35	5,74	7,61	13,02	52,07
El Rodeo.xlsx	0,14	0,49	1,39	2,35	4,58	5,7	8,28	13,02	52,07
500 Alto Jahuel.xlsx	0,14	0,68	1,53	2,27	4,26	6,83	9,73	12,7	52,05
Alto Jahuel.xlsx	0,13	0,47	1,47	2,3	4,35	5,88	8,41	12,97	52,09
Maipo.xlsx	0,13	0,46	1,46	2,29	4,35	5,88	8,41	12,97	52,09
La Candelaria.xlsx	0,07	0,38	1	1,96	4,08	5,39	6,96	10,32	52,09
Itahue.xlsx	0,21	0,69	1,46	2,07	3,82	4,73	7,15	9,56	52,07
500 Ancoa.xlsx	0,34	0,97	1,81	2,79	6	7,4	8,99	11,92	52,08
Ancoa.xlsx	0,27	0,87	1,59	2,13	3,58	5,43	8,58	10,55	52,08
Hualpen.xlsx	0,13	0,51	1,65	2,77	4,72	6,25	10,67	14,22	52,09
500 Charrua.xlsx	0,48	0,89	1,44	2,33	5,91	7,65	9,07	12,33	52,08
Charrua.xlsx	0,14	0,39	1,38	2,45	3,93	5,6	10	14,12	52,07
Temuco.xlsx	0,11	0,6	1,82	2,99	5,14	6,49	9,67	17,38	52,09
Nueva Temuco.xlsx	0,11	0,62	1,81	2,99	5,12	6,57	9,67	17,15	52,09
Barro Blanco.xlsx	0	0,07	0,54	0,79	2,71	3,86	5,94	7,76	52,07
Valdivia.xlsx	0,05	0,12	0,53	1,12	2,82	4,54	7,27	9,15	52,09
Puerto Montt.xlsx	0,21	0,23	0,51	1,78	2,33	3,04	4,77	6,92	52,08

Tabla 41 Frecuencia acumulada de huecos de tensión Dda Baja tasa de falla +15%

SS/EE	< 0,2	< 0,4	< 0,6	< 0,7	< 0,8	< 0,85	< 0,9	< 0,95	< 1
Diego de Almagro.xlsx	0,91	1,46	3,02	7,57	10,39	11,47	13,71	14,47	47,71
Carrera Pinto.xlsx	0,85	1,46	2,56	7,57	10,39	11,47	13,71	14,47	47,71
Cardones.xlsx	0,62	1,16	2,29	6,16	8,96	10,9	13,44	14,46	47,7
Maitencillo.xlsx	0,34	0,52	1,59	3,96	6,31	9,47	12,02	13,86	47,71
Punta Colorada.xlsx	0,18	0,99	1,23	2,94	8,32	10,49	13,11	14,8	47,72
Pan de Azucar.xlsx	0,11	0,49	1,29	2,33	6,87	9,41	12,43	17,48	47,72
Las Palmas.xlsx	0,02	0,18	1,08	1,57	3,4	5,36	10,77	17,59	47,71
Los Vilos.xlsx	0,07	0,51	1,07	1,55	3,59	6,38	9,72	13,43	47,72
Nogales.xlsx	0,09	0,63	0,96	1,64	4,1	6,45	8,9	10,84	47,7
Quillota.xlsx	0,08	0,41	1,05	1,74	3,04	5,38	7,93	10,19	47,72
500 Polpaico.xlsx	0	0,06	0,78	1,49	3,21	5,45	8,29	13,49	47,72
Polpaico.xlsx	0,06	0,42	1,14	1,93	4,01	6,75	9,24	13,07	47,72
Lampa.xlsx	0,03	0,36	1,16	1,96	4,73	6,52	9,21	13,55	47,73
Cerro Navia.xlsx	0,08	0,42	1,3	2,3	4,99	6,15	9,31	14,33	47,72
Chena.xlsx	0,13	0,44	1,28	2,46	4,76	6,1	9,67	14,57	47,72
El Rodeo.xlsx	0,09	0,39	1,13	2,26	4,66	6,5	9,4	13,99	47,71
500 Alto Jahuel.xlsx	0	0,1	0,69	1,6	3,29	5,72	8,69	13,23	47,73
Alto Jahuel.xlsx	0,07	0,38	1,17	2,11	4,56	6,47	9,34	13,9	47,71
Maipo.xlsx	0,07	0,39	1,18	2,12	4,57	6,48	9,3	13,88	47,72
La Candelaria.xlsx	0,16	0,44	0,86	2,48	4,62	5,99	8,02	12,34	47,71
Itahue.xlsx	0,05	0,24	0,35	0,84	2,55	3,48	5,08	8,7	47,7
500 Ancoa.xlsx	0	0	0,41	1,1	3,07	5,04	8,15	14,69	47,7
Ancoa.xlsx	0,03	0,12	0,31	0,89	2,56	4,45	6,71	10,41	47,71
Hualpen.xlsx	0,22	0,37	1,1	2,39	4,99	7,73	10,39	15	47,71
500 Charrua.xlsx	0	0,07	0,35	1,33	3,59	4,99	9,19	15,07	47,72
Charrua.xlsx	0,1	0,25	1,02	2,09	4,32	7,15	10,29	15,4	47,71
Temuco.xlsx	0,1	0,35	1,29	2,36	4,14	6,14	9,78	16,52	47,72
Nueva Temuco.xlsx	0,09	0,35	1,26	2,36	4,14	6,14	9,95	16,48	47,72
Barro Blanco.xlsx	0	0,07	0,34	0,58	2,73	3,62	4,99	6,71	47,72
Valdivia.xlsx	0,04	0,07	0,3	1,1	2,49	3,88	5,87	8,95	47,71
Puerto Montt.xlsx	0,21	0,23	0,46	1,58	2,17	2,96	4	5,74	47,72

Tabla 42 Frecuencia acumulada de huecos de tensión Dda Alta tasa de falla -15%

SS/EE	< 0,2	< 0,4	< 0,6	< 0,7	< 0,8	< 0,85	< 0,9	< 0,95	< 1
Diego de Almagro.xlsx	0,67	1,08	2,23	5,6	7,68	8,39	10,11	10,55	38,48
Carrera Pinto.xlsx	0,63	1,09	1,9	5,61	7,69	8,4	10,12	10,56	38,49
Cardones.xlsx	0,46	0,87	1,7	4,56	6,63	7,98	9,93	10,57	38,5
Maitencillo.xlsx	0,25	0,38	1,17	2,92	4,63	6,9	8,86	10,1	38,49
Punta Colorada.xlsx	0,13	0,74	0,91	2,12	6,05	7,44	9,56	10,56	38,5
Pan de Azucar.xlsx	0,08	0,34	0,93	1,59	4,91	6,82	8,75	11,95	38,49
Las Palmas.xlsx	0,02	0,13	0,64	1,25	2,38	3,58	6,57	11,46	38,51
Los Vilos.xlsx	0,06	0,34	0,79	1,23	2,44	3,92	6,28	9,17	38,5
Nogales.xlsx	0,06	0,31	0,79	1,18	2,57	3,9	5,59	7,94	38,48
Quillota.xlsx	0,06	0,14	0,63	1,24	1,99	2,69	4,47	6,92	38,5
500 Polpaico.xlsx	0,15	0,62	1,23	1,75	3,28	5,05	7,06	9,29	38,51
Polpaico.xlsx	0,03	0,19	0,92	1,47	2,6	3,82	5,92	9,29	38,49
Lampa.xlsx	0	0,19	0,9	1,46	3,02	4,02	5,71	8,83	38,48
Cerro Navia.xlsx	0,03	0,28	0,77	1,65	2,89	4,24	5,56	9,32	38,5
Chena.xlsx	0,06	0,34	0,87	1,78	3,22	4,25	5,63	9,63	38,49
El Rodeo.xlsx	0,1	0,36	1,03	1,74	3,39	4,21	6,12	9,62	38,48
500 Alto Jahuel.xlsx	0,11	0,51	1,14	1,69	3,16	5,06	7,21	9,41	38,5
Alto Jahuel.xlsx	0,1	0,35	1,09	1,7	3,22	4,35	6,22	9,59	38,5
Maipo.xlsx	0,1	0,35	1,09	1,7	3,22	4,35	6,22	9,59	38,51
La Candelaria.xlsx	0,05	0,28	0,74	1,45	3,02	3,99	5,15	7,63	38,5
Itahue.xlsx	0,16	0,52	1,09	1,54	2,83	3,5	5,29	7,07	38,49
500 Ancoa.xlsx	0,25	0,72	1,34	2,07	4,45	5,48	6,65	8,81	38,49
Ancoa.xlsx	0,2	0,64	1,17	1,57	2,64	4,01	6,34	7,8	38,49
Hualpen.xlsx	0,09	0,37	1,22	2,05	3,49	4,62	7,88	10,5	38,49
500 Charrua.xlsx	0,35	0,65	1,06	1,72	4,37	5,65	6,7	9,11	38,49
Charrua.xlsx	0,11	0,29	1,02	1,81	2,91	4,14	7,39	10,43	38,48
Temuco.xlsx	0,08	0,44	1,34	2,21	3,8	4,8	7,15	12,85	38,5
Nueva Temuco.xlsx	0,08	0,45	1,33	2,2	3,77	4,84	7,13	12,66	38,48
Barro Blanco.xlsx	0	0,05	0,4	0,58	2	2,85	4,39	5,74	38,49
Valdivia.xlsx	0,03	0,08	0,38	0,82	2,07	3,34	5,36	6,75	38,49
Puerto Montt.xlsx	0,15	0,16	0,37	1,31	1,72	2,25	3,53	5,12	38,5

Tabla 43 Frecuencia acumulada de huecos de tensión Dda Baja tasa de falla -15%

Columna1	< 0,2	< 0,4	< 0,6	< 0,7	< 0,8	< 0,85	< 0,9	< 0,95	< 1
Diego de Almagro.xlsx	0,67	1,08	2,24	5,61	7,69	8,49	10,14	10,7	35,27
Carrera Pinto.xlsx	0,63	1,08	1,9	5,6	7,68	8,48	10,13	10,69	35,26
Cardones.xlsx	0,46	0,86	1,69	4,55	6,62	8,05	9,93	10,69	35,26
Maitencillo.xlsx	0,25	0,38	1,17	2,93	4,67	7,01	8,9	10,26	35,28
Punta Colorada.xlsx	0,14	0,74	0,92	2,18	6,15	7,75	9,69	10,94	35,27
Pan de Azucar.xlsx	0,08	0,36	0,95	1,72	5,08	6,96	9,19	12,92	35,27
Las Palmas.xlsx	0,02	0,14	0,8	1,16	2,51	3,96	7,96	13	35,26
Los Vilos.xlsx	0,05	0,37	0,79	1,15	2,66	4,72	7,19	9,93	35,27
Nogales.xlsx	0,07	0,47	0,71	1,22	3,04	4,78	6,59	8,03	35,27
Quillota.xlsx	0,06	0,3	0,77	1,28	2,24	3,97	5,86	7,53	35,27
500 Polpaico.xlsx	0	0,05	0,58	1,1	2,37	4,02	6,12	9,97	35,27
Polpaico.xlsx	0,05	0,32	0,85	1,43	2,97	4,99	6,83	9,66	35,27
Lampa.xlsx	0,02	0,26	0,85	1,44	3,48	4,8	6,79	10	35,26
Cerro Navia.xlsx	0,06	0,31	0,96	1,7	3,69	4,55	6,88	10,59	35,27
Chena.xlsx	0,09	0,32	0,94	1,81	3,51	4,5	7,14	10,76	35,26
El Rodeo.xlsx	0,07	0,29	0,84	1,68	3,45	4,81	6,95	10,34	35,27
500 Alto Jahuel.xlsx	0	0,07	0,5	1,18	2,43	4,23	6,43	9,78	35,28
Alto Jahuel.xlsx	0,05	0,28	0,86	1,56	3,37	4,78	6,9	10,27	35,26
Maipo.xlsx	0,05	0,28	0,86	1,56	3,37	4,78	6,86	10,25	35,26
La Candelaria.xlsx	0,12	0,33	0,64	1,83	3,41	4,42	5,92	9,12	35,27
Itahue.xlsx	0,04	0,18	0,26	0,62	1,89	2,58	3,77	6,45	35,28
500 Ancoa.xlsx	0	0	0,3	0,81	2,27	3,73	6,03	10,87	35,27
Ancoa.xlsx	0,02	0,09	0,23	0,66	1,9	3,3	4,97	7,7	35,27
Hualpen.xlsx	0,16	0,27	0,81	1,76	3,68	5,71	7,68	11,08	35,26
500 Charrua.xlsx	0	0,06	0,27	1	2,67	3,7	6,8	11,14	35,27
Charrua.xlsx	0,07	0,18	0,75	1,54	3,19	5,28	7,6	11,38	35,26
Temuco.xlsx	0,07	0,26	0,95	1,74	3,06	4,53	7,22	12,2	35,26
Nueva Temuco.xlsx	0,06	0,25	0,92	1,74	3,06	4,54	7,36	12,19	35,28
Barro Blanco.xlsx	0	0,05	0,25	0,42	2,01	2,67	3,68	4,95	35,26
Valdivia.xlsx	0,03	0,05	0,22	0,81	1,84	2,87	4,34	6,61	35,26
Puerto Montt.xlsx	0,15	0,16	0,33	1,16	1,6	2,18	2,95	4,24	35,27

D. Confiabilidad en Sistemas de Potencia

Confiabilidad: Probabilidad que un dispositivo realice su propósito adecuadamente por un periodo de tiempo previsto bajo ciertas condiciones de operación. Como la confiabilidad tiene que ver con que un equipo realice su propósito adecuadamente, quiere decir que podría no realizarlo, a lo cual se le llamará *falla*.

La probabilidad que el dispositivo falle en cualquier tiempo $T < t$ se llamará Función de Distribución de Falla:

$$Pbb(\text{dispositivo falle en } T \leq t) = F(t) \quad (9.1)$$

La confiabilidad será el inverso probabilístico de la función anterior:

$$R(t) = 1 - F(t) \quad (9.2)$$

De esta forma se define densidad de falla

$$F(t) = \int_0^t f(t) dt \quad (9.3)$$

$$R(t) = 1 - \int_0^t f(t) dt \quad (9.4)$$

Estas se representan en el siguiente gráfico.

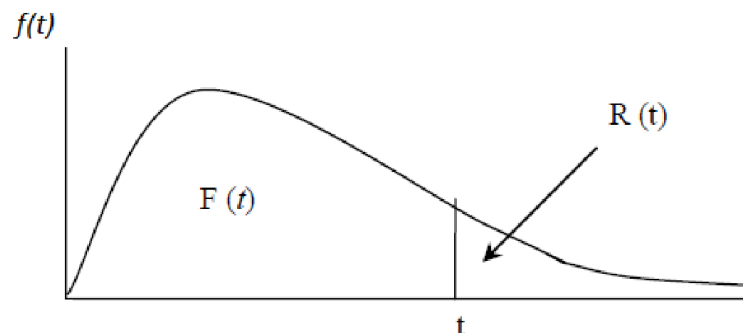


Figura 47 Gráfico de de densidad de falla

La probabilidad de falla en el intervalo t_1, t_2 es:

$$\int_{t_1}^{t_2} f(t)dt = F(t_2) - F(t_1) = R(t_1) - R(t_2) \quad (9.5)$$

Expresando la probabilidad de falla por unidad de tiempo e imponiendo que no haya fallado antes de t_1 , se tiene:

$$H(t_1, t_2) = \frac{R(t_1) - R(t_2)}{(t_1 - t_2) \cdot R(t_1)} \quad (9.6)$$

Haciendo $t_2 - t_1 = \Delta t$ y $t_1 = t$, y reemplazando en (9.6) se tiene la siguiente ecuación.

$$H(t) = \frac{R(t) - R(t + \Delta t)}{\Delta t \cdot R(t)} \quad (9.7)$$

Si se hace tender el intervalo Δt a cero se obtiene la definición de derivada, esto es:

$$\lambda(t) = \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{R(t) - R(t + \Delta t)}{\Delta t \cdot R(t)} = -\frac{dR(t)}{dt} \cdot \frac{1}{R(t)} \quad (9.8)$$

Se llama a $\lambda(t)$ al número de transiciones que un elemento realiza entre el estado normal y el estado de falla. Mediante la integración de (9.8) puede obtenerse una relación para $R(t)$.

$$\int \lambda(t)dt = \int -\frac{dR}{R(t)} \quad (9.9)$$

$$R(t) = e^{-\int \lambda(t)dt}$$

La función $\lambda(t)$ representa la tasa de falla de los equipos (fallas por unidad de tiempo), esta es conocida como la curva de la bañera (por su forma representada en la Figura 48), pues el equipo tiene alta tasa de falla al principio y fin de su vida útil.

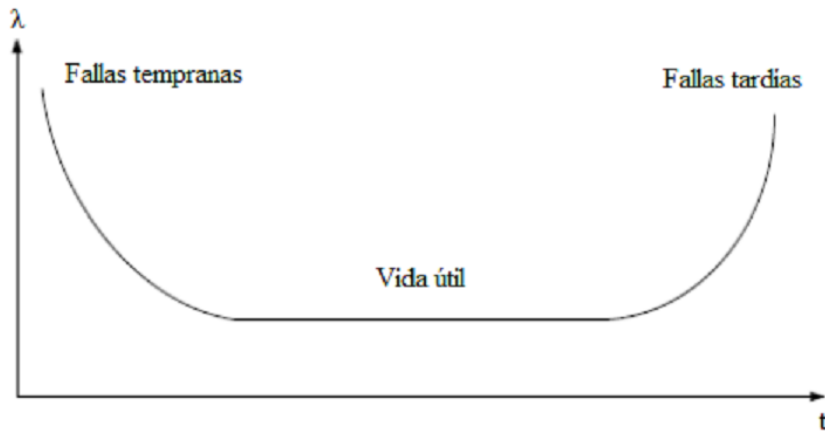


Figura 48 Curva de la bañera

Se asume en el período de λ constante, por lo tanto:

$$R(t) = e^{-\lambda t} \quad (9.10)$$

Para este período se tiene densidad de falla:

$$f(t) = \frac{dF(t)}{dt} = -\frac{dR(t)}{dt} = \lambda e^{-\lambda t} \quad (9.11)$$

De (9.11) se concluye que $f(t)$ es una distribución exponencial

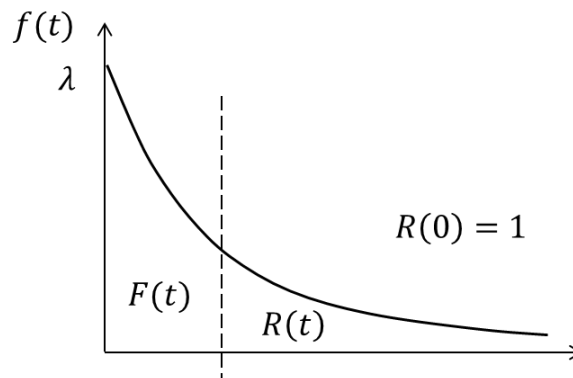


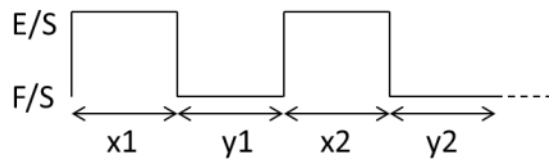
Figura 49 Distribución exponencial

El valor esperado del tiempo a fallar se calcula como:

$$E\{t\} = \int_0^{\infty} tf(t)dt = \int_0^{\infty} t\lambda e^{-\lambda t} dt \quad (9.12)$$

$$E\{t\} = \frac{1}{\lambda}$$

El resultado de $E\{t\} = \frac{1}{\lambda}$ es también conocido como el tiempo medio a fallar (MTTF por sus siglas en inglés), y a su vez existe el tiempo medio de reposición (MTTR) y el tiempo medio entre fallas (MTBF), de esta forma se tiene un valor representativo de pasar del estado fuera de servicio al estado en servicio, como si esa onda fuera periódica.



$$MTTF = \bar{x} = m \quad (9.13)$$

$$MTTR = \bar{y} = r \quad (9.14)$$

$$MTBF = m + r = T \quad (9.15)$$

Cada uno de los tiempos anteriores tiene su inverso, que corresponde a una tasa.

$$\text{Tasa de falla: } \lambda = \frac{1}{m} \quad (9.16)$$

$$\text{Tasa de reparación: } \mu = \frac{1}{r} \quad (9.17)$$

$$\text{Frecuencia: } f = \frac{1}{T} = \frac{1}{m + r} \quad (9.18)$$

Los tiempos y tasa indicados anteriormente normalmente se expresan en unidades de años [años] y veces por año [$1/\text{años}$] respectivamente.

E. Sistema Troncal del SIC

Se cita el extracto el decreto con fuerza de ley N°4 que define el sistema troncal [17]:

“Las instalaciones pertenecientes a cada uno de los tramos del sistema de transmisión troncal deberán cumplir con las siguientes características:

- a) Mostrar una variabilidad relevante en la magnitud y dirección de los flujos de potencia, como resultado de abastecer en forma óptima una misma configuración de demanda para diferentes escenarios de disponibilidad del parque generador existente, considerando las restricciones impuestas por el cumplimiento de las exigencias de calidad y seguridad de servicio, incluyendo situaciones de contingencia y falla;*
- b) Tener una tensión nominal igual o mayor a 220 kilovolts;*
- c) Que la magnitud de los flujos en estas líneas no esté determinada por el consumo de un número reducido de consumidores;*
- d) Que los flujos en las líneas no sean atribuidos exclusivamente al consumo de un cliente, o a la producción de una central generadora o de un grupo reducido de centrales generadoras,*
y
- e) Que la línea tenga tramos con flujos bidireccionales relevantes.*

No obstante, una vez determinados los límites del sistema de transmisión troncal, se incluirán en él las instalaciones interiores que sean necesarias para asegurar la continuidad de tal sistema.”

A su vez se presenta el extracto del decreto n°61 [18], que fija las instalaciones troncales para el cuatrienio 2011-2014, en este se indica cada tramo y si pertenece o no al Área de Influencia Común (AIC).

N°	Tramo Troncal		Área de Influencia Común (AIC)	Código Asignado
	De Barra	A Barra		
9	Ancoa 500	Polpaico 500	AIC SIC	TSIC - 01
10	Ancoa 500	Alto Jahuel 500	AIC SIC	TSIC - 02
11	Alto Jahuel 500	Polpaico 500	AIC SIC	TSIC - 03
12	Charrúa 500	Ancoa 500	AIC SIC	TSIC - 04
13	Charrúa 500	Ancoa 500	AIC SIC	TSIC - 05
14	Diego de Almagro 220	Carrera Pinto 220	-	TSIC - 06
15	Carrera Pinto 220	Cardones 220	-	TSIC - 07
16	Cardones 220	Maitencillo 220	-	TSIC - 08
17	Cardones 220	Maitencillo 220	-	TSIC - 09
18	Maitencillo 220	Punta Colorada 220	-	TSIC - 10
19	Maitencillo 220	Punta Colorada 220	-	TSIC - 11
20	Punta Colorada 220	Pan de Azúcar 220	-	TSIC - 12
21	Punta Colorada 220	Pan de Azúcar 220	-	TSIC - 13
22	Pan de Azúcar 220	Las Palmas 220	-	TSIC - 14
23	Las Palmas 220	Los Vilos 220	-	TSIC - 15
24	Pan de Azúcar 220	Las Palmas 220	-	TSIC - 16A
25	Las Palmas 220	Los Vilos 220	-	TSIC - 16B
26	Los Vilos 220	Nogales 220	-	TSIC - 17
27	Los Vilos 220	Nogales 220	-	TSIC - 18
28	Nogales 220	Quillota 220	AIC SIC	TSIC - 19
29	Nogales 220	Quillota 220	AIC SIC	TSIC - 20
30	Polpaico 220	Quillota 220	AIC SIC	TSIC - 21
31	Polpaico 220	Quillota 220	AIC SIC	TSIC - 22
32	Candelaria 220	Maipo 220	AIC SIC	TSIC - 25
33	Candelaria 220	Maipo 220	AIC SIC	TSIC - 26
34	Maipo 220	Alto Jahuel 220	AIC SIC	TSIC - 27
35	Maipo 220	Alto Jahuel 220	AIC SIC	TSIC - 28
36	El Rodeo	Chena 220 (cto 1)	AIC SIC	TSIC - 29
37	El Rodeo	Chena 220 (cto 2)	AIC SIC	TSIC - 30
38	Polpaico 220	Lampa 220	AIC SIC	TSIC - 31
39	Polpaico 220	Lampa 220	AIC SIC	TSIC - 32
40	Lampa 220	Cerro Navia 220	AIC SIC	TSIC - 33
41	Lampa 220	Cerro Navia 220	AIC SIC	TSIC - 34
42	Cerro Navia 220	Chena 220	AIC SIC	TSIC - 35
43	Cerro Navia 220	Chena 220	AIC SIC	TSIC - 36
44	Alto Jahuel 220	Chena 220	AIC SIC	TSIC - 37
45	Alto Jahuel 220	Chena 220	AIC SIC	TSIC - 38
46	Ancoa 220	Itahue 220	AIC SIC	TSIC - 39
47	Ancoa 220	Itahue 220	AIC SIC	TSIC - 40
48	Charrúa 220	Hualpén 220	AIC SIC	TSIC - 44

N°	Tramo Troncal		Área de Influencia Común (AIC)	Código Asignado
	De Barra	A Barra		
49	Charrúa 220	Esperanza 220	-	TSIC - 45
50	Esperanza 220	Temuco 220	-	TSIC - 46
51	Charrúa 220	Cautín 220	-	TSIC - 47
52	Cautín 220	Cinuelos 220	-	TSIC - 49
53	Cinuelos 220	Valdivia 220	-	TSIC - 50
54	Valdivia 220	Barro Blanco 220	-	TSIC - 51
55	Barro Blanco 220	Puerto Montt 220	-	TSIC - 52
56	Cautín 220	Valdivia 220	-	TSIC - 54
57	Valdivia 220	Puerto Montt 220	-	TSIC - 55
58	Polpaico 500	Polpaico 220	AIC SIC	TSIC - 71
59	Alto Jahuel 500	Alto Jahuel 220	AIC SIC	TSIC - 72
60	Alto Jahuel 500	Alto Jahuel 220	AIC SIC	TSIC - 73
61	Ancoa 500	Ancoa 220	AIC SIC	TSIC - 74
62	Charrúa 500	Charrúa 220	AIC SIC	TSIC - 75
63	Charrúa 500	Charrúa 220	AIC SIC	TSIC - 76
64	Nogales 220	Polpaico 220	AIC SIC	TSIC - 79
65	Nogales 220	Polpaico 220	AIC SIC	TSIC - 80
66	Alto Jahuel	El Rodeo	AIC SIC	TSIC - 81
67	Alto Jahuel	El Rodeo	AIC SIC	TSIC - 82
68	Rapel 220	Melipilla 220	-	TSIC - 83
69	Rapel 220	Melipilla 220	-	TSIC - 84
70	Melipilla 220	Cerro Navia 220	-	TSIC - 85
71	Melipilla 220	Cerro Navia 220	-	TSIC - 86
72	Candelaria 220	Colbún 220	AIC SIC	TSIC - 87
73	Candelaria 220	Colbún 220	AIC SIC	TSIC - 88
74	Colbún 220	Ancoa 220	AIC SIC	TSIC - 89
75	Cautín 220	Temuco 220	-	TSIC - 90
76	Cautín 220	Temuco 220	-	TSIC - 91
77	Charrúa 220	Lagunillas 220	-	TSIC - 92